

УДК 621.396.1

А.В. Статкус¹, Ф.М. Андреев²¹ Национальный технический университет «ХПИ», Харьков² Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков

СОВМЕСТНОЕ МИНИМАКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТРЕХ ПЕРВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ДАЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ РЛС

Разработан эффективный в вычислительном отношении алгоритм совместной оценки радиальной скорости, ускорения и третьей производной дальности из состава системы когерентной обработки РЛС. С помощью имитационного моделирования показано, что алгоритм обеспечивает минимум максимального значения среднеквадратической ошибки в случае дискретной расстановки каналов в пределах трехмерной области анализа.

Ключевые слова: радиолокационная станция надгоризонтного обнаружения, система когерентной обработки пачки импульсов, производные дальности, дискретная расстановка каналов, среднеквадратическая ошибка, минимаксное оценивание.

Введение

Одним из путей повышения информационных возможностей РЛС надгоризонтного обнаружения (НГО) баллистических и космических объектов (БКО) является расширение вектора текущих оценок параметров движения цели за счет высших производных дальности с последующим сглаживанием его в ходе вторичной обработки. Он реализован, например, в РЛС НГО БКО типа 5Н86-М (РФ, Украина) и типа AN/FPS-85 (США) [1 – 3]. Для этого используются зондирующие сигналы в виде когерентной пачки импульсов, обеспечивающие высокоточное измерение первой $R^{(1)}$ и второй $R^{(2)}$ производных дальности. Измерение третьей производной дальности $R^{(3)}$ не только повышает точность определения параметров траекторий баллистических и орбит космических объектов, но и обеспечивает оперативную классификацию траекторий целей и эффективное управление энергетическими ресурсами РЛС [4]. Поскольку в таких РЛС дальность до объекта оценивается по данным отдельного измерителя, то на момент применения системы когерентной обработки пачечных сигналов (СКОПС) рассогласование по дальности устранено. Поэтому для оценки трехмерного вектора $\vec{R}_{\text{АКО-3}} = (R^{(1)}, R^{(2)}, R^{(3)})^T$ по результатам когерентных фазовых измерений отсчетов пачечного сигнала необходимо иметь многоканальную систему по каждому из трех параметров. Она должна обеспечивать формирование логарифма апостериорного распределения вероятности (ЛАРВ) в пределах области анализа. Это эквивалентно алгоритму когерентной обработки (АКО), состоящему в совместной оценке $\vec{R}_{\text{АКО-3}}$ на основе расчета корреляционного интеграла в точках, соответствующих гипотезам относи-

тельно вектора $\vec{R}_{\text{АКО-3}}$ значений радиальных параметров движения БКО

$$H_{ijk} : \vec{R}_{\text{АКО}} = (R_i^{(1)}, R_j^{(2)}, R_k^{(3)})^T = [R_{\text{АКО}}]_{ijk},$$

где i, j, k – номера гипотез по первой, второй и третьей производным дальности, соответственно, в пределах области априорного существования вектора оцениваемых радиальных параметров (области анализа), взятых с шагом $\delta R^{(n)} = n! \cdot \lambda / (2T_H^n)$, $n = 1, 2, 3$, равным разрешающей способности $\delta R^{(n)}$ по n -й производной дальности. По дискретной реализации ЛАРВ определяется аргумент его максимума, представляющий собой оценку максимального правдоподобия (ОМП) радиальных параметров движения БКО с точностью до шага гипотезы по оцениваемым параметрам.

Нерешенная часть проблемы. В случае измерения трех производных дальности при указанном шаге гипотез общее их число составляет $n_{\Sigma 3} \sim (N-1)^3$ [5]. Поэтому возникает, во-первых, задача построения алгоритма когерентной обработки (АКО), предпочтительного по критерию минимума числа операций. Во-вторых, наличие дискретизации в аргументе ЛАРВ вызывает дополнительные ошибки измерения, пропорциональные шагу гипотезы $\delta R^{(n)}$ по параметру $R^{(n)}$. При этом возникает задача уточнения ОМП в пределах главного лепестка ЛАРВ для уменьшения ошибок дискретности.

Цель статьи: разработка алгоритма совместной оценки трех первых производных дальности для системы когерентной обработки РЛС НГО, предпочтительного по критериям минимума вычислительных затрат и минимаксных среднеквадратических ошибок.

Оставшаяся часть статьи организована по следующему плану. В разделе 1 формулируется постановка задачи. Раздел 2 содержит общие принципы построения корреляционного алгоритма совместной оценки параметров движения цели (АКО). В разделе 3 приводятся варианты построения АКО, актуальные с точки зрения решаемой задачи. В разделах 4 и 5 излагаются результаты сравнения этих вариантов АКО методом имитационного моделирования. В разделе 6 проводится обсуждение полученных результатов. В заключение статьи формулируются некоторые выводы.

1. Постановка задачи

В настоящее время известны принципы построения АКО, обеспечивающего измерение только $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ [2, 6]. В статье решается актуальная для теории и практики информационно-измерительных систем, и, в частности, для дальней радиолокации задача построения эффективного в вычислительном плане АКО, обеспечивающего оценку трех производных дальности при минимизации максимальных среднеквадратических ошибок оцениваемых параметров в пределах трехмерной области анализа.

2. Принципы построения алгоритма совместной оценки параметров движения цели

Дискретный принцип формирования ЛАРВ обуславливает следующую оптимальную последовательность операций АКО независимо от числа оцениваемых производных дальности цели:

1. На первом этапе в узлах дискретной сетки гипотез

$$H_{ijk} : \bar{R}_{АКО-3} = (R_i^{(1)}, R_j^{(2)}, R_k^{(3)})^T = [\bar{R}_{АКО-3}]_{ijk},$$

охватывающих область анализа $\bar{A}_3 : i = \overline{0, I}; j = \overline{0, J};$

$k = \overline{0, K}$ в пространстве оцениваемых параметров, формируется ЛАРВ в виде модуля корреляционного интеграла (скалярного произведения) входного воздействия $y(t_n)$ и опорных функций $s_{ijk}(t_n)$, параметры которых соответствуют H_{ijk} :

$$|\Psi_{ijk}| = |(y(t_n), s_{ijk}(t_n))|. \quad (1)$$

2. На втором этапе определяется ОМП параметров сигнала как аргумент максимума ЛАРВ в пределах области анализа

$$[\bar{R}_{АКО}]_{ОМП} = \arg \max_{H_{ijk}} |\Psi| \quad (2)$$

с точностью до шага гипотез по оцениваемым параметрам.

3. На третьем этапе выполняется уточнение ОМП в пределах главного лепестка ЛАРВ для уменьшения ошибки дискретности.

3. Характеристика вариантов построения АКО

Авторами установлено [5], что аналитическое приближение к оценке $\hat{R}^{(3)}$ в условиях РЛС НГО типа 5Н86 не является состоятельным. Поэтому оценка $\hat{R}^{(3)}$ должна формироваться путем полного перебора всех возможных значений этого параметра с шагом $\delta R^{(3)}$. Анализ путей решения задачи оценки $\bar{R}_{АКО-3}$ позволяет утверждать, что сформировать оценку $\bar{R}_{АКО-3}$ можно не единственным образом. Это связано с наличием нескольких вариантов организации первого и третьего из указанных выше этапов АКО.

Относительно организации первого этапа возможны следующие варианты:

Вариант 1-1. Полный перебор гипотез $\{H_{ijk}\}$ в пределах области A_3 путем расчета $|\Psi(H_{ijk})|$. Определяется глобальный максимум $|\Psi(H_{ijk})|$.

Вариант 1-2. Полный перебор гипотез $\{H_{ijk}\}$ в пределах области A_3 с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для каждой гипотезы $(R_j^{(2)}, R_k^{(3)})$ устраняется доплеровская нестационарность, то есть формируется разностная последовательность фазовых отсчетов входного воздействия и опорной функции для выбранной гипотезы. Затем выполняется БПФ сигнала, реальная и мнимая составляющие которого соответствуют этой разностной последовательности. Так формируются сечения $|\Psi(H_{ijk})|$ плоскостью $(R_j^{(2)}, R_k^{(3)}) = \text{const}$ для всей совокупности гипотез. Определяется глобальный максимум $|\Psi(H_{ijk})|$.

Вариант 1-3. Установлено, что при $N \leq 16$ для СКОПС РЛС НГО типа 5Н86 фазовое рассогласование на концах сигнала за счет неучтенной $\hat{R}_{\max}^{(3)}$ эквивалентно смещению по $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ менее половины шага гипотезы по этим аргументам. Поэтому сначала строятся аналитические приближения $(\hat{R}_{\text{ПР}}^{(1)}, \hat{R}_{\text{ПР}}^{(2)})$ к оценкам $\hat{R}^{(1)}$ и $\hat{R}^{(2)}$ этих параметров при $N = 16$ в предположении об отсутствии $R^{(3)}$, т.е. при $R^{(3)} = 0$:

$$\hat{R}_{\text{ПР}}^{(2)} = \frac{\lambda}{4\pi T_{\text{СЛ}}^2} \arctg \frac{\sum_{i=0}^{N-3} p_i \sin(\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i)}{\sum_{i=0}^{N-3} p_i \cos(\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i)}, \quad (3)$$

$$\hat{R}_{\text{ПП}}^{(1)} = \frac{\lambda}{4\pi T_{\text{СЛ}}} \times \arctg \frac{\sum_{i=0}^{N-2} p_i \text{Sin} \left[(\varphi_{i+1} - \varphi_i) + \frac{2\pi}{\lambda} \hat{R}_{\text{ПП}}^{(2)} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \right]}{\sum_{i=0}^{N-2} p_i \text{Cos} \left[(\varphi_{i+1} - \varphi_i) + \frac{2\pi}{\lambda} \hat{R}_{\text{ПП}}^{(2)} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \right]}$$

где $p_i = (i+1)(N-i-1)$.

Затем при $N = 32$ в окрестности $(\hat{R}_{\text{ПП}}^{(1)}, \hat{R}_{\text{ПП}}^{(2)})$ формируется «трубка» T_3 вдоль оси $OR^{(3)}$, которая гарантированно содержит истинное значение вектора радиальных параметров движения цели $\vec{R}_{\text{АКО-3}}$. Множество гипотез, принадлежащее T_3 , определяется выражением

$$\left\{ \pm \delta R_{32}^{(1)}; \pm M \delta R_{32}^{(2)}; \pm 2N \delta R_{32}^{(3)} \right\}, \quad (4)$$

$M =$

$$= \begin{cases} 1, & \text{при } |R_{32}^{(3)}| \in [0; (N/2) \delta R_{32}^{(3)}], \\ 2, & \text{при } |R_{32}^{(3)}| \in [(N/2) \delta R_{32}^{(3)}; N \delta R_{32}^{(3)}], \\ 3, & \text{при } |R_{32}^{(3)}| \in [N \delta R_{32}^{(3)}; (3N/2) \delta R_{32}^{(3)}], \\ 4, & \text{при } |R_{32}^{(3)}| \in [(3N/2) \delta R_{32}^{(3)}; 2N \delta R_{32}^{(3)}], \end{cases} \quad (5)$$

где $\delta R_{32}^{(n)} = \delta R^{(n)}$ при $N = 32$.

Сечение трубки плоскостью $(R_{32}^{(3)}, R_{32}^{(2)})$ приведено на рис. 1.

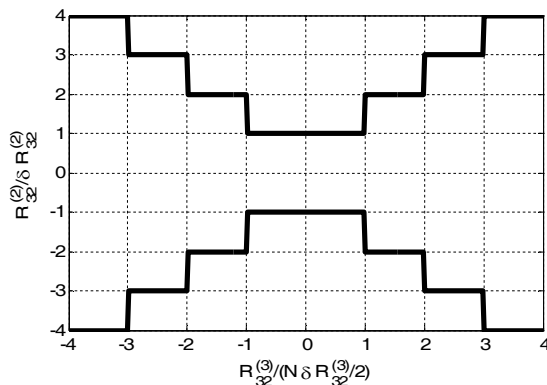


Рис. 1. Сечение трубки T_3 плоскостью $(R_{32}^{(3)}, R_{32}^{(2)})$

Для всех гипотез $H_{ijk} : [\vec{R}_{\text{АКО-3}}]_{ijk} \in T_3$ рассчитывается $|\Psi(H_{ijk})|$. Среди них определяется локальный максимум $|\Psi(H_{ijk})|$.

Вариант 1-4. Общее число гипотез по $R^{(3)}$ определяется как $2M_3 + 1$, где

$$M_3 = E \left[R_{\text{max}}^{(3)} / \delta R^{(3)} + 0,5 \right], \quad (6)$$

где $E(x)$ – наибольшее целое число, не превышающее x . Размер пьедестала функции рассогласования пачки из N импульсов по оси $OR^{(3)}$ простирается до значения $R_{\text{max}}^{(3)} = 6(N-1)\lambda / T_{\text{H}}^3$ [4]. В случае РЛС НГО типа 5Н86 при $N = 32$, $\lambda \approx 1,9$ м, $T_{\text{СЛ}} = 40,96$ мс имеем $|R_{\text{max}}^{(3)}| = 172$ м/с³. Так как разрешающая способность по третьей производной дальности $\delta R^{(3)} = 3\lambda / T_{\text{H}}^3 \approx 2,78$ м/с³, получаем $M_3 = 62$. При каждом значении $R_k^{(3)}$, $k = \overline{-M_3, M_3}$, в соответствии с (3) рассчитываются аналитические приближения

$$\bar{R}_k^{(2)} = \bar{R}_{\text{ПП}}^{(2)}(R_k^{(3)}), \quad \bar{R}_k^{(1)} = \bar{R}_{\text{ПП}}^{(1)}(\bar{R}_k^{(2)}, R_k^{(3)}). \quad (7)$$

Вычисляется модуль корреляционного интеграла во всех точках $(\bar{R}_k^{(1)}, \bar{R}_k^{(2)}, R_k^{(3)})$, то есть $\{ |\Psi_k|, k = \overline{-M_3, M_3} \}$, и определяется

$$k_0 = \arg \max_k |\Psi_k|. \quad (8)$$

В окрестности точки $(\bar{R}_{k_0}^{(1)}, \bar{R}_{k_0}^{(2)}, R_{k_0}^{(3)}) \in A_3$ путем расчета $|\Psi|$ в $3^3 = 27$ узлах решетки гипотез (при трех ближайших к $(\bar{R}_{k_0}^{(1)}, \bar{R}_{k_0}^{(2)}, R_{k_0}^{(3)}) \in A_3$ значениях каждого параметра) формируется фрагмент дискретного ЛАРВ. Определяется локальный максимум $|\Psi|$ в пределах этого фрагмента.

В отношении уточнения ОМП следует отметить следующее. Известно множество методов уточнения [7]: метод наименьших квадратов (МНК), интерполяционные, апостериорного математического ожидания (АМО). Несмотря на то, что оценка параметра методом АМО по определению обладает минимальным апостериорным рассеянием, в конкретной схеме измерительного эксперимента априори как правило невозможно определить наилучшую оценку. В этих условиях единственным способом определения предпочтительного метода оценивания является эксперимент.

Применительно к организации третьего этапа рассматривались следующие варианты оценки $\vec{R}_{\text{АКО-3}}$:

Вариант 3-1. ОМП второго этапа с точностью до половины шага гипотезы по каждому оцениваемому параметру α из состава вектора $\vec{R}_{\text{АКО-3}}$:

$$\hat{\alpha}_{\text{ОМП}} = \arg \max_{\alpha_i} |\Psi(\alpha)|, \quad (9)$$

что соответствует случаю отсутствия уточнения.

Вариант 3-2. Оценки методом наименьших квадратов (ОМНК):

$$\begin{aligned} R_{\text{МНК}}^{(1)} &= R_{\text{УТ}}^{(1)} + E \left[\frac{1}{2} + \frac{2T_{\text{СЛ}}}{\lambda} \left(R_{\text{Тек}}^{(1)} - R_{\text{УТ}}^{(1)} \right) \right] \cdot \frac{\lambda}{2T_{\text{СЛ}}}, \\ R_{\text{МНК}}^{(2)} &= R_{\text{УТ}}^{(2)} + E \left[\frac{1}{2} + \frac{T_{\text{СЛ}}^2}{\lambda} \left(R_{\text{Тек}}^{(2)} - R_{\text{УТ}}^{(2)} \right) \right] \cdot \frac{\lambda}{T_{\text{СЛ}}^2}, \\ R_{\text{МНК}}^{(3)} &= R_{\text{УТ}}^{(3)}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } R_{\text{УТ}}^{(\tau)} = \left\{ E \left[\left(\frac{\hat{R}^{(n)}}{\delta R^{(n)}} \right) - \left(\frac{\Delta \varphi_{\text{УТ}}^{(n)} \cdot n \cdot !}{2\pi N^{(n)}} \right) \right] \right\} \cdot \delta R^{(n)},$$

$$\Delta \varphi_{\text{УТ}}^{(3)} = f_3 \left(N, T_{\text{СЛ}}, \{ \alpha_i \}_{i=0}^{N-1} \right),$$

$$\Delta \varphi_{\text{УТ}}^{(2)} = f_2 \left(N, T_{\text{СЛ}}, \{ \alpha_i \}_{i=0}^{N-1}; \Delta \varphi_{\text{УМ}}^{(3)} \right),$$

$$\Delta \varphi_{\text{УТ}}^{(1)} = f_1 \left(N, T_{\text{СЛ}}, \{ \alpha_i \}_{i=0}^{N-1}; \Delta \varphi_{\text{УМ}}^{(3)}, \Delta \varphi_{\text{УМ}}^{(2)} \right),$$

$$\alpha_i = \varphi'_i + 2\pi E \left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi'_i}{2\pi} \right);$$

$$\varphi'_i = \varphi_i - \varphi_{0i} \left(\hat{R}^{(1)}, \hat{R}^{(2)}, \hat{R}^{(3)} \right) - \varphi_0,$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \text{Sin} \left(\varphi_i - \varphi_{0i} \left(\hat{R}^{(1)}, \hat{R}^{(2)}, \hat{R}^{(3)} \right) \right)}{\sum_{i=0}^{N-1} \text{Cos} \left(\varphi_i - \varphi_{0i} \left(\hat{R}^{(1)}, \hat{R}^{(2)}, \hat{R}^{(3)} \right) \right)}.$$

Вариант 3-3. Оценки методом апостериорного математического ожидания (ОАМО) при разном числе $i = 2k + 1$ учитываемых отсчетов ЛАРВ в окрестности ОМП (13) в пределах главного лепестка отклика системы [7]:

$$\hat{\alpha}_{\text{АМО}} = \frac{\sum_{k=-(i-1)/2}^{(i-1)/2} y_k (\alpha_k - \hat{\alpha}_{\text{ОМП}})}{\sum_{k=-(i-1)/2}^{(i-1)/2} y_k}, \quad (11)$$

где $y_k = |\Psi(\alpha)|$ при

$$\alpha = \hat{\alpha}_{\text{ОМП}} + k \cdot \delta \alpha, \quad k = -(i-1)/2, (i-1)/2.$$

Вариант 3-4. Оценки методом 3^n -точечной параболической интерполяции (ОПИ) аргумента максимума отклика системы в n -мерной окрестности ОМП при $n = 3$, разработанные на основе обобщения одномерного ($n = 1$) прототипа [8]:

$$\hat{\alpha}_{\text{ОПИ}} = \hat{\alpha}_{\text{ОМП}} + 0,5\delta\alpha \cdot \bar{s}_\alpha, \quad (12)$$

где

$$\bar{s}_\alpha = \frac{\sum_{i,j=-1}^1 s(\alpha, \beta_i, \gamma_j) \bar{y}(\alpha, \beta_i, \gamma_j)}{\sum_{i,j=-1}^1 \bar{y}(\alpha, \beta_i, \gamma_j)};$$

$$\bar{y}(\alpha, \beta_i, \gamma_j) = (1/3) \sum_{m=-1}^1 y(\alpha_m, \beta_i, \gamma_j) \cdot s(\alpha, \beta_i, \gamma_j) =$$

$$= \frac{y(\alpha_{-1}, \beta_i, \gamma_j) - y(\alpha_1, \beta_i, \gamma_j)}{y(\alpha_{-1}, \beta_i, \gamma_j) - 2y(\alpha_0, \beta_i, \gamma_j) + y(\alpha_1, \beta_i, \gamma_j)};$$

$$y(\alpha_m, \beta_i, \gamma_j) = |\Psi(\alpha_m, \beta_i, \gamma_j)|,$$

$$\alpha = R^{(1)}, \quad \beta = R^{(2)}, \quad \gamma = R^{(3)}.$$

Сопоставительный анализ вариантов организации АКО проводился методом статистического имитационного моделирования процесса обработки когерентных фазовых отсчетов входного воздействия, структура которого соответствует моделям сигнала и шума, описанным в работе [9], где дано также описание имитационной модели.

4. Результаты сравнения вариантов организации первого этапа АКО

Приведем сначала результаты сравнения точностных характеристик ОМП на основе указанных вариантов организации первого этапа АКО. Установлено, что при наличии многокомпонентного сигнала, соответствующего сложной цели, состоятельность ОМП гарантируется только при полном переборе всех гипотез $H_{ijk} : \bar{R}_{\text{АКО-3}} = [\bar{R}_{\text{АКО-3}}]_{ijk \in A_3}$, то есть при вариантах 1-1 и 1-2. В условиях мирного космоса стандартным является случай одиночной цели. Поэтому далее рассматриваем только данный случай. Для него состоятельность ОМП обеспечивается всеми вариантами построения ЛАРВ. При этом различия доставляемых этими вариантами ОМП одноименных параметров оказываются незначительными, так как они находятся в пределах статистического шума $\delta \varepsilon_n = 0,056\delta R^{(n)}$, $n = 1, 2, 3$, что соответствует погрешности оценивания математического ожидания ошибок оценок параметров $R^{(n)}$ при доверительной вероятности 0,95, нормальном распределении оценок (свойственном высокому отношению сигнал-шум) и объеме испытательной выборки $m_0 = 300$. Это позволяет сделать вывод об одинаковой точности ОМП $\bar{R}_{\text{АКО-3}}$, доставляемых всеми вариантами организации первого этапа АКО.

При равенстве точностных характеристик предпочтительным из сопоставляемых вариантов является наиболее экономичный с точки зрения вычислительных затрат. В табл. 1 приведены результаты оценки затрат вычислительных ресурсов для сравниваемых вариантов организации первого этапа. Согласно табл. 1 по этому критерию предпочтительным является вариант 1-3. Поэтому далее на его основе будут приведены точностные характеристики вариантов уточнения ОМП, определяющие точность результирующих оценок $\bar{R}_{\text{АКО-3}}$.

5. Результаты сравнения точностных характеристик вариантов уточнения ОМП

Для детального учета дискретного характера процесса оценки моделирование проводилось при трех значениях абсолютной величины приведенной расстройки

Таблица 1

Оценка затрат вычислительных ресурсов различными вариантами первого этапа АКО в зависимости от числа импульсов в пачке N , операций умножения M , сложения A и типом соответствия затрат на их реализацию $M = 3A$ [10]

Номер варианта организации первого этапа, L	Число вычислительных операций $M_L(N)$	Экономия вычислительных операций относительно $M_1, m_L(N) = M_1/M_L$	
		произвольное N	$N = 32$
1 (полный перебор)	$0,75(600M+172A) N^4$	1,0	1
2 (полный перебор с БПФ)	$(600M+172A) N^3$	$0,75 N$	24
3 (локальный перебор в «трубке»)	$68(58M+12A) N^2$	$0,117 N^2$	120
4 (локальный перебор по $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ и полный по $R^{(3)}$)	$62(100M+25A) N^2$	$0,073 N^2$	75

$$\Delta_{0n} = \left| R_0^{(n)} - R_{\text{БЛИЖ}}^{(n)} \right| / \delta R^{(n)} \in [0; 0,5], n = 1, 2, 3$$

истинного значения оцениваемого параметра $R_0^{(n)}$ относительно ближайшего значения аргумента дискретного ЛАРВ $R_{\text{БЛИЖ}}^{(n)}$, формируемого АКО, а именно: минимального, промежуточного, максимального ($\Delta_{0n} = 0; 0,25; 0,5$). На основе статистического усреднения ошибок испытательных выборок оценок радиальных параметров объема m_0 выборочные СКО каждой исследуемой оценки параметра $R^{(n)}$ из состава вектора $\bar{R}_{\text{АКО-3}}$ рассчитывались в соответствии с выражением

$$\sigma_n = \bar{\sigma}(R^{(n)}) = \left[\frac{1}{m_0 - 1} \sum_{m=1}^{m_0} (R_0^{(n)} - \bar{R}_m^{(n)})^2 \right]^{1/2},$$

где $n = 1, 2, 3$; $\bar{R}_m^{(n)}$ – m -я реализация оценки СКОПС параметра $R^{(n)}$. В ходе эксперимента определялись СКО каждой исследуемой оценки при каждой комбинации СКО фазового шума $\sigma_{\phi i}$ и Δ_{0n} для каждого из сопоставляемых вариантов АКО при $N = 32$. Результаты моделирования представлены на

рис. 2, а, б, в соответственно в виде приведенных к шагу гипотезы $\delta R^{(n)}$ СКО оценки $R^{(n)}$, $n = 1, 2, 3$ при максимальной расстройке $\Delta_{0n} = 0,5$ сопоставляемыми методами уточнения ОМП в зависимости от СКО фазового шума.

6. Обсуждение результатов

Анализ результатов моделирования позволяет сделать такие выводы:

1. На кривых $\sigma(R^{(n)}) / \delta R^{(n)} = f(\sigma_{\phi i})$ при $\Delta_{0n} = \text{const}$ независимо от метода оценивания выделяются две характерные области, интерпретируемые как область нормальных и область аномальных измерений. В области нормальных измерений, соответствующей интервалу аргумента $\sigma_{\phi i} \in [0; 0,6]$ рад, для СКО оценок выполняется условие $\sigma(R^{(n)}) / \delta R^{(n)} \leq 0,5$. Это в целом согласуется с теорией, поскольку дисперсия фазового шума связана с отношением сигнал-шум (ОСШ) q^2 в канале выражением $\sigma_{\phi i}^2 = 1/q^2$, что дает $q^2 \geq 3$ для области нормальных измерений.

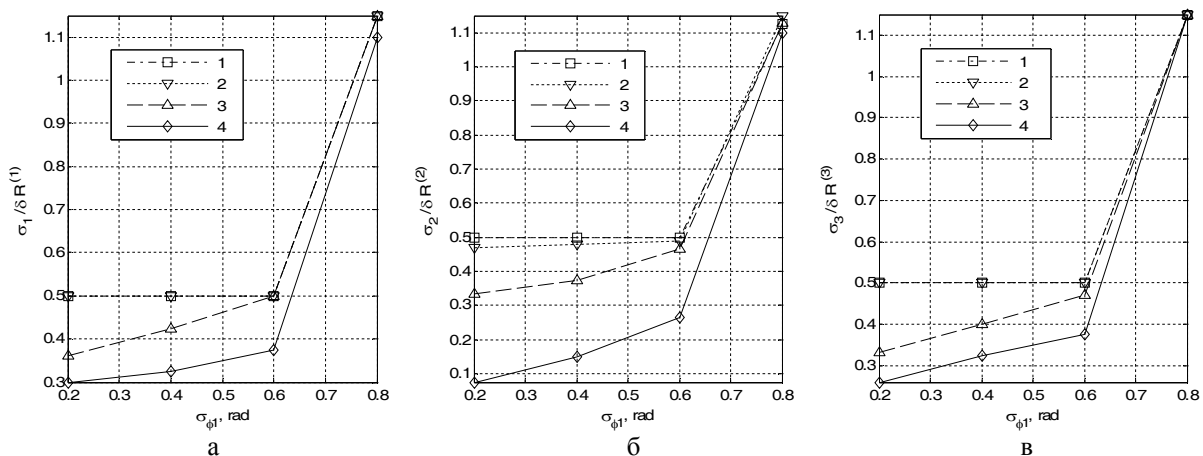


Рис. 2. Приведенные к шагу гипотезы СКО оценки $R^{(n)}$ при максимальной расстройке $\Delta_{0n} = 0,5$ по данным АКО методами МП (1), МНК (2), АМО (3) и ОПИ (4): а – $R^{(1)}$, б – $R^{(2)}$, в – $R^{(3)}$

2. В области аномальных измерений ($\sigma_{\varphi i} \geq 0,6$ рад) приведенное СКО оценок $\sigma(R^{(n)})/\delta R^{(n)}$ монотонно возрастает до величин порядка 1...20. Анализ испытательных выборок подтвердил отсутствие аномальных оценок при $\sigma_{\varphi i} \leq 0,6$ рад. В то же время частота аномальных оценок по данным АКО составила 3% при $\sigma_{\varphi i} = 0,8$ рад и 7,4% при $\sigma_{\varphi i} = 1$ рад.

Кроме того, в области нормальных измерений для оценок характерны следующие тенденции:

3. ОМНК практически не имеет преимуществ перед ОМП ни по смещению, ни по СКО во всем диапазоне $\sigma_{\varphi i}$ и Δ_{0n} . Это объясняется фазовой природой этих оценок, которая при малом уровне помех приводит к значительным (превосходящим $\delta R^{(n)}$) ошибкам, связанным с неоднозначностью определения фазы.

4. ОАМО характеризуется более высокой точностью по сравнению с ОМП и ОМНК (по СКО $\sigma_n = \sigma(R^{(n)})$ в среднем на 15...30%). Этот факт согласуется с идеей уточнения ОМП соседними отсчетами ЛАРВ [11]. Дополнительно путем изменения $\delta R^{(n)}$ было установлено, что точность ОАМО растет с ростом числа i используемых при оценке отсчетов ЛАРВ до тех пор, пока все они лежат в пределах главного лепестка отклика процедуры формирования ЛАРВ. В условиях эксперимента в среднем наилучшее качество из оценок семейства ОАМО проявляли оценки $\hat{R}_{АМО}^{(n)}$ при $i = 3$.

5. Точность всех трех квазиоптимальных оценок (ОМП, ОМНК, ОАМО) существенно зависит от Δ_{0n} . По мере увеличения $\sigma_{\varphi i}$ эта зависимость ослабевает, что объясняется уменьшением влияния дискретности формирования ЛАРВ на результирующую точность по мере увеличения ошибок оценивания континуального ЛАРВ. Однако при $\sigma_{\varphi i} \in [0,2; 0,3]$ рад (то есть при $q^2 \approx 25$), что соответствует типовым условиям функционирования АКО РЛС НГО, для них выполняется соотношение

$$\begin{aligned} \sigma_n(\sigma_{\varphi i})_{\max} / \sigma_n(\sigma_{\varphi i})_{\min} &= \\ &= \sigma_n(\sigma_{\varphi i}) \Big|_{\Delta_{0n}=0,5} / \sigma_n(\sigma_{\varphi i}) \Big|_{\Delta_{0n}=0} \approx 3 \dots 10. \end{aligned}$$

6. ОПИ, не являясь строго оптимальной по какому бы то ни было критерию, проявляет замечательное свойство: ее СКО при $\sigma_{\varphi i} = \text{const}$ практически не зависит от Δ_{0n} и при $\Delta_{0n} = 0,5$ сохраняется на уровне СКО квазиоптимальных оценок при $\Delta_{0n} = 0$.

Таким образом, в области нормальных измерений ОПИ оказывается наиболее надежной из всех сравниваемых оценок в смысле обеспечения минимального значения максимального СКО, то есть ОПИ являются предпочтительными по минимаксному критерию. ОПИ АКО можно трактовать как асимптотически (при $\sigma_{\varphi i} \rightarrow 0$) эффективные оценки. При нулевом (с точностью до σ_n) смещении их максимальные СКО $\sigma_1 = \sigma(R^{(1)})$ и $\sigma_2 = \sigma(R^{(2)})$ при $\sigma_{\varphi i} = 0,2$ рад и $N = 32$ в 2...8 раз меньше, чем у АКО при $N = 16$.

Выводы

Разработан алгоритм совместной оценки трех первых производных дальности по данным фазовых измерений системы когерентной обработки РЛС, доставляющий состоятельные несмещенные оценки. Алгоритм состоит из трех этапов. Первый и третий этапы допускают множество вариантов. Обоснование предпочтительного варианта алгоритма выполнено методом имитационного моделирования. Оценка максимального правдоподобия вектора радиальных параметров цели, содержащего три первых производных дальности, на первом этапе формируется по варианту, обеспечивающему минимум вычислительных затрат. Уточнение этой оценки реализуется с помощью трехмерной параболической интерполяции, точность которой является предпочтительной по минимаксному критерию.

Список литературы

1. Оружие России. Т. 5 – 1996–1997гг. – М.: ФГУП «Рособоронсервис».
2. Радиотехнические станции надгоризонтного обнаружения войск ПРН: Учебник под ред. Ф.М. Андреева. – Х.: ВИРТА, 1983. – 444 с.
3. Радиотехнические системы в ракетной технике / В.Д. Великанов и др. – М.: Воениздат, 1974. – 340 с.
4. Андреев Ф.М. Потенциальные возможности корреляционной обработки начечных когерентных радиолокационных сигналов в координатах первых трех производных дальности цели / Ф.М. Андреев, А.В. Статкус // Сб. науч. трудов 2-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Х.: Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – 2005. – Т. 2. – С. 147-150.
5. Андреев Ф.М. Анализ возможности использования аналитического приближения для оценки второй и третьей производной дальности / Ф.М. Андреев, А.В. Статкус // Системы обработки информации. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2013. – Вып. 6(104). – С. 171-176.
6. Изделие 5Н86. Рабочий алгоритм и программа. Техническое описание алгоритма 4П – 00 – 00 – 00. Ч. I. – М.: Министерство радиопромышленности, 1985. – 243 с.
7. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь. – 1982. – 624 с.
8. Оппенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов / Э. Оппенгейм. – М.: Сов. радио, 1980. – 552 с.

9. Андреев Ф.М. Оценка ошибок измерения радиальных скорости и ускорения цели по данным моделирования / Ф.М. Андреев, А.В. Статкус // Вісник {УЕ. – 2013. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – Дип. 2.

10. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.

11. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов / В.К. Слока. – М.: Сов. радио, 1970. – 256 с.

Поступила в редколлегию 26.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

СУМІСНЕ МІНІМАКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТРЬОХ ПЕРШИХ ПОХІДНИХ ДАЛЬНОСТІ ДЛЯ СИСТЕМИ КОГЕРЕНТНОЇ ОБРОБКИ РЛС

А.В. Статкус, Ф.М. Андреев

Розроблено ефективний в обчислювальному відношенні алгоритм сумісної оцінки радіальної швидкості, прискорення та третьої похідної дальності зі складу системи когерентної обробки РЛС. За допомогою імітаційного моделювання доведено, що алгоритм забезпечує мінімум максимального значення середньоквадратичної похибки у випадку дискретного розміщення каналів в межах трьохвимірної області аналізу.

Ключові слова: радіолокаційна станція надобрійного виявлення, система когерентної обробки пачки імпульсів, похідні дальності, дискретне розміщення каналів, середньоквадратична похибка, мінімаксне оцінювання.

SIMULTANEOUS MINIMAX MSE ESTIMATION OF THREE FIRST RANGE DERIVATIVES FOR RADAR COHERENT PROCESSING SYSTEM

A.V. Statkus, F.M. Andreev

The computationally efficient algorithm for the simultaneous Doppler, range acceleration, and third range derivative estimation intended for the radar coherent processing system is proposed. With the use of simulation it is determined that the algorithm elaborated is quasioptimal minimax mean square error (MSE) estimator in the case of discrete channel placing within 3D analysis area.

Keywords: early warning radar, pulse train coherent processing system, range derivatives, discrete channel placing, mean square error, minimax estimation.