

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВАХ С КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Ву Тхань Ха, С. В. Козлов, А.Н. Мороз

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены алгоритмы обработки принимаемых сигналов в радиолокационных средствах (РЛСр) с коническим сканированием и подсистемой пространственной компенсации помех (ПКП). Получены зависимости среднеквадратических ошибок пеленгации цели от параметров флуктуаций отраженного сигнала, пространственно-энергетической ситуации и подсистемы ПКП.

Ключевые слова: пространственная компенсация помех, радиолокационная станция, коническое сканирование, измерение угловых координат, статистические характеристики, функция правдоподобия.

FEATURES OF ANGULAR COORDINATES ESTIMATION IN RADAR MEANS WITH A CONICAL SCANNING AND A SPATIAL ACTIVE NOISE INTERFERENCE COMPENSATION

Vu Thanh Ha, S. V. Kozlov, A.N. Moroz

Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Minsk, Belarus

Abstract. Algorithms of processing of the received signals in radar facilities with conical scanning and subsystem of spatial compensation of hindrances are resulted. The dependences of the mean square errors of the target direction finding on the parameters of the reflected signal fluctuations, the space-energy situation and the spatial compensation subsystem are obtained.

Keywords: spatial noise compensation, radar station, conical scanning, measurement of angular coordinates, statistical characteristics, likelihood function.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на развитие моноимпульсных антенных систем и цифровых антенных решеток, продолжают оставаться практически значимым использование радиолокационных средств с коническим сканированием. Это определяется относительной простотой построения и невысокой стоимостью указанных РЛСр. Поэтому принцип конического сканирования при измерении угловых координат широко используется в «массовых» радиолокационных средствах. В этих условиях актуальным является обеспечения требуемой помехоустойчивости РЛСр с коническим сканированием в условиях мощных активных помех, воздействующих с направлений главного и боковых лепестков ДН основной антенны. В качестве основного средства повышения помехоустойчивости в указанных условиях выступает использование подсистем адаптивной ПКП на базе многоканальных приемных систем.

Вопросы защиты РЛСр с коническим сканированием путем пространственной

обработки сигналов, принимаемых многоканальной антенной системой, исследовались в [1-4]. Так в [1, 2] рассмотрен способ измерения угловых рассогласований цели моноимпульсным радиопеленгатором цифровой импульсно-доплеровской радиолокационной станции при подавлении активной шумовой помехой с направлений основных лепестков диаграмм направленности его антенн. В основе способа лежит пространственная компенсация шумовой помехи с последующим выделением угловых рассогласований из выделенного отраженного сигнала, модулированного по амплитуде за счет конического развертывания диаграммы направленности антенны на передачу. В работе [5] предложен алгоритм оценивания угловых координат цели на основе анализа всех составляющих функции правдоподобия, что сводится, фактически, к проверке множества гипотез о наличии одиночной цели или заданного числа целей в конкретных угловых направлениях (по заданной сетке) в пределах области неопределенности. В работах [6, 7] на основе развития подхода для обзорных РЛС с круговым механическим сканированием антенной системы получены функции правдоподобия и статистические характеристики точности измерения угловых координат для произвольных флуктуаций отраженного сигнала.

Целью настоящей статьи является распространение подхода [6, 7] для РЛС с коническим сканированием антенной системы.

2. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И ИХ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По аналогии с [6, 7] будем рассматривать импульсную РЛС с механическим управлением антенной системы, состоящей из основной приемопередающей антенны с коэффициентом усиления G_0 и $\ell = \overline{1, L}$ дополнительных (компенсационных) антенн с коэффициентами $G_\ell \ll G_0$. Вариантом реализации антенной системы является использование основной антенны, разбитой на прием четыре квадранта [1-3], сигналы с которых принимаются и обрабатываются самостоятельно. Круговая частота и амплитуда конического сканирования составляют Ω и $\Delta\theta \approx (0,25 \dots 0,5)\Delta\theta_{0,5}$, где $\Delta\theta_{0,5}$ - ширина главного лепестка ДН основной антенны по уровню 0,5 от уровня максимальной мощности. Пространственная компенсация помех реализуется независимо в пределах каждого периода зондирующего сигнала. Под длительность радиолокационного наблюдения будем понимать один период конического сканирования, включающий излучение и прием $I = \frac{2\pi}{\Omega T_r}$ импульсов с периодом повторения T_r .

Для вектор-столбцов $\mathbf{y}_i = (\dot{Y}_{0_i}, \dot{Y}_{1_i}, \dots, \dot{Y}_{L_i})^T$ отсчетов сигналов на выходах основной и компенсационных антенн при приеме i -го импульса отраженного сигнала запишем

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{y}_{\text{ш}_i} + \mathbf{y}_{\text{п}_i} + \mathbf{y}_{\text{с}_i}, \quad (1)$$

где $\mathbf{y}_{\text{ш}_i} = (\dot{\xi}_{\text{ш}_{i,0}}, \dot{\xi}_{\text{ш}_{i,1}}, \dots, \dot{\xi}_{\text{ш}_{i,1}})^T$ - вектор-столбцы отсчетов собственных шумов; $\dot{\xi}_{\text{ш}_{i,\ell}}$ - отсчеты внутреннего шума ℓ -го приемного канала для i -го импульса пачки;

$$\mathbf{y}_{c_i} = \xi_{c_i} \sqrt{P_c} \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha_c, \beta_{ai} - \beta_c) \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha_c, \beta_{ai} - \beta_c) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_{\pi_i} = \sum_{m=1}^M \xi_{\pi_{i,m}} \sqrt{P_m} \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha_{\pi_m}, \beta_{ai} - \beta_{\pi_m}) \quad (3)$$

- вектор-столбцы отсчетов собственных шумов, отраженного сигнала и внешних помех; P_c - средняя мощность отраженного от цели одиночного сигнала на выходе изотропной приемной антенны при условии, что передающая антенна ориентирована на цель максимумом главного лепестка ДН; P_m - мощность m -го источника помех на выходе изотропной приемной антенны при условии; $\xi_{\pi_{i,m}}$ - независимые центрированные гауссовы случайные величины с единичной дисперсией; ξ_{c_i} - последовательность центрированных гауссовых случайных величин с корреляционной функцией, определяемой моделью флуктуации отраженного сигнала; $\dot{F}_0(\alpha, \beta)$ - ДН передающей антенны в системе координат «азимут-угол места»; α_{ai} , β_{ai} - азимут и угол места максимума главного лепестка антенны в момент времени, соответствующий приему i -го импульса отраженного сигнала (влияние угловых перемещений и эклипсинга [4] в первом приближении не учитывается); (α_c, β_c) , $(\alpha_{\pi_m}, \beta_{\pi_m})$ - азимут и угол места источника полезного сигнала и $m = \overline{1, M}$ источников помех; $\mathbf{s}(\alpha, \beta) = (\dot{F}_0(\alpha, \beta), \dot{F}_1(\alpha, \beta), \dots, \dot{F}_L(\alpha, \beta))^T$ - вектор-столбец, составленный из диаграмм направленности основного и компенсационных каналов антенной системы РЛСр.

Для конического развертывания антенной системы запишем:

$$\begin{cases} \alpha_{ai} = \alpha_{a0} + \Delta\theta \cos(\Omega(i-1)T_r); \\ \beta_{ai} = \beta_{a0} + \Delta\theta \sin(\Omega(i-1)T_r), \end{cases} \quad (4)$$

где $(\alpha_{a0}, \beta_{a0})$ - азимут и угол места центра зоны сканирования.

Аналогично [6] при записи (2) предполагается, что предварительно выполнена оценка время задержки τ_z и доплеровского сдвига частоты f_d отраженного от цели сигнала, причем последняя величина скомпенсирована.

Ограничимся случаями модели отраженного сигнала (ОС) в виде когерентной пачки дружно флуктуирующих сигналов (М1.2), для которой ξ_{c_i} - последовательность центрированных гауссовых случайных величин с корреляционной функцией вида $R_\xi(\tau) = e^{-\tau/\tau_c}$, где τ_c - интервал корреляции ОС, и пачки быстро (М2.3) флуктуирующих сигналов, для которой ξ_{c_i} - последовательность независимых центрированных гауссовых случайных величин с единичной дисперсией.

Анализ (1)-(4) показывает, что задача оценивания угловых координат в РЛСр с коническим сканированием аналогична рассмотренной в [6] задаче оценивания угловых координат в обзорной РЛС с увеличением размерности формируемых функций правдоподобия. Максимально правдоподобные оценки азимута цели

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \arg \max_{\alpha, \beta} \Psi(\mathbf{z} / \alpha, \beta), \quad (5)$$

где $\Psi(\mathbf{z} / \alpha, \beta)$ - логарифм функции (отношения) правдоподобия.

Для модели когерентной пачки дружно флуктуирующих отраженных сигналов (алгоритм 1.2 [6])

$$\Psi_{1,2}(\mathbf{z} / \alpha, \beta) = \mathbf{z}^+ (\mathbf{E} - (\mathbf{E} + \hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) \mathbf{R}(\alpha, \beta))^{-1} \mathbf{z} - \ln |\mathbf{E} + \hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) \mathbf{R}(\alpha, \beta)|, \quad (6)$$

где $\mathbf{z} = (\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dots, \dot{Z}_I)^T$ - вектор-столбец, составленный из отсчетов $\dot{Z}_i = \frac{\boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{y}_i}{\sqrt{\boldsymbol{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \boldsymbol{\omega}_i}}$

«обеленной» принимаемой реализации; $\boldsymbol{\omega}_i$ - вектор весовых коэффициентов приемных каналов для i -го импульса пачки; $\hat{\Phi}_i$ - оценка корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов для i -го импульса пачки; $\mathbf{R}(\alpha, \beta)$ - нормированная корреляционная матрица отсчетов флуктуирующую полезного сигнала с учетом операции обеления с элементами

$$R_{i,j}(\alpha, \beta) = r^{|i-j|} \dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta) Z_{\text{оп}_j}^*(\alpha, \beta) =$$

$$= r^{|i-j|} \frac{\dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha, \beta_{ai} - \beta) F_0^*(\alpha_{aj} - \alpha, \beta_{aj} - \beta) \boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha, \beta_{ai} - \beta) \mathbf{s}^+(\alpha_{aj} - \alpha, \beta_{aj} - \beta) \boldsymbol{\omega}_j}{\sqrt{\boldsymbol{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \boldsymbol{\omega}_i}};$$

$$\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta) = \frac{\dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha, \beta_{ai} - \beta) \boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha, \beta_{ai} - \beta)}{\sqrt{\boldsymbol{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \boldsymbol{\omega}_i}} \quad (7)$$

- отсчеты ожидаемого (опорного) сигнал с учетом операции обеления;

$$\hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) = \frac{\sum_{i=1}^{I-1} \dot{Z}_i Z_{i+1}^*}{\sum_{i=1}^{I-1} r \dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta) Z_{\text{оп}_{i+1}}^*(\alpha, \beta)}. \quad (8)$$

- оценка средней мощности принимаемого когерентного дружно флуктуирующего ОС на выходе изотропной приемной антенны, когда цель облучается максимумом главного лепестка ДН передающей антенны.

Для некогерентной пачки быстро флуктуирующих сигналов (алгоритм 2.3 [6])

$$\Psi_{2,3}(\mathbf{z} / \alpha, \beta) = \sum_{i=1}^I \ln \frac{1}{1 + \hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta)|^2} + \sum_{i=1}^I \frac{\hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta)|^2}{1 + \hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta)|^2} |\dot{Z}_i|^2, \quad (9)$$

где

$$\hat{\sigma}_c^2(\alpha, \beta) = \frac{\sum_{i=0}^I |\dot{Z}_i|^2 - I}{\sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha, \beta)|^2} \quad (10)$$

- оценка средней мощности принимаемого быстро флуктуирующего ОС на выходе изотропной приемной антенны, когда цель облучается максимумом главного лепестка ДН передающей антенны.

Соотношения (4)-(10) конкретизируют алгоритмы обработки [6] применительно к РЛС с коническим сканированием.

Для расчета точности оценивания координат могут быть использован подход, изложенный в [7]. Он основан на численном вычислении второй производной от среднего значения функции правдоподобия в окрестности максимума. Применительно к РЛС с коническим сканированием для получения дисперсии ошибок оценивания угловых координат расчетные соотношения [7] применяются дважды для азимутальной и угломестной плоскости, соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Иллюстрация работоспособности предлагаемых алгоритмов и особенностей процессов измерения угловых координат цели в РЛС с коническим сканированием для одной из реализаций приведена на рис. 1. Зависимости построены для «тяжелой» пространственно-энергетической ситуации малого углового рассогласования сигнала и помехи. Принималось $\alpha_c = 1^\circ$; $\beta_c = 0^\circ$; $\alpha_{\Pi} = 2^\circ$; $\beta_{\Pi} = 2^\circ$; $\Omega = 20\pi \text{ с}^{-1}$, $\Delta\theta = 2^\circ$; $T_r = 1 \text{ мс}$; $\tau_c \rightarrow \infty$, максимальное отношение сигнал/шум по одному импульсу пачки и помеха/шум 20 дБ и 50 дБ, соответственно. Антенная система моделировалась в виде основной апертуры круглой формы радиусом 7 длин волн ($\Delta\theta_{0,5} = 4^\circ$) и двух круглых компенсационных апертур радиусом 2 длины волны, пристыкованных справа и слева к основной апертуре в азимутальной плоскости. Амплитудное распределение поля на апертурах принималось равномерным, погрешности распределения на апертурах не учитывались. При проведении пространственной компенсации использовался критерий максимума отношения сигнал/помеха+шум [6].

Как видно из рис. 1, после пространственной компенсации помех принимаемая реализация сильно искажена, в основном, взвешенными шумами при практически полной компенсации внешней помехи. Максимум мощности взвешенных шумов имеет место примерно на 15 импульсе пачки, когда угловое расстояние между максимумом ДН основного канала и помехой минимально. При этом определение углового положения цели путем корреляции с исходным опорным сигналом приводит к большим ошибкам. После операции обеления помехи в временной области (рис. 1в) принимаемая реализация хорошо совпадает с измененным опорным сигналом.

Для моделируемой ситуации оценка угловых координат полезного сигнала (квадратный маркер на рис. 1г.д) несмотря на относительно близкое расположение источника помех достаточно близко к истинному значению. Величина ошибки не превышает 10% от ширины главного лепестка ДН основного канала. Значение логарифма функции (отношения) правдоподобия для когерентной обработки примерно в два раза больше, чем для некогерентной.

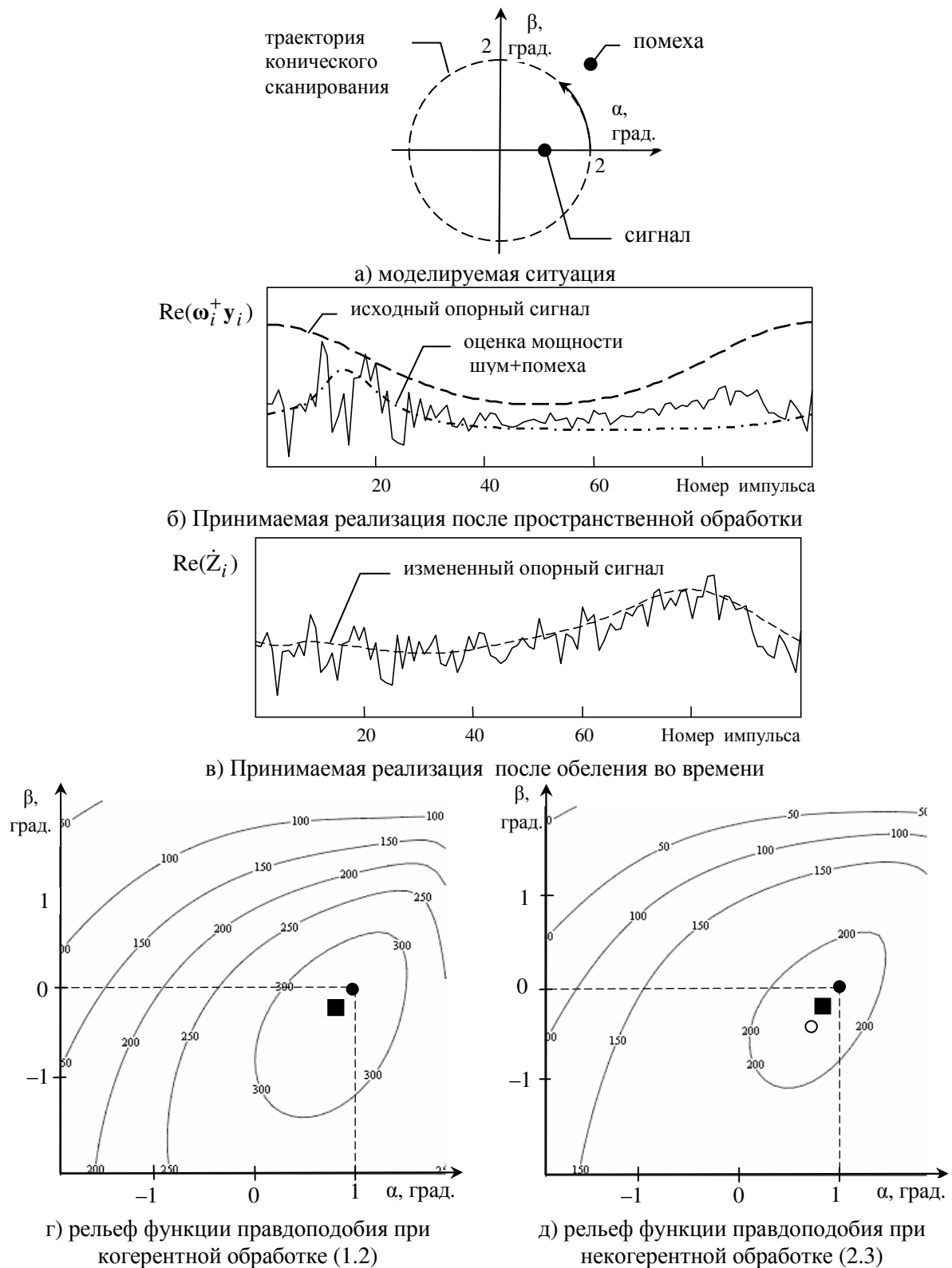


Рис. 1. Моделируемая ситуация (а), реализации сигналов после пространственного (б) и временного (в) отбеливания и рельеф функции правдоподобия (г, д)

На рис. 2 для различных вариантов обработки и параметров флуктуации отраженного сигнала приведены полученные по расчетным соотношениям [7] нормированные к ширине главного лепестка основного канала среднеквадратические ошибки пеленгации полезного сигнала в азимутальной плоскости. Источник полезного

сигнала располагался на оси конического сканирования, отношение сигнал/шум по одному импульсу 20 дБ.

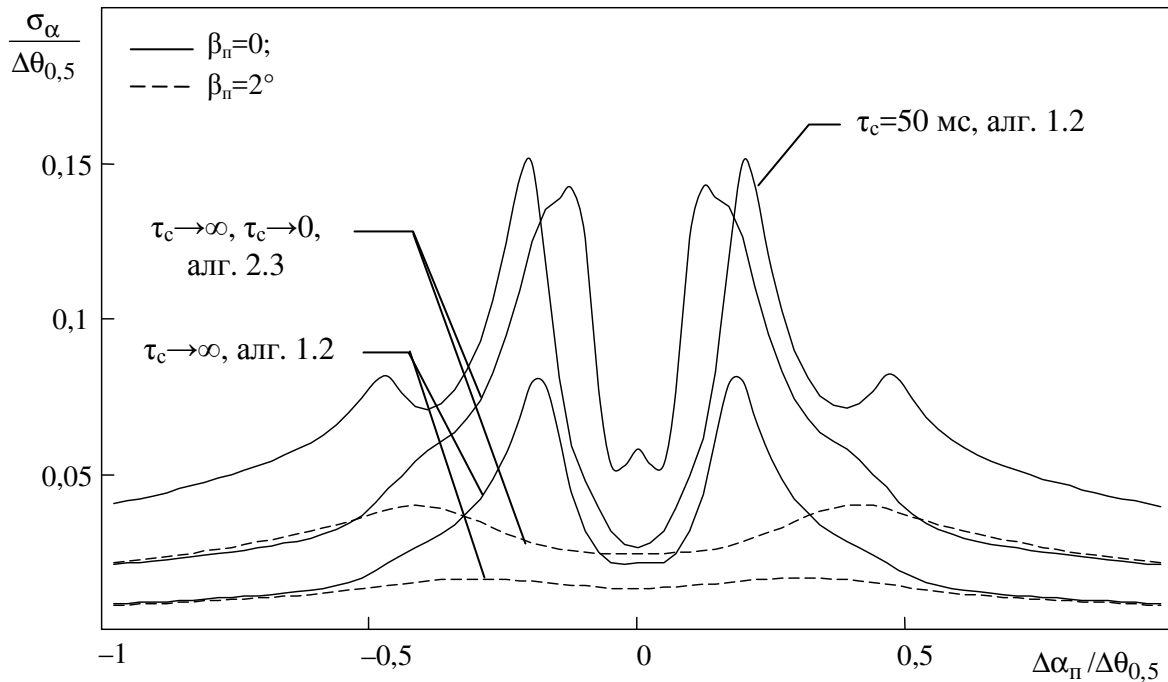


Рис. 2. Зависимости нормированной ошибки оценивания угловых координат цели от нормированного углового отклонения источника помехи

Как видно из рис. 2, во всех случаях обеспечивается, фактически, сверхразрешение источника полезного сигнала и мощной помехи, воздействующей по главному лепестку основного канала.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании требований и исследованию эффективности помехоустойчивых радиолокационных средств с коническим сканированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Торбин С.А., Григорян Д.С. Способ защиты моноимпульсного радиопеленгатора от активной шумовой помехи по основным лепесткам диаграмм направленности антенн // Антенны, № 7, 2014. - С. 54-61.
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. Торбин С.А. Обработка сигналов цифрового пеленгатора с коническим сканированием диаграммы направленности в условиях активной шумовой помехи // Материалы международной конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2014». Выпуск 20, Москва, 2014. - С. 368-379.
4. Торбин С.А. Влияние угловых перемещений антенны и эклипсинга на точность пеленгации цели радиолокатором с коническим разворачиванием луча на передачу при подавлении активной шумовой помехи в основном лепестке приемной диаграммы направленности // Журнал радиоэлектроники, № 2, 2015.

5. Чижев А.А. Суперразрешение радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС // Информационно-управляющие системы, № 1, 2016. - С. 88-92.
6. Ву Тхань Ха, Козлов С.В. Алгоритмы оценивания угловых координат в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами. В настоящем сборнике.
7. Ву Тхань Ха, Козлов С.В. Статистические характеристики обнаружения и оценивания угловых координат целей в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами. В настоящем сборнике.

REFERENCES

1. Torbin S.A., Grigoryan D.S. The way to protect monopulse finder from active noise interference on the main lobes of the antenna patterns // *Antennas*, № 7, 2014. - Pp. 54-61.
2. Grigoryan D.S., Torbin S.A., Gerasimov V.V. Protection of a monopulse direction finder from active noise interference acting on the main lobes of radiation patterns // *Concern of Almaz-Antey Air Defense Concern*, 2014, No. 2, - Pp. 103-112.
3. Torbin S.A. Signal processing of a digital direction finder with a conical scanning pattern under active noise interference // *Proceedings of the international conference "Digital signal processing and its application DSPA – 2014"*. Issue 20, Moscow, 2014. - Pp. 368-379.
4. Torbin S.A. The influence of the antenna and eclipse angular displacements on the accuracy of the direction finding of the target by radar with a conical beam deployment on the transmission while suppressing active noise interference in the main lobe of the receiving radiation pattern // *Journal of Radio Electronics*, № 2, 2015.
5. Chizhov A.A. Radar targets super-resolution when exposed to active noise interference along the main and near side lobes of a radar antenna pattern // *Information Control Systems*, № 1, 2016. - Pp. 88-92.
6. Vu Thanh Ha, Kozlov S.V. Algorithms for estimating the angular coordinates in survey radars with multichannel receiving systems. In this collection.
7. Vu Thanh Ha, Kozlov S.V. Statistical characteristics of detecting and estimating the angular coordinates of targets in survey radars with multichannel receiving systems. In this collection.