

АДАПТИВНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛИ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ С МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМОЙ

Ле Ван Кыонг

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

Козлов С.В. – д.т.н., доцент

Приведены модификации алгоритмов оценивания азимута и угла места цели в радиолокационном измерителе на базе многоканальной антенной системы, предусматривающие вычисление значений функции правдоподобия (ФП) в узлах азимутально-угломестной сетки в пределах главного лепестка (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) антенны передающего канала, поиск максимума, построение матрицы вторых производных в окрестности максимума по девяти значениям ФП в узлах сетки и оценку угловых координат (УК) цели по отраженному сигналу (ОС). Показано, что оценки УК подчиняются закону Стюдента с двумя степенями свободы и получены аппроксимирующие соотношения, связывающие параметр крутизны распределения с размером ячейки сетки по угловым координатам, числом отсчетов при формировании выборочной корреляционной матрицы (КМ) процессов на выходах приемных каналов и нижней границей Рао-Крамера для дисперсии измерения УК.

В работах [1, 2] приведены алгоритмы обработки сигналов для измерителя обзорной радиолокационной станции при сканирующей антенной системе, пачки зондирующих и флуктуирующего ОС. Применительно к несканирующей антенной системе алгоритмы [1, 2] могут быть использованы при очевидных модификациях. Однако для всех рассмотренных алгоритмов при двумерном пеленговании требуется измерение и запоминание производных от ДН приемных каналов либо реализация процедуры поиска максимума ФП градиентным или прямым методом, что оказывается весьма затратным в вычислительном плане. Очевидным путем сокращения вычислительных затрат является поиск решения при использовании сеточной аппроксимации ФП, что предполагает обоснование параметров такой аппроксимации и исследование статистических характеристик получаемых оценок угловых координат.

Целью настоящей работы является обоснование путей алгоритмической реализации и исследование свойств оценки угловых координат ОС в радиолокационном измерителе на базе несканирующей многоканальной приемной системы.

Рассматривается измеритель УК (азимута и угла места) в составе импульсной радиолокационной станции обнаружения-сопровождения воздушных объектов с $n = \overline{1, N}$ канальной несканирующей в пределах длительности наблюдения ОС антенной системой. Пачка зондирующих сигналов (ЗС) включает $i = \overline{1, I}$ импульсов, при $I = 1 \dots 7$. Интервал τ_c корреляции флуктуаций ОС $\tau_c \gg T_r I$, где T_r – период повторения импульсов ЗС, поэтому ОС можно считать нефлуктуирующим. Векторы сигналов $\mathbf{y}_{i,q}$ на входе измерителя представляют собой отчеты комплексных значений принимаемой реализации (на выходе согласованного фильтра для одиночного сигнала) в $q = \overline{1, Q}$ элементах разрешения, один из которых, с номером q_c , является сигнальным, а остальные используются для оценивания корреляционных матриц (КМ) суммы внутренних шумов и внешних помех в каждом периоде повторения

$\hat{\Phi}_i = \frac{1}{Q-1} \sum_{q \neq q_c} \mathbf{y}_{i,q} \mathbf{y}_{i,q}^+$. Используя [1, 2] для функции правдоподобия $\Psi(\alpha, \beta)$ получим

$$\Psi(\alpha, \beta) = \left(\sum_{i=1}^I \hat{P}_{n+\omega_i}(\alpha, \beta) \right)^{-1} \left| \sum_{i=1}^I \boldsymbol{\omega}_i^+(\alpha, \beta) \mathbf{y}_{i,q_c} \right|^2, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\omega}_i(\alpha, \beta) = \hat{\Phi}_i \mathbf{f}(\alpha, \beta)$ – оптимальный (по критерию максимума отношения сигнал/помеха+шум) вектор весовых коэффициентов приемных каналов; $\hat{P}_{n+\omega_i}(\alpha, \beta) = \boldsymbol{\omega}_i^+(\alpha, \beta) \hat{\Phi}_i \boldsymbol{\omega}_i(\alpha, \beta) = \mathbf{f}^+(\alpha, \beta) \hat{\Phi}_i^{-1} \mathbf{f}(\alpha, \beta)$ – оценка мощности остатков внешних помех и взвешенных внутренних шумов при приеме ОС с углового направления (α, β) ; $\mathbf{f}(\alpha, \beta)$ – вектор значений ДН приемных каналов в направлении (α, β) . Получение максимально-правдоподобной оценки:

$$\hat{\alpha}, \hat{\beta} = \underset{\alpha, \beta}{\operatorname{argmax}} \Psi(\alpha, \beta) \quad (2)$$

предполагает поиск экстремума функции двух переменных и является достаточно сложным в вычислительном плане.

Вычислим значения $\Psi_{k,m} = \Psi(\alpha_k, \beta_m)$ ФП в узлах сетки и найдем максимальное значение $\Psi_{\max} = \max \Psi_{k,m}$ и его индексы $k_m, m_m = \operatorname{argmax}_{k,m} \Psi_{k,m}$, которые дают грубую оценку угловых координат ОС в

виде $\hat{\alpha} = \alpha_{k_m}$; $\hat{\beta} = \beta_{m_m}$. Для способа наименьших квадратов (НМК) аппроксимируем ФП в окрестности максимума параболоидом $\psi_{ан}(\alpha, \beta, \mathbf{y}) = (\alpha^2, \beta^2, \alpha\beta, \alpha, \beta, 1)\mathbf{y}$, где вектор $\mathbf{y} = (a, b, c, d, e, g)^T$ коэффициентов является решением системы линейных уравнений:

$$\sum_{i_1=-1}^1 \sum_{i_2=-1}^1 (\psi_{k_m+i_1, m_m+i_2} - \psi_{ан}(\alpha_{k_m+i_1}, \beta_{m_m+i_2})) \frac{\partial}{\partial \gamma_\ell} \psi_{ан}(\alpha_{k_m+i_1}, \beta_{m_m+i_2}, \mathbf{y}) = 0; \ell = \overline{1, 6}, \text{ что приводит к оценке вида}$$

$$\hat{\alpha}_c^{МНК} = \frac{2bd - ce}{c^2 - 4ab}; \hat{\beta}_c^{МНК} = \frac{2ae - cd}{c^2 - 4ab}. \quad (3)$$

Для способа на основе матрицы вторых производных (МВП) вычислим вектор первых и матрицу вторых производных в численном виде:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}; F_1 = \frac{\Psi_{k_m+1, m_m} - \Psi_{k_m-1, m_m}}{2\Delta\alpha}; F_2 = \frac{\Psi_{k_m, m_m+1} - \Psi_{k_m, m_m-1}}{2\Delta\beta}; \mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix};$$

$$F_{11} = \frac{\Psi_{k_m+1, m_m} - 2\Psi_{k_m, m_m} + \Psi_{k_m-1, m_m}}{\Delta\alpha^2}; F_{22} = \frac{\Psi_{k_m, m_m+1} - 2\Psi_{k_m, m_m} + \Psi_{k_m, m_m-1}}{\Delta\beta^2}; F_{12(21)} = \frac{\Psi_{k_m+1, m_m+1} - \Psi_{k_m-1, m_m+1} - \Psi_{k_m+1, m_m-1} + \Psi_{k_m-1, m_m-1}}{4\Delta\alpha\Delta\beta},$$

что приводит к оценке вида $\begin{pmatrix} \hat{\alpha}_c^H \\ \hat{\beta}_c^H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{k_m} \\ \beta_{m_m} \end{pmatrix} - \mathbf{F}^{-1}\mathbf{f}. \quad (4)$

Алгоритмы (3) и (4), реализуемые на основе (1) исследовались для случая измерителя на базе прямоугольной антенной решетки из 16 ненаправленных элементов (размер 4x4) с расстоянием между элементами в половину длины волны ($\Delta\alpha_{0,5} = \Delta\beta_{0,5} \approx 25^\circ$).

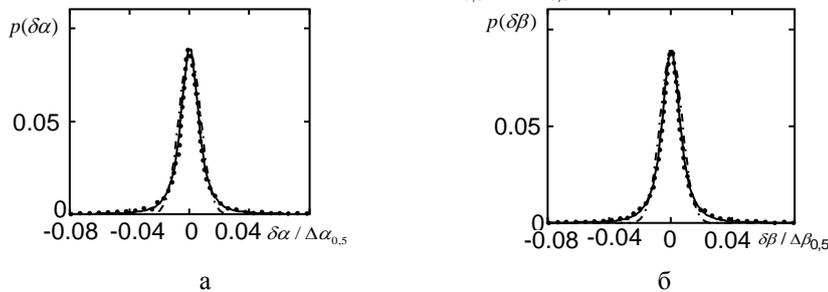


Рисунок 1 – Выборочные (круглые точки) и теоретические (сплошные кривые – Стьюдента, штрих-пунктирные – гауссовы) плотности вероятности ошибок оценки азимута (а) и угла места (б)

Показано, что выборочная плотность вероятности оценок УК с высокой точностью совпадает с распределением Стьюдента с двумя степенями свободы (рисунок 1). Оценки являются несмещенными. Параметр ξ распределения Стьюдента обратно пропорционален среднеквадратическому отклонению ошибки в соответствии с границей Рао-Крамера с коэффициентом γ_ξ , определяемым размером ячейки сетки и числом отсчетов при формировании выборочной КМ. Точность оценивания угловых координат практически не зависит от числа отсчетов при $Q \geq 10N$. При уменьшении числа отсчетов точность уменьшается.

Если помеха воздействует из области наблюдения, то при больших размерах ячейки сетки выборочные плотности вероятности могут деформироваться в сравнении с распределением Стьюдента ввиду неверного определения (пропуска истинного) максимума ФП. Уменьшение размера ячейки сетки приводит к восстановлению единственного экстремума при нулевом смещении оценки. Если в пределах области наблюдения источники помех отсутствуют, то размер ячейки сетки может составлять $\Delta\alpha(\beta) = (0, 2 \dots 0, 25)\Delta\alpha(\beta)_{0,5}$ при общем числе узлов сетки 20...25. Если в область наблюдения попадает хотя бы один источник помех, то число узлов сетки 250...400. При близком положении источника помех и цели коэффициент $r_{\alpha\beta}$ корреляции ошибок оценок по азимуту и углу места составляет 0,7...0,9, то есть ошибки сильно коррелированы. Удаление источника помеха от ОС приводит к уменьшению коэффициента корреляции ошибок. При $\alpha(\beta)_n / \Delta\alpha(\beta)_{0,5} \geq 1$ оценки независимы.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать параметры реализации адаптивных алгоритмов функционирования радиолокационных измерителей угловых координат цели на базе многоканальных приемных систем. Установленный факт распределения ошибок оценивания угловых координат по закону Стьюдента с двумя степенями свободы необходимо учитывать при интерпретации результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований измерителей угловых координат и при обосновании алгоритмов углового стробирования результатов измерений на этапе сопровождения цели.

Список использованных источников:

1. Козлов, С. В. Оценивание угловых координат в радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / С. В. Козлов, Т. Х. Ву // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4. – С. 48 – 56.