

УДК 621.396.96+621.396.67

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ КАЛИБРОВКИ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ СО СКАНИРУЮЩЕЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

ВУ ТХАНЬ ХА, КОЗЛОВ С. В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: kozlov@bsuir.by

Аннотация. Установлено сохранение работоспособности радиолокационного измерителя угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой при выходе из строя части приемных каналов. Определены требования к ошибкам калибровки приемных каналов по амплитуде и фазе при заданных максимальных ошибках оценивания угловых координат.

Abstract. It is shown that a radar measuring device of angular coordinates with a scanning multichannel antenna system remains operational in case of failure of a part of the receiving channels. The requirements for the errors in the calibration of the receiving channels in terms of amplitude and phase are determined for the given maximum errors in the estimation of angular coordinates.

В [1, 2] предложены одно- и двухэтапные квазиоптимальные алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой. Алгоритмы основаны на операциях пространственной компенсации помех в каждом периоде повторения, оценивании доплеровского сдвига частоты мешающих отражений, их когерентной компенсации, обеления результатов обработки во временной области, оценивании средней мощности и коэффициента междупериодной корреляции отраженного сигнала с последующим построением и максимизацией логарифма функции отношения правдоподобия (ФОР). При синтезе алгоритмов обработки диаграммы направленности (ДН) приемных каналов полагались известными, а комплексные коэффициенты усиления приемных трактов – идентичными. На практике ни первое, ни второе условие в полном объеме не выполняются: форма ДН антенн приемных каналов известна лишь приближенно, а приемные каналы подвержены деградации – выходу из строя отдельных приемных каналов или изменению модуля или фазы коэффициента передачи в сравнении с модельным значением. Для практического применения разработанных алгоритмов требуется оценка влияния деградации приемных каналов на точность определения угловых координат цели и определение требований к точности калибровки приемных каналов. Исследование указанных вопросов и составляло цель настоящей работы.

Для проведения исследований использовалась имитационная математическая модель многоканальной приемной системы при непосредственном воспроизведении алгоритмов оценивания угловых координат цели в условиях деградации приемных каналов. Рассматривался измеритель угловой координаты в составе обзорной импульсной РЛС с механическим вращением антенной системы. Моделируемая антенная система включала основную приемопередающую антенну прямоугольной формы размерами $15 \times 2,5$ длин волн и четыре компенсационные антенны размерами $1 \times 2,5$ длин волн, попарно пристыкованных справа и слева к основной апертуре. Амплитудное распределение поля на апертурах принималось равномерным, число импульсов в пачке около 100. Во всех случаях на РЛС по главному и боковым лепесткам ДН основного канала воздействовали внешние источники помех при отношении помеха/шум 30...40 дБ.

Рассматривались два варианта деградации: предельный случай выхода из строя отдельных приемных трактов, когда их коэффициенты усиления по мощности изменялись на 10...20 дБ и (или) фаза на $\pi/2$ и более; наличие ошибок нормированных коэффициентов усиления приемных каналов по амплитуде в виде центрированной нормально распределенной случайной величины со среднеквадратическим отклонением до 0,3 и нормально распределенных фазовых ошибок со среднеквадратическим значением до 30° .

Вектор искаженных ДН приемных каналов направления α можно представить в виде

$$\mathbf{s}_{\text{иск}}(\alpha) = \mathbf{K}\mathbf{s}(\alpha), \quad (1)$$

где

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \dot{K}_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{K}_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dot{K}_{N-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

- диагональная матрица, составленная из нормированных (например, к первому каналу), комплексных коэффициентов передачи приемных трактов; $\mathbf{s}(\alpha) = (\dot{F}_0(\alpha), \dot{F}_1(\alpha), \dots, \dot{F}_{N-1}(\alpha))$ - вектор, составленный из эталонных (используемых в алгоритме обработки) ДН приемных каналов.

Влияние выходе из строя приемных каналов проиллюстрируем для случая, когда

$\dot{K}_1 = 0, 1e^{\frac{\pi}{2}j}$, $\dot{K}_0 = \dot{K}_2 = \dot{K}_3 = \dot{K}_4 = 1$, то есть вышел из строя первый компенсационных канал. Для этого случая для одной из реализаций на рис. 1. показана функция отношения правдоподобия при реализации одноэтапного алгоритма компенсации помех и оценивания угловых координат [2]. Отношение сигнал/шум по Положение цели и единственной помехи показано на рис. 1. стрелочками, там же приведена ширина $\Delta\alpha_{0,5}$ главного лепестка ДН основного канала.

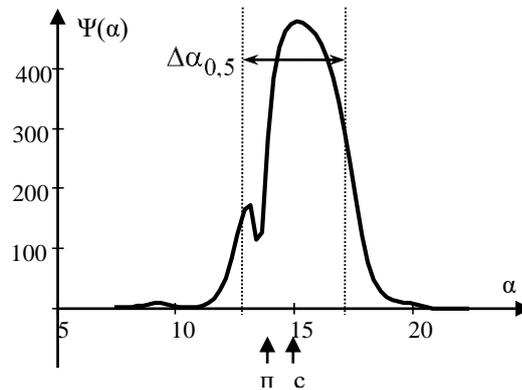


Рис. 1. ФОП для одной из реализаций при деградации характеристик первого компенсационного канала

Как видно из рис. 1., несмотря на фактический выход из строя первого компенсационного канала, максимум ФОП сформирован в правильном направлении, то есть алгоритм сохранил свою работоспособность.

Для уяснения причин этого явления проанализируем форму ДН $|\dot{F}_a(\alpha)|$ адаптированного приемного канала для различных положений угла α_{ai} ориентации приемной системы. Соответствующие зависимости приведены на рис. 2. Там же указано угловое положение антенны и границы главного лепестка ДН основного канала.

Как следует из рис. 2.а, при близком расположении максимума главного лепестка основного приемного канала и помехи, реализуемая ДН (сплошная кривая) заметно отличается от модельной (пунктирная кривая), рассчитанной для эталонных значений коэффициента усиления приемных каналов. При увеличении отклонения максимума главного лепестка основного приемного канала от помехи (рис.2.б) различия между реализуемой и модельной ДН уменьшаются и на рис. 2.с они пренебрежимо малы. Одновременно увеличиваются и модуль адаптированной ДН в направлении на полезный сигнал. Так как модельные значения ДН далее используются в алгоритме максимального правдоподобия для формирования опорного сигнала [2], можно утверждать, что на части интервала наблюдения отсчеты адаптированной и нормированной принимаемой реализации \mathbf{z} будут резко отличаться от ожидаемого сигнала, накапливаться некогерентно и с малым весом. Отсчеты полезного сигнала, полученные для угловых положений, когда модельная и реализуемая ДН близки, будут иметь большую амплитуду, весовой коэффициент и накапливаться когерентно. Таким образом, влияние

выхода из строя первого компенсационного канала на результирующую форму и положение максимума ФОР будет относительно слабым.

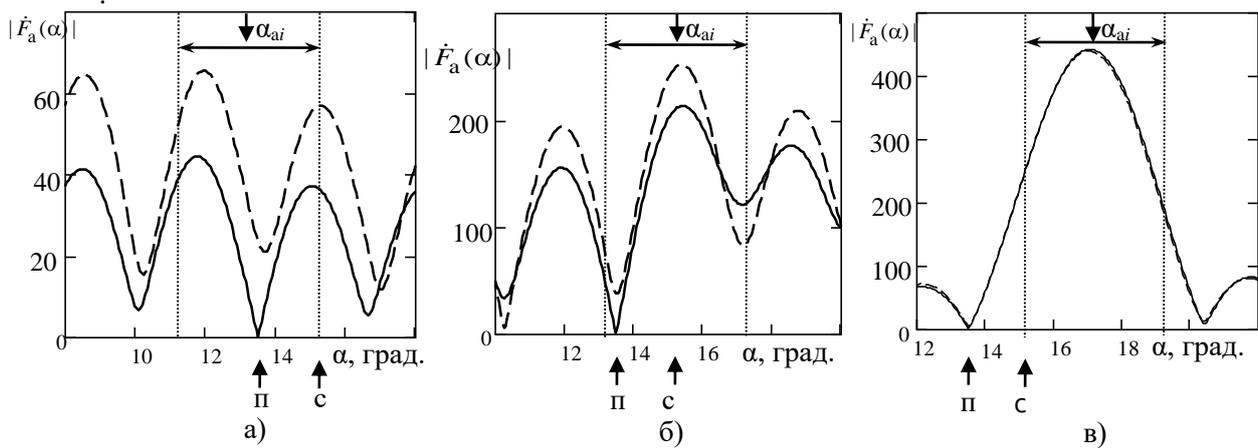


Рис. 2. Форма модуля ДН адаптированного приемного канала для различных положений антенной системы

Так как при деградации характеристик приемных каналов часть отсчетов принимаемого сигнала будет учитываться с нулевым весом, значение максимума ФОР будет уменьшаться. Степень снижения максимума ФОР будет зависеть от разности угловых положений полезного сигнала и помехи и степени деградации приемных каналов, то есть от числа приемных каналов с отличными характеристиками и степени различий этих характеристик.

Для определения степени искажения адаптированных реальной и модельной ДН необходим соответствующий показатель. Используем коэффициент различия формы реальной $\omega_i^+ s_{иск}(\alpha)$ и модельной $\omega_i^+ s(\alpha)$ адаптированных ДН, ранее предложенный в [3], и определяемый в данном случае для всех i -х возможных положений антенной системы в пределах длительности радиолокационного контакта с целью:

$$\gamma_i = \frac{\int_{\alpha_{ai} - \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}}^{\alpha_{ai} + \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}} |\omega_i^+ s_{иск}(\alpha) - \omega_i^+ s(\alpha)| d\alpha}{\int_{\alpha_{ai} - \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}}^{\alpha_{ai} + \frac{\Delta\alpha_{0,5}}{2}} |\omega_i^+ s(\alpha)| d\alpha}^{-1}, \quad (3)$$

где ω_i - векторы весовых коэффициентов приемных каналов [1, 2].

Иллюстрация расчета коэффициентов γ_i как нормированной площади (серая штриховка) фигуры, ограниченной модельной и реальной адаптированными ДН приведена на рис. 3. При отсутствии искажений $\gamma_i = 0$.

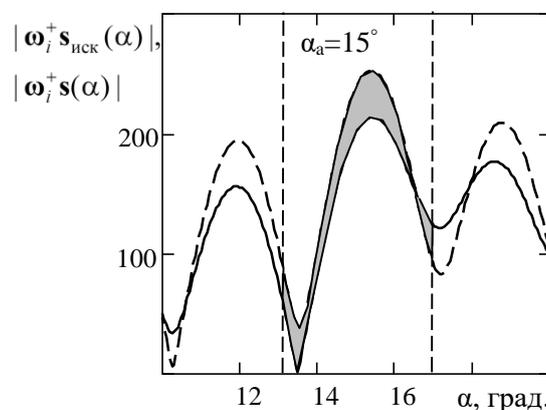


Рис. 3. К расчету коэффициента искажений ДН

Зависимость коэффициента различия реальной и модельной ДН от углового положения α_{ai} антенной системы для различной степени деградации приемных каналов приведена на рис. 4. (а, б, с – выход из строя одного, двух и трех компенсационных каналов).

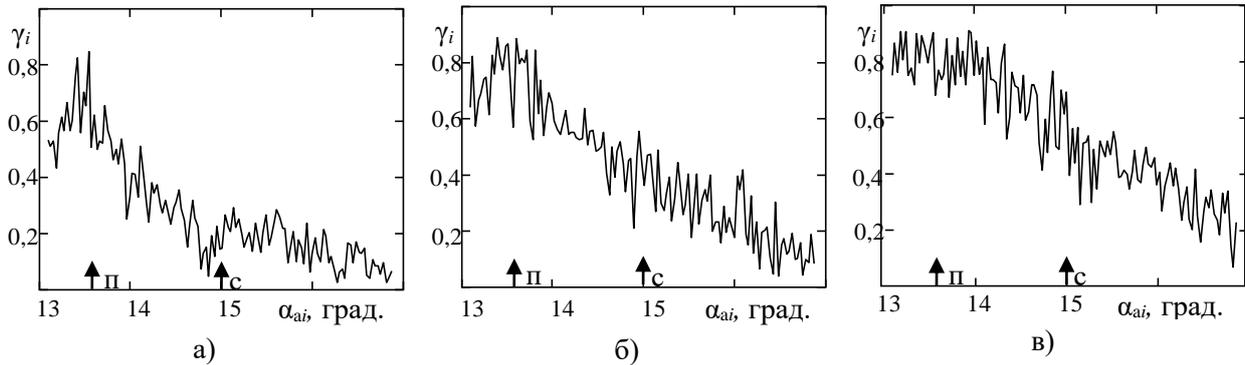


Рис. 4. Зависимость коэффициента различия формы реальной и модельной адаптированной ДН от углового положения антенной системы при различной степени деградации приемных трактов компенсационных каналов

Видно, что на некоторой части углов α_{ai} коэффициент различия не будет превышать 0,2. Поэтому алгоритм максимального правдоподобия учитывает полученные при этих углах отсчеты принимаемой реализации с большим весом и эффективно использует для оценивания угла. Об этом же свидетельствуют и средние значения ФОП, приведенные в табл. 1 для различных значений числа пораженных каналов. Значения получены по 100 моделируемым реализациям.

Таблица 1. Значения нормированного математического ожидания максимума ФОП и нормированной к ширине главного лепестка основного канала средней квадратической ошибки оценивания угловых координат для различных параметров деградации компенсационных каналов

Параметры деградации приемных каналов	$\bar{\Psi} / \max(\bar{\Psi})$	$\sigma_{\alpha} / \Delta\alpha_{0,5}$
Нет различий	1	0,027
$\dot{K}_1 = 0,1e^{90^\circ j}$	0,6	0,027
$\dot{K}_1 = \dot{K}_2 = 0,1e^{90^\circ j}$	0,37	0,028
$\dot{K}_1 = \dot{K}_2 = \dot{K}_3 = 0,1e^{90^\circ j}$	0,19	0,029

При увеличении числа вышедших из строя приемных компенсационных каналов наблюдается монотонное снижение максимума ФОП и тенденция к увеличению средней квадратической ошибки оценивания угловых координат. Весьма примечательным является то обстоятельство, что при выходе из строя всех приемных каналов $\dot{K}_1 = \dot{K}_2 = \dot{K}_3 = \dot{K}_4 = 0,1e^{90^\circ j}$ система оказывается неработоспособной, но если хотя бы для одного приемного канала характеристики сохранены, возможность измерения угла, по крайней мере, в рассматриваемой помеховой ситуации при наличии одного источника помех, остается.

В рассмотренном случае значительной деградации подвергались компенсационные каналы. Далее рассмотрим случай, когда коэффициент усиления основного канала изменился в сравнении с эталонным значением и составил $\dot{K}_0 = 0,8$ (–2 дБ) или $\dot{K}_0 = 1,2$ (+1,6 дБ), а коэффициенты усиления компенсационных каналов – эталонные $\dot{K}_1 = \dot{K}_2 = \dot{K}_3 = \dot{K}_4 = 1$. Для этого случая на рис. 5. приведена зависимость коэффициента различия формы реальной и модельной адаптированной ДН от углового положения антенной системы. Как следует из рис. 5., коэффициент различия не превышает 0,19 при среднем значении около 0,12. Нормированное значение СКО оценивания азимута составило 0,06 и 0,04 при нормированном среднем значении максимума ФОП 0,86 и 0,91 (по 500 реализациям).

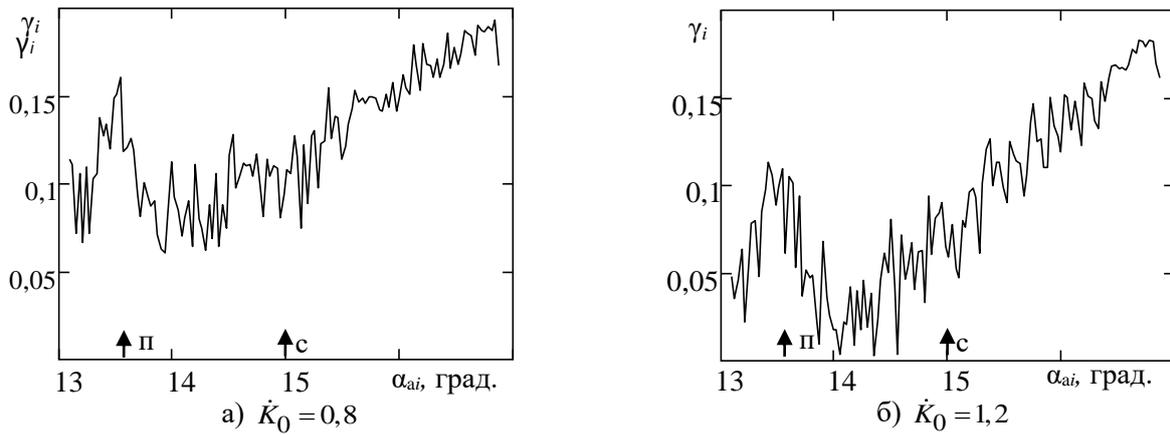


Рис. 5. Зависимость коэффициента различия формы реальной и модельной адаптированной ДН от углового положения антенной системы при частичной деградации приемного тракта основного канала

Для второго случая малых ошибок комплексные коэффициенты усиления приемных каналов при проведении моделирования полагались равными

$$\dot{K}_n = (1 + \xi_{An}) e^{j\xi_{\varphi n}}, \quad (4)$$

где ξ_{An} , $\xi_{\varphi n}$ - независимые центрированные нормально распределенные случайные величины со средними квадратическими отклонениями σ_A, σ_φ , причем $\sigma_A < 0,3$.

В результате проведенного математического моделирования установлено, что для наиболее сложной помеховой ситуации при наличии трех источников внешних помех при средней квадратической ошибке приемных каналов по амплитуде в 30% от номинального значения и средней квадратической ошибке по фазе 30° дисперсия ошибки оценивания угловых координат цели увеличивается не более чем в 3 раза в сравнении со случаем идентичных приемных трактов. Ошибки измерения не превышают 10% от ширины главного лепестка ДН основного канала.

Таким образом, в измерителе угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой за счет использования алгоритма максимального правдоподобия происходит частичное устранение влияния деградации характеристик приемных каналов. Влияние имеющих место на практике ошибок калибровки на результат измерения угловых координат окажется относительно небольшим.

Список использованных источников

1. Козлов, С. В. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4(122). – С. 48–56.
2. Козлов, С. В. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 1–29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10.
3. Карпухин, В. И. Пространственная компенсация помех в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры / В. И. Карпухин, С. В. Козлов, В. И. Сергеев // Антенны. – 2012. – №5. – С. 18–28.