

СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ ПО ОСНОВНОМУ И БЛИЖНИМ БОКОВЫМ ЛЕПЕСТКАМ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ РЛС

А. А. Чижов^а, доктор техн. наук, доцент

^аВоенная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации им. Маршала Советского Союза А. М. Василевского, Смоленск, РФ

Постановка проблемы: актуальными остаются проблемы пространственной компенсации активных шумовых помех, действующих по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС. Рядом исследователей отмечается эффект «искажения» результирующей диаграммы направленности антенны РЛС или «смещения» ее максимума при пространственной компенсации помех, действующих по основному и ближним боковым лепесткам. При этом возможности и особенности сверхразрешения радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех исследованы недостаточно. **Цель:** исследовать возможности и особенности сверхразрешения радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех с близких к пеленгам целей угловых направлений, а также обосновать способ пространственной компенсации таких помех, обеспечивающий формирование при этом несмещенных оценок пеленгов одиночных и групповых сосредоточенных целей. **Результаты:** вскрыта причина смещенности оценок пеленгов целей при согласованной обработке сигналов в условиях воздействия активных шумовых помех, а именно не совсем корректное использование при формировании оценок всех составляющих функции правдоподобия. Предложен основанный на корректном использовании метода максимального правдоподобия способ обработки эхосигналов одиночных и групповых сосредоточенных целей при воздействии активных шумовых помех с близких к пеленгам целей угловых направлений, обеспечивающий формирование несмещенных оценок пеленгов, а также других параметров целей. Предложенный способ сверхразрешения радиолокационных целей эффективен при воздействии активных шумовых помех с произвольной пространственной корреляцией. **Практическая значимость:** предложенную обработку возможно использовать как составную часть процедуры проекционного сверхразрешения, а именно как процедуру оценки конфигурации портрета радиолокационной цели при воздействии активных шумовых помех.

Ключевые слова — активная шумовая помеха, сверхразрешение, защита от активных шумовых помех, компенсация активных шумовых помех.

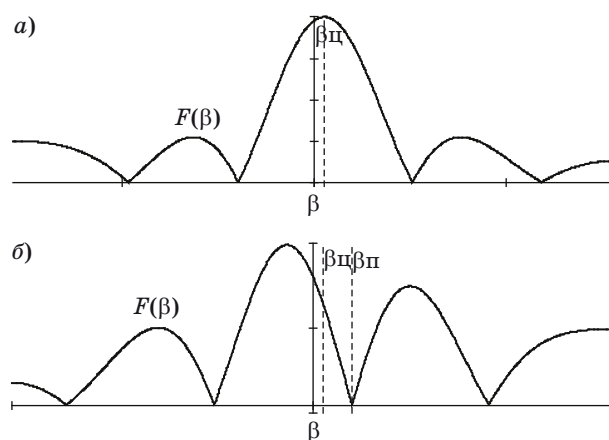
Введение

Проблемы пространственной компенсации активных шумовых помех (АШП), особенно действующих по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС, сами по себе являются не до конца исследованными и на современном этапе. Классические подходы к решению указанных проблем изложены, например, в работе [1].

Следует подчеркнуть, что в работе [1] и в других работах [2, 3] отмечается эффект «искажения» результирующей ДНА РЛС или «смещения» ее максимума при пространственной компенсации АШП, действующих по основному и ближним боковым лепесткам ДНА (рис. 1).

Результаты аналитического расчета ДНА РЛС в отсутствие АШП представлены на рис. 1, а, а результаты расчета «искаженной» результирующей ДНА РЛС при классической пространственной компенсации АШП, действующей в основном лепестке ДНА, — на рис. 1, б. Рисунки наглядно демонстрируют, что, наряду с формированием «нуля» в ДНА РЛС в направлении АШП, применение классической пространственной компенса-

ции АШП приводит к «смещению» максимума ДНА и, как следствие, к смещенности в оценках пеленга цели (даже одиночной). Это одна из проблем, решению которых посвящена статья.



■ **Рис. 1.** ДНА РЛС в отсутствие АШП (а) и результирующая ДНА РЛС при пространственной компенсации АШП, действующей в основном лепестке ДНА (б) ($\beta_{ц}$ и $\beta_{п}$ — пеленги цели и АШП)

Вместе с тем в настоящее время много работ посвящено различным методам и способам так называемого сверхразрешения радиолокационных целей, достаточно полный обзор и сравнительная оценка эффективности которых приведены в работах [4–6]. Из представленных в [5, 6] и других работах оценок следует, что максимальной энергетической эффективностью, приближающейся к потенциально возможной (так называемому желсторовскому пределу), обладает проекционный метод сверхразрешения. При этом если вопросы радиолокационного сверхразрешения в отсутствие АПП исследованы достаточно глубоко, то возможности и особенности сверхразрешения при воздействии АПП, тем более действующих по основному и ближним боковым лепесткам ДНА РЛС, исследованы недостаточно.

В настоящей статье исследованы возможности и особенности сверхразрешения радиолокационных целей при воздействии АПП с близких к пеленгам целей угловых направлений, а также обоснован способ пространственной компенсации АПП, обеспечивающий формирование при этом несмещенных оценок пеленгов одиночных и групповых сосредоточенных целей.

Способ сверхразрешения радиолокационных целей при воздействии АПП

Для того чтобы уяснить причины «смещенности» результирующей ДНА РЛС при компенсации АПП с близких к пеленгам целей угловых направлений, проанализируем составляющие функции правдоподобия в условиях наличия АПП.

Пусть с m -канальной антенной решеткой (АР) РЛС снимается эхосигнал цели (в общем случае групповой), принимаемый на фоне АПП:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}, t)\mathbf{E} + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{y}(t)$ — комплексная огибающая сигнала на выходе АР (вектор-функция размера $m \times 1$); $\mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}) = [\mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}_1, t) \mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}_2, t) \dots \mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}_n, t)]$ — матрица-функция эхосигналов отдельных целей; $\mathbf{E} = [E_1 E_2 \dots E_n]^T$ — вектор комплексных амплитуд эхосигналов отдельных целей; $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n]^T$ — вектор информативных параметров эхосигналов отдельных целей (например, пеленгов целей); $\mathbf{n}(t)$ — шум наблюдения (собственные шумы АР и АПП, характеризующиеся корреляционной матрицей $\boldsymbol{\theta}(t, t') = \boldsymbol{\Theta}\delta(t - t')$). Следует отметить, что для сокращения выкладок в статье рассмотрен частный, но достаточно часто распространенный случай, когда собственные шумы АР и АПП задаются гауссовыми и некоррелированными по времени (белыми), но все последующие рассуждения можно повторить и для более общего случая. Также необходимо указать, что вопросы оценки $\boldsymbol{\theta}$ в статье

не рассматриваются, считается, что она оценивается с достаточной точностью в тех каналах дальности и (или) скорости, где заведомо отсутствуют радиолокационные цели.

Применительно к (1) функция правдоподобия (ФП) описывается следующим нормальным распределением (индекс N обозначает операцию эрмитова сопряжения — одновременного транспонирования и комплексного сопряжения):

$$p(\mathbf{y}/\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{E}) = \text{const} \exp\left(-\int (\mathbf{y}(t) - \mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}, t)\mathbf{E})^H \times \boldsymbol{\Theta}^{-1}(\mathbf{y}(t) - \mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}, t)\mathbf{E}) dt\right). \quad (2)$$

Исследование на экстремум ФП $p(\mathbf{y}/\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{E})$ классически заменяется исследованием на экстремум ее натурального логарифма, который после раскрытия скобок в (2) задается выражением

$$\ln p(\mathbf{y}/\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{E}) = 2\text{Re}(\mathbf{E}^H \mathbf{Z}(\boldsymbol{\alpha})) - \mathbf{E}^H \mathbf{Q}(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{E} + \text{const}, \quad (3)$$

где $\mathbf{Z}(\boldsymbol{\alpha}) = \int \mathbf{s}^H(\boldsymbol{\alpha}, t)\boldsymbol{\Theta}^{-1}\mathbf{y}(t)dt$ — векторный корреляционный интеграл; $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\alpha}) = \int \mathbf{s}^H(\boldsymbol{\alpha}, t)\boldsymbol{\Theta}^{-1}\mathbf{s}(\boldsymbol{\alpha}, t)dt$ — матрица Грама эхосигналов отдельных целей.

Следует подчеркнуть, что классическая (при локации одиночной цели и $n = 1$) согласованная обработка с пространственной компенсацией АПП подразумевает поиск максимума лишь одной составляющей ФП, а именно поиск максимума модуля корреляционного интеграла:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{\text{согл}} = \arg \max_{\boldsymbol{\alpha}} |\mathbf{Z}(\boldsymbol{\alpha})|. \quad (4)$$

Одним из множителей в подынтегральном выражении для корреляционного интеграла является матрица, обратная матрице $\boldsymbol{\Theta}$, что и приводит к формированию «нуля» в ДНА РЛС в направлении АПП (см. рис. 1, б), т. е. обеспечивает компенсацию АПП. Вместе с тем, как указывалось выше (см. рис. 1), применение классической пространственной компенсации АПП приводит к «смещению» максимума ДНА и, как следствие, к смещенности в оценках пеленга цели (даже одиночной). Последнее противоречит общезвестному факту о несмещенности оценок, получаемых по методу максимального правдоподобия.

Следует несколько более подробно остановиться на указанном противоречии, причина которого состоит в том, что оценки (4) не являются в данном случае оценками максимального правдоподобия, и зачастую воспринимаемая как постулат логика, что максимум модуля корреляционного интеграла соответствует максимуму ФП, в рассматриваемом случае (а также в более общем случае локации групповой цели) неправомерна.

Необходимо подчеркнуть, что максимум модуля корреляционного интеграла соответствует

максимуму ФП только в случае локации одиночной цели (при $n = 1$) в отсутствие АШП (и, если совсем строго, при некоррелированных собственных шумах АР). При этом составляющая ФП $E^H Q(\alpha) E$, имеющая смысл энергии ожидаемого эхосигнала (в этом случае — диагональная матрица), не зависит от α , а максимум модуля корреляционного интеграла соответствует максимуму ФП.

Зависимость Q от α при локации одиночной цели и наличии АШП, а также зависимость натурального логарифма ФП (3) от α для того же случая представлены на рис. 2.

На рисунке продемонстрирован тот факт, что если при формировании оценок пеленгов целей учитывать все составляющие ФП, то оценки максимального правдоподобия действительно являются несмещенными.

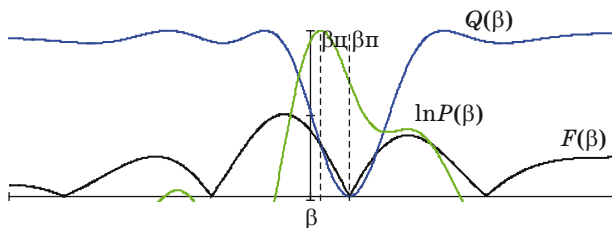
Необходимо оговориться, что графические зависимости на рис. 2 построены для нехарактерной для практики простейшей ситуации, когда комплексная амплитуда эхосигнала одиночной цели известна. Основанный на методе максимального правдоподобия способ формирования оценок вектора информативных параметров α в общем случае (в том числе и при локации групповой сосредоточенной цели) должен быть основан на следующем выражении:

$$\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} Z^H(\alpha) Q^{-1}(\alpha) Z(\alpha). \quad (5)$$

Выражение (5) получено максимизацией (3) с учетом квадратичной зависимости натурального логарифма ФП (3) от E и возможности аналитического исключения E из процесса поиска экстремума.

Действительно, квадратичная форма $(Z(\alpha) - Q(\alpha)E)^H Q(\alpha)^{-1} (Z(\alpha) - Q(\alpha)E)$ при любом фиксированном α имеет глобальный минимум по E при $E = Q^{-1}(\alpha) Z(\alpha)$. Вместе с тем эту же форму возможно записать в виде $Z^H(\alpha) Q^{-1}(\alpha) Z(\alpha) - E^H Z(\alpha) - Z^H(\alpha) E + E^H Q(\alpha) E = Z^H(\alpha) Q^{-1}(\alpha) Z(\alpha) - \ln p(\alpha, E)$, откуда непосредственно следует, что $\hat{E} = \arg \max_E \ln p(y / \alpha, E) = Q^{-1}(\alpha) Z(\alpha)$ при том, что

$$\arg \max_{\alpha} Z^H(\alpha) Q^{-1}(\alpha) Z(\alpha) = \arg \max_{\alpha} \ln p(y / \alpha, \hat{E}).$$



■ Рис. 2. Зависимость Q от α , а также зависимость натурального логарифма ФП от α при локации одиночной цели и наличии АШП

Последнее свидетельствует о справедливости выражения (5).

Приведенное доказательство не использует операцию дифференцирования $\ln p(\alpha, E)$ по E , которая вследствие квадратичной зависимости $\ln p(\alpha, E)$ от комплексного вектора E невозможна. Для полной математической строгости приведенного доказательства следует также добавить, что матрица Грама эхосигналов отдельных рассеивателей Q является эрмитово сопряженной ($Q = Q^H$) и, в типовых ситуациях, невырожденной.

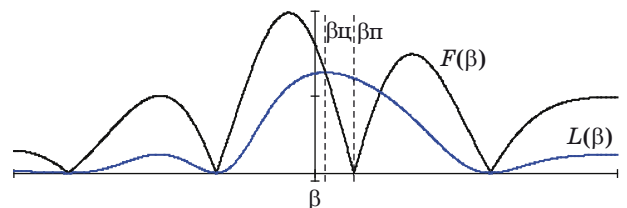
Оценка эффективности предложенного способа сверхразрешения радиолокационных целей при воздействии АШП

Аналитически рассчитанная зависимость $L(\beta) = Z^H(\beta) Q^{-1}(\beta) Z(\beta)$ для случая локации одиночной цели при наличии АШП показана на рис. 3. Из анализа рисунка видно, что формируемые согласно (5) оценки пеленга одиночной цели являются несмещенными.

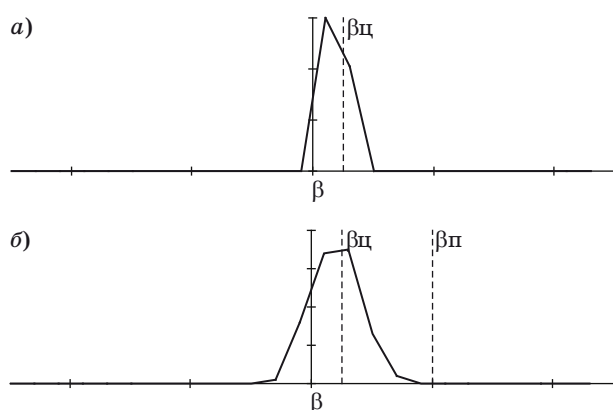
Результаты имитационного математического моделирования процесса пеленгации одиночной цели в отсутствие и при наличии АШП представлены на рис. 4, а и б. При этом в ходе моделирования обработки эхосигналов согласно (5) использовалась оценка корреляционной матрицы шумовых помех, полученная по 16 реализациям шума.

Анализ рис. 4 позволяет сделать выводы, во-первых, о работоспособности исследуемого способа, а во-вторых, о несмещенности формируемых оценок пеленга одиночной цели при наличии АШП в основном лепестке ДНА РЛС.

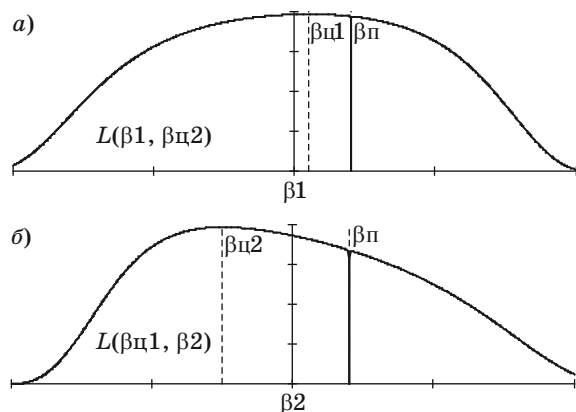
Анализ рис. 5, а и б, где приведены аналитически рассчитанные сечения зависимости $L(\beta_1, \beta_2) = Z^H(\beta_1, \beta_2) Q^{-1}(\beta_1, \beta_2) Z(\beta_1, \beta_2)$ для случая локации парной сосредоточенной цели при наличии АШП, показывает, что формируемые согласно (5) оценки пеленгов отдельных целей из состава парной также являются несмещенными.



■ Рис. 3. Зависимость $L(\beta) = Z^H(\beta) Q^{-1}(\beta) Z(\beta)$ для случая локации одиночной цели при наличии АШП (для сравнения также приведена результирующая ДНА РЛС при пространственной компенсации АШП, действующей в основном лепестке ДНА РЛС)



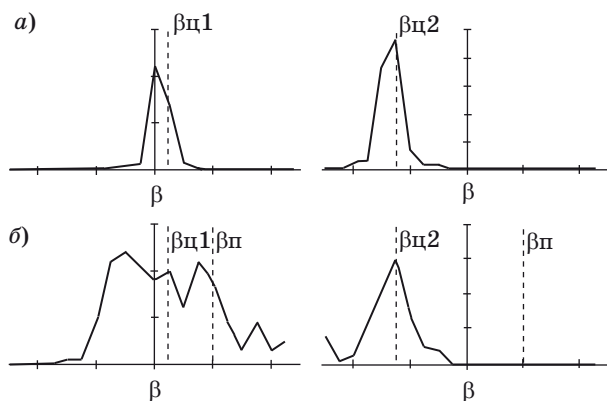
■ **Рис. 4.** Распределение оценок пеленгов одиночной цели в отсутствие (а) и при наличии (б) АШП (отношение сигнал/шум 26 дБ, отношение помеха/шум 60 дБ, удаление пеленга АШП от пеленга цели 0,25 ширины ДНА РЛС)



■ **Рис. 5.** Сечения зависимости $L(\beta_1, \beta_2)$ для случая локации парной цели при наличии АШП: а — вертикальное сечение, параллельное оси β_1 , проходящее через точку $\beta_{ц2}$ на оси β_2 ; б — вертикальное сечение, параллельное оси β_2 , проходящее через точку $\beta_{ц1}$ на оси β_1

Результаты имитационного математического моделирования процесса пеленгации парной сосредоточенной цели в отсутствие и при наличии АШП представлены на рис. 6, а, б. При этом, как и ранее, в ходе моделирования обработки эхосигналов согласно (5) использовалась оценка корреляционной матрицы шумовых помех, полученная по 16 реализациям шума.

Результаты моделирования свидетельствуют о работоспособности исследуемого способа при типовых отношениях сигнал/шум, в том числе в ситуациях, когда в пределах основного лепестка ДНА РЛС присутствует несколько целей и АШП. Естественно, что точность пеленгации отдельных целей из состава групповой сосредоточенной и особенно цели, пеленг которой находится вблизи



■ **Рис. 6.** Распределение оценок пеленгов парной цели в отсутствие (а) и при наличии (б) АШП (отношение сигнал/шум по каждой цели 26 дБ, отношение помеха/шум 60 дБ, взаимное удаление пеленгов целей 0,5 ширины ДНА РЛС, удаление пеленга АШП от пеленга ближайшей цели 0,25 ширины ДНА РЛС)

пеленга источника АШП (см. рис. 6), несколько ниже, чем точность пеленгации одиночной цели (см. рис. 4), однако при достаточном для соответствующих условий локации отношении сигнал/шум точностные характеристики обработки сопоставимы с аналогичными, полученными в отсутствие АШП.

Заключение

Таким образом, основанный на методе максимального правдоподобия предложенный способ обработки эхосигналов одиночных и групповых сосредоточенных целей при воздействии АШП с близких к пеленгам целей угловых направлений обеспечивает формирование несмещенных оценок их пеленгов, а также других параметров, т. е. является способом сверхразрешения радиолокационных целей при воздействии АШП с произвольной пространственной корреляцией. Предложенную обработку возможно использовать как составную часть процедуры проекционного сверхразрешения [5–6], а именно как процедуру оценки конфигурации портрета радиолокационной цели при воздействии АШП.

Литература

1. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. — М.: Радио и связь, 1981. — 416 с.
2. Григорян Д. С., Торбин С. А., Герасимов В. В. Защита моноимпульсного радиопеленгатора от активной шумовой помехи, действующей по основным лепесткам диаграмм направленности //

Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2014. № 2. С. 103–112.

3. Pan D., Cheng N., Bian Y. Method Eases Monopulse System Jamming// *Microwaves & RF*. Aug. 2014. P. 82–86.
4. Чижов А. А. Сверхрешающее разрешение. Т. 1: Классический взгляд на проблему. — М.: Касанд, 2010. — 96 с.

5. Чижов А. А. Сверхрешающее разрешение. Т. 2: Преодоление фактора некорректности обратной задачи рассеяния и проекционная радиолокация. — М.: Касанд, 2010. — 104 с.

6. Чижов А. А. Метод разрешения групповых сосредоточенных целей // *Радиотехника*. 2009. № 10. С. 4–12.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.88

Super-Resolution of Radar Targets under Jamming on Primary and Middle Lateral Lobes of Radar Antenna Directivity Diagram

Chizhov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, rtshouse@mail.ru

^aThe Marshal of the Soviet Union A. M. Vasilevsky Army Air Defense Military Academy of the Armed Forces of the Russian Federation, 2, Kotovskogo St., 214027, Smolensk, Russian Federation

Introduction: Spatial compensation of jamming on the primary and middle lateral lobes of a radar antenna directivity diagram is still a serious problem. Some researchers noted the effects of "distortion" of the resulting antenna pattern, or an "offset" of its maximum when the noise on the primary and middle lateral lobes is compensated spatially. The features and capabilities of super-resolution radar targets under the influence of jamming is studied insufficiently. **Purpose:** The goal of this paper is to explore the capabilities and features of super-resolution radar targets under the impact of jamming with angular direction targets close to bearing, and to substantiate the method of spatial compensation of such noise, providing the formation of unbiased estimates of bearing for single and group targets. **Results:** It has been found out why the estimates of target bearing were shifted when the signals were processed coherently under active noise. This shift took place because all the likelihood function components were used in a not completely correct way. An alternative way is proposed, based on a correct usage of maximum likelihood method. This way ensures that the bearing estimates do not shift. The proposed method of radar target super-resolution is effective under the impact of jamming with arbitrary spatial correlation. **Practical relevance:** The proposed treatment can be used as an integral part of the projective superresolution procedure, more precisely as a procedure for evaluating the configuration of a radar target portrait under the impact of jamming.

Keywords — Active Noise Jamming, Super-resolution, Active Noise Jamming Protection, Active Noise Jamming Compensation.

References

1. Shirman Ia. D., Manzhos V. N. *Teoriia i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoi informatsii na fone pomekh* [Theory and Technique of Processing Radar Information on the Interferences Background]. Moscow. Radio i sviaz' Publ., 1981. 416 p. (In Russian).
2. Grigoryan D. S., Torbin S. A., Gerasimov V. V. Monopulse Radar Protection from the Active Noise Interference Acting on the Main Lobe of Antenna Diagram. *Vestnik Kontserna PVO "Almaz-Antei"*, 2014, no. 2, pp. 103–112 (In Russian).
3. Pan D., Cheng N., Bian Y. Method Eases Monopulse System Jamming. *Microwaves & RF*, August 2014, pp. 82–86.
4. Chizhov A. A. *Sverkhreleevskoe razreshenie. Tom 1. Klassicheskii vzgliad na problemu* [Super Resolution. Vol. 1. Classic View on the Problem]. Moscow, Krasand Publ., 2010. 96 p. (In Russian).
5. Chizhov A. A. *Sverkhreleevskoe razreshenie. Tom 2. Preodolenie faktora nekorrektnosti obratnoi zadachi rasseianiia i proektsionnaia radiolokatsiia* [Super Resolution. Vol. 2. Overcoming the Incorrectness Factor of the Inverse Dispersion Problem and Projection Radiolocation]. Moscow. Krasand Publ., 2010. 104 p. (In Russian).
6. Chizhov A. A. The Method of Resolution of Multiple Lumped Targets. *Radiotekhnika*, 2009, no. 10, pp. 4–12 (In Russian).