
Радиолокационные системы

УДК 621.396.96

Разработка комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA оптимальной оценки координат маневрирующего источника радиоизлучения

Паршин Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических устройств. Рязанский государственный радиотехнический университет. E-mail: parshin.y.n@rsreu.ru.

Льонг Чинь Ван – аспирант, кафедра радиотехнических устройств. Рязанский государственный радиотехнический университет. E-mail: lgtrinh76@yahoo.com.

Адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Аннотация: В статье рассмотрена задача обработки радиолокационной информации, включающая оптимальную оценку координат и сопровождение траектории маневрирующего объекта, несущего источник радиоизлучения. Предложен рекуррентный гибридный алгоритм TDOA+AOA оптимальной оценки пространственных координат маневрирующего объекта на основе применения расширенного фильтра Калмана при использовании модели измерений координат объекта двумя подвижными пунктами приема в сферических координатах. Так как в пассивной радиолокации априорная информация о параметрах движения объекта и пространственных параметров принятых сигналов известна не полностью, необходимо включить неизвестные параметры движения в расширенный вектор оцениваемых параметров. Разработан нелинейный гибридный алгоритм TDOA+AOA эффективной оценки координат в условиях неполной априорной информации о параметрах движения наблюдаемого объекта. Разработан комплексированный гибридный алгоритм TDOA+AOA оптимальной оценки координат маневрирующего объекта на основе комбинации рекуррентного и нелинейного гибридных алгоритмов TDOA+AOA для повышения точности оценивания координат в условиях действия случайных ошибок измерений, случайных возмущений траектории объекта и неточности начальной оценки координат и параметров движения объекта. Приведен сравнительный анализ эффективности оценок координат, полученных предложенными алгоритмами при наличии случайных ошибок измерения, с эффективностью оценивания координат комплексированным гибридным алгоритмом TDOA+AOA при отсутствии ошибок измерения.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, рекуррентный алгоритм, возмущение траектории, начальная оценка, комплексирование.

Введение

Для определения местоположения объекта, являющегося носителем источника радиоизлучения, в пассивной радиолокации измеряют пространственные параметры принятых сигналов такие, как разности расстояний от объекта до пунктов приема, разности доплеровских сдвигов частот, угловые координаты объекта и др. [1-3]. На первом этапе обработки радиолокационной информации производят предварительное оценивание пространственных параметров объекта. На втором этапе на основе предварительной информации о пространственных параметрах объекта применяются рекуррентные алго-

ритмы оптимальной оценки координат, что позволяет повысить точность оценивания координат. В работах [4,5] исследованы рекуррентные алгоритмы оптимальной оценки координат, которые имеют такие преимущества, как высокая точность оценивания координат, простота технической реализации. При этом высокое качество оценивания достигается при условии неподвижных пунктов приема.

Целью работы является повышение точности оценивания пространственных параметров (пространственные координаты, скорость, ускорение) маневрирующего объекта на основе комбинации рекуррентного и нелинейного гибридных

алгоритмов TDOA+AOA (Time Difference of Arrival + Angle of Arrival) при использовании двух подвижных пунктов приема в условиях действия случайных ошибок измерений, случайных возмущений траектории объекта, а также неточности начальных значений.

Постановка задачи

Пространственное расположение объекта и пунктов приема для реализации комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA отобрано на рис. 1.

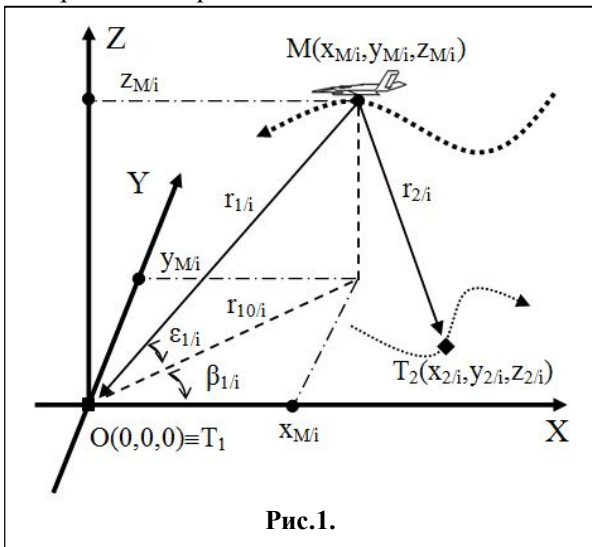


Рис. 1.

В начале координат (0,0,0) находится 1-й пункт приема T_1 ; $(x_{2/i}, y_{2/i}, z_{2/i})$ - координаты 2-го пункта приема T_2 , движущегося относительно 1-го пункта приема T_1 ; $(x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i})$ - координаты объекта M , движущегося относительно 1-го и 2-го пунктов приема. При движении пункта приема T_2 и объекта M в каждый момент времени t_i , $i = 1, 2, \dots$, измеряются величины $d_i = r_{2/i} - r_{1/i}$ - разность расстояний от объекта M до пунктов приема T_2 и T_1 , а также угловые координаты $\beta_{1/i}$, $\epsilon_{1/i}$ объекта.

Уравнение состояния маневрирующего объекта записывается в виде [4]:

$$X_i = AX_{i-1} + G\xi_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

где $X_i = [x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i}, a_{1/i}, b_{1/i}, c_{1/i}, a_{2/i}, b_{2/i}, c_{2/i}]^T$ - неизвестный вектор, содержащий коэффициенты полиномиальной аппроксима-

ции траектории движения объекта, $a_{1/i}, b_{1/i}, c_{1/i}$ и $a_{2/i}, b_{2/i}, c_{2/i}$ скорости и ускорения объекта по осям x, y, z ; $\xi_i = [\xi_{a/i}, \xi_{b/i}, \xi_{c/i}]^T$ - случайный вектор, $\xi_{a/i}, \xi_{b/i}, \xi_{c/i}$ - случайные возмущения траектории движения объекта, которые имеют нормальное распределение $N(0, \sigma_a^2), N(0, \sigma_b^2), N(0, \sigma_c^2)$, здесь $\sigma_a^2, \sigma_b^2, \sigma_c^2$ - дисперсии возмущения; $T = t_{i+1} - t_i$,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$G = \begin{bmatrix} T^2/4 & 0 & 0 & T/2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & T^2/4 & 0 & 0 & T/2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/4 & 0 & 0 & T/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Связь между координатами объекта $x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i}$ и измеренными величинами $d_i, \beta_{1/i}, \epsilon_{1/i}$ выражается системой нелинейных уравнений [3-5]:

$$\begin{cases} d_i = \sqrt{(x_{M/i} - x_{2/i})^2 + (y_{M/i} - y_{2/i})^2 + (z_{M/i} - z_{2/i})^2} - \sqrt{x_{M/i}^2 + y_{M/i}^2 + z_{M/i}^2} \\ \beta_{1/i} = \arctg \frac{y_{M/i}}{x_{M/i}} \\ \epsilon_{1/i} = \arctg \frac{z_{M/i}}{\sqrt{x_{M/i}^2 + y_{M/i}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (2)$$

Представим систему уравнений (2) в векторном виде:

$$Y_i = F(X_i), \quad (3)$$

где $Y_i = [d_i, \beta_{1/i}, \epsilon_{1/i}]^T$ - измеренный вектор.

Рассмотрим источники погрешностей измерения координат объекта гибридным методом

TDOA+AOA. Измеренные значения разности расстояний и угловых координат равны [1, 2]:

$$d_i^* = d_i + \eta_{d/i},$$

$$\beta_{1/i}^* = \beta_{1/i} + \eta_{\beta/i}, \quad \varepsilon_{1/i}^* = \varepsilon_{1/i} + \eta_{\varepsilon/i},$$

где d_i , $\beta_{1/i}$, $\varepsilon_{1/i}$ - точные разности расстояния и угловые координаты; $\eta_{d/i}$, $\eta_{\beta/i}$, $\eta_{\varepsilon/i}$ - статистические независимые погрешности измерения разности расстояния и угловых координат, которые имеют нормальное распределение $N(0, \sigma_d^2)$, $N(0, \sigma_\beta^2)$ и $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$, σ_d^2 , σ_β^2 , σ_ε^2 - дисперсии ошибки измерений разности расстояния и угловых координат. При действии случайных ошибок измерений, система уравнений (3) имеет вид:

$$\mathbf{Y}_i^* = F(\mathbf{X}_i) + \boldsymbol{\eta}_i. \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\eta}_i = [\eta_{d/i}, \eta_{\beta/i}, \eta_{\varepsilon/i}]^T$ - случайный вектор ошибки измерений.

Рассмотрим задачу оптимального оценивания пространственных параметров маневрирующего объекта для случая, когда уравнения пространственных параметров записываются в декартовых координатах (x, y, z) , а уравнения измерений – в сферических (d, β, ε) .

Гибридные алгоритмы TDOA+AOA оптимальной оценки координат маневрирующего объекта

Задачей первого этапа обработки информации является получение предварительной информации о пространственных параметрах объекта

\mathbf{X}_0^* . Для этого в i -й точке измерений траектории определяются величины d_i^* , $\beta_{1/i}^*$, $\varepsilon_{1/i}^*$ и $x_{2/i}$, $y_{2/i}$, $z_{2/i}$, $i = 1, 2, \dots$. В дальнейшем на втором этапе для повышения точности оценивания координат объекта используется комплексирование гибридных алгоритмов TDOA+AOA.

Рекуррентный гибридный алгоритм TDOA+AOA. Для получения оптимальной оценки параметров состояния маневрирующего объекта (1) при заданных условиях применим расширенный фильтр Калмана, реализующий нелинейный оптимальный алгоритм об-

работки, в основу которого положено свойство нелинейности функции $F(\mathbf{X}_i)$ в уравнении измерения (4). Тогда, дискретный рекуррентный гибридный алгоритм TDOA+AOA оптимальной оценки пространственных параметров маневрирующего объекта представлен системой уравнений [4,5]:

$$\mathbf{X}_i^* = \mathbf{A}\mathbf{X}_{i-1}^* + \mathbf{K}_i[\mathbf{Y}_i^* - F(\mathbf{X}_{i-1}^*)], \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_{i-1} = \mathbf{A}\boldsymbol{\Phi}_{i-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{G}\mathfrak{R}\mathbf{G}^T,$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{V}_{i-1}\mathbf{H}_i^T[\mathbf{H}_i\mathbf{V}_{i-1}\mathbf{H}_i^T + \mathbf{W}]^{-1},$$

$$\boldsymbol{\Phi}_i = \mathbf{V}_{i-1} - \mathbf{V}_{i-1}\mathbf{H}_i^T[\mathbf{H}_i\mathbf{V}_{i-1}\mathbf{H}_i^T + \mathbf{W}]^{-1}\mathbf{H}_i\mathbf{V}_{i-1}.$$

где $\mathbf{W} = \text{diag}[\sigma_d^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2]$ - диагональная корреляционная матрица случайного вектора ошибок измерений $\boldsymbol{\eta}_i$; $\mathfrak{R} = \text{diag}[\sigma_a^2, \sigma_b^2, \sigma_c^2]$ - диагональная корреляционная матрица случайного вектора возмущения траектории $\boldsymbol{\xi}_i$;

$\boldsymbol{\Phi}_0 = (\mathbf{X}_0^* - \mathbf{X}_0)(\mathbf{X}_0^* - \mathbf{X}_0)^T$ - диагональная корреляционная матрица, которая характеризует начальные случайные значения оцениваемого вектора \mathbf{X}_0^* ;

$$\mathbf{H}_i = \frac{\partial F(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{i-1}^*} =$$

$$= \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{21} & f_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$f_{11} = \frac{x_{M/i-1}^* - x_{2/i-1}}{r_{2/i-1}^*} - \frac{x_{M/i-1}^*}{r_{1/i-1}^*},$$

$$f_{12} = \frac{y_{M/i-1}^* - y_{2/i-1}}{r_{2/i-1}^*} - \frac{y_{M/i-1}^*}{r_{1/i-1}^*},$$

$$f_{13} = \frac{z_{M/i-1}^* - z_{2/i-1}}{r_{2/i-1}^*} - \frac{z_{M/i-1}^*}{r_{1/i-1}^*}, \quad f_{21} = \frac{-y_{M/i-1}^*}{(r_{10/i-1}^*)^2},$$

$$f_{22} = \frac{x_{M/i-1}^*}{(r_{10/i-1}^*)^2}, \quad f_{31} = \frac{-x_{M/i-1}^* z_{M/i-1}^*}{r_{10/i-1}^* (r_{1/i-1}^*)^2},$$

$$f_{32} = \frac{-y_{M/i-1}^* z_{M/i-1}^*}{r_{10/i-1}^* (r_{1/i-1}^*)^2}, \quad f_{33} = \frac{r_{10/i-1}^*}{(r_{1/i-1}^*)^2},$$

$$r_{10/i-1}^* = \sqrt{(x_{M/i-1}^*)^2 + (y_{M/i-1}^*)^2},$$

$$r_{1/i-1}^* = \sqrt{(x_{M/i-1}^*)^2 + (y_{M/i-1}^*)^2 + (z_{M/i-1}^*)^2},$$

$$r_{2/i-1}^* = \sqrt{(x_{M/i-1}^* - x_{2/i-1})^2 + (y_{M/i-1}^* - y_{2/i-1})^2 + (z_{M/i-1}^* - z_{2/i-1})^2}$$

Нелинейный гибридный алгоритм TDOA+AOA. Для получения оценки координат маневрирующего объекта в условиях неполной априорной информации о пространственных параметрах объекта применим прямое решение системы нелинейных уравнений измерения (2) в каждой точке измерений $i = 1, 2, \dots$. Из системы нелинейных уравнений (2), а также пространственного расположения объекта и пунктов приема (на рис. 1) непосредственно следует [3,6]:

$$\begin{cases} L_i^2 - d_i^2 = 2x_{2/i}x_{M/i} + 2y_{2/i}y_{M/i} + 2z_{2/i}z_{M/i} + 2d_i r_{1/i} \\ 0 = x_{M/i} \cos \beta_{1/i} - y_{M/i} \sin \beta_{1/i} \\ 0 = x_{M/i} \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} - z_{M/i} \cos \beta_{1/i} \\ i = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (6)$$

где $L_i = \sqrt{x_{2/i}^2 + y_{2/i}^2 + z_{2/i}^2}$,

$$r_{1/i} = \frac{x_{M/i} \cos \beta_{1/i} + y_{M/i} \sin \beta_{1/i}}{\cos \varepsilon_{1/i}}, \quad (7)$$

Подставляя уравнение (7) в систему уравнений (6), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} (L_i^2 - d_i^2) \cos \varepsilon_{1/i} = 2(x_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \cos \beta_{1/i})x_{M/i} + 2(y_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \sin \beta_{1/i})y_{M/i} + 2(z_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i})z_{M/i} \\ 0 = x_{M/i} \sin \beta_{1/i} - y_{M/i} \cos \beta_{1/i} \\ 0 = x_{M/i} \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} - z_{M/i} \cos \beta_{1/i} \\ i = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (8)$$

Представим систему уравнений (8) в матричном виде:

$$\mathbf{m}_{2/i} = \mathbf{g}_{2/i} \mathbf{X}_{2/i}, \quad (9)$$

где $\mathbf{X}_{2/i} = (x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i})^T$ - неизвестный вектор координат объекта;

$\mathbf{m}_{2/i} = [(L_i^2 - d_i^2) \cos \varepsilon_{1/i}, 0, 0]^T$ - вектор, полученный в результате измерений;

$$\mathbf{g}_{2/i} = \begin{bmatrix} 2(x_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \cos \beta_{1/i}) \sin \beta_{1/i} \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} \\ 2(y_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \sin \beta_{1/i}) - \cos \beta_{1/i} & 0 \\ 2z_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} & 0 & -\cos \beta_{1/i} \end{bmatrix}^T$$

матрица преобразований, полученная в результате измерений. Среднеквадратическая оценка

получается в виде решения обратной задачи по наблюдениям (9):

$$\mathbf{X}_{2/i}^* = [\mathbf{g}_{2/i}^T \mathbf{g}_{2/i}]^{-1} \mathbf{g}_{2/i}^T \mathbf{m}_{2/i}$$

При действии случайных ошибок измерений величины $d_i, \beta_{1/i}, \varepsilon_{1/i}$ предлагается заменить их измеренными значениями $d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*$ при вычислении матрицы $\mathbf{g}_{2/i}$ и вектора $\mathbf{m}_{2/i}$. В результате получаем модифицированное решение обратной задачи при наблюдении с ошибками:

$$\mathbf{X}_{2/i}^* = [(\mathbf{g}_{2/i}^*)^T \mathbf{g}_{2/i}^*]^{-1} (\mathbf{g}_{2/i}^*)^T \mathbf{m}_{2/i} \quad (10)$$

Комплексированный гибридный алгоритм TDOA+AOA. Для оптимальной оценки пространственных параметров маневрирующего объекта рекуррентным гибридным алгоритмом TDOA+AOA необходимо задать начальное значение оценки $\mathbf{X}_0^* \approx \mathbf{X}_0$ с достаточно высокой точностью. На практике начальное значение известно приближенно $\mathbf{X}_0^* = \mathbf{X}_0 + \Delta \mathbf{X}_0$, где $\Delta \mathbf{X}_0$ - отклонение начальной оценки. Для достижения более высокой точности оценивания координат маневрирующего объекта предлагается комбинация рекуррентного (5) и нелинейного (10) гибридных алгоритмов TDOA+AOA. Известно [7], что комплексирование алгоритмов позволяет сочетать их достоинства, уменьшить влияние неточности начальной оценки, повысить устойчивость работы алгоритма фильтрации, и в результате повысить точность оценивания координат.

Структурная схема устройства, реализующего комплексированный гибридный алгоритм TDOA+AOA оптимальной оценки пространственных параметров маневрирующего объекта, приведена на рис.2. На первом этапе на основе начальной оценки \mathbf{X}_0^* при получении измеренного вектора \mathbf{Y}_i^* выполняем оценку координат \mathbf{X}_i^* рекуррентным гибридным алгоритмом TDOA+AOA. На втором этапе на основе \mathbf{X}_i^* и известных дисперсий ошибок измерений $\sigma_d^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2$, сформированных в векторе наблюдений \mathbf{m}_i , а также матриц преобразова-

ний $\mathbf{g}_{2/i}^*$ и $\mathbf{\Omega}_i$ производим уточнение координат модифицированным методом максимального правдоподобия. Полученные таким образом уточненные координаты \mathbf{X}_i^{**} задерживаются по времени на интервал дискретизации T , а задержанные координаты \mathbf{X}_{i-1}^{**} передаются в блоки для вычисления \mathbf{H}_i , $F(\mathbf{X}_{i-1}^{**})$, $\mathbf{A}\mathbf{X}_{i-1}^{**}$ и матрицы преобразований $\mathbf{\Omega}_i(\mathbf{X}_{i-1}^{**})$. На следующих шагах комплексированного алгоритма

измерений наблюдаемые данные (8) записываются в приближенном виде [3,6]:

$$\begin{cases} (L_i^2 - d_i^2) \cos \varepsilon_{1/i} \approx 2(x_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \cos \beta_{1/i})x_{M/i} + \\ + 2(y_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \sin \beta_{1/i})y_{M/i} + \\ + 2(z_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i})z_{M/i} + \eta_{d/i}(2r_{1/i} + 2d_i) \cos \varepsilon_{1/i} \\ 0 \approx x_{M/i} \sin \beta_{1/i} - y_{M/i} \cos \beta_{1/i} + \eta_{\beta/i}(r_{1/i} \cos \varepsilon_{1/i}) \\ 0 \approx x_{M/i} \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} - z_{M/i} \cos \beta_{1/i} + \eta_{\varepsilon/i} \left(r_{1/i} \frac{\cos \beta_{1/i}}{\cos \varepsilon_{1/i}} \right) \\ i = 1, 2, \dots \end{cases}$$

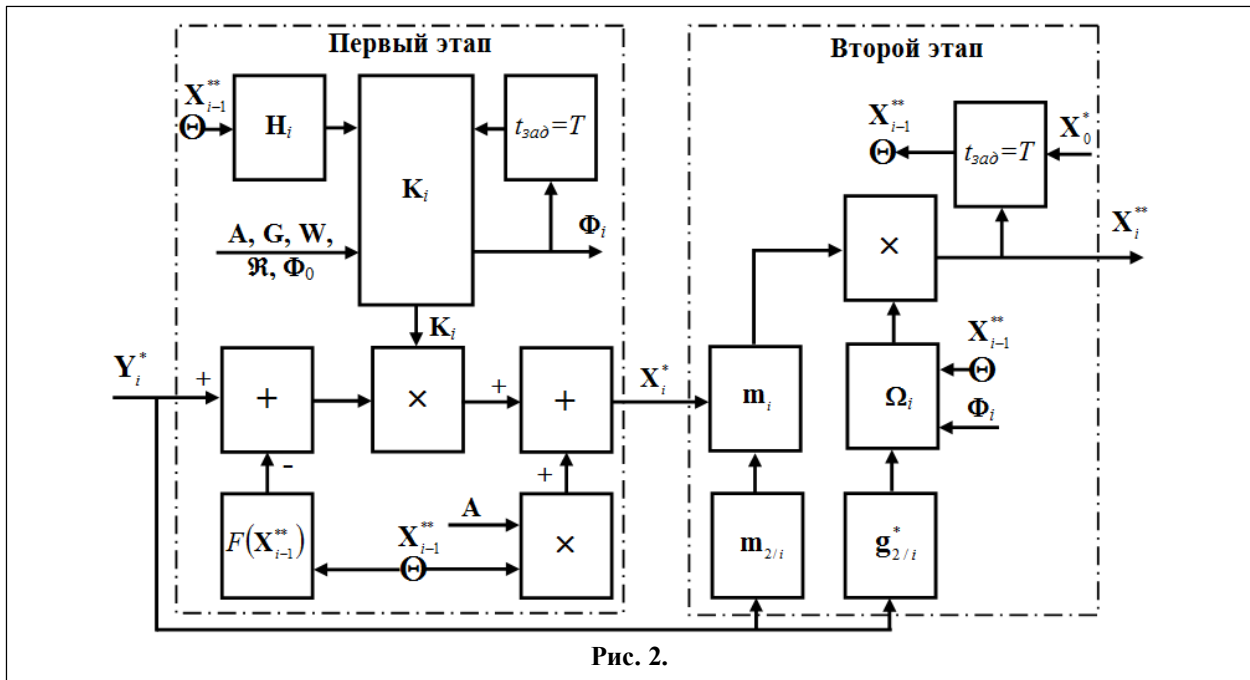


Рис. 2.

работа итерационного фильтра Калмана аналогично повторяется.

Рассмотрим влияние случайных ошибок измерений на оценивание пространственных параметров.

Оценка параметров, полученных в результате работы рекуррентного гибридного алгоритма TDOA+AOA (5):

$$\mathbf{X}_i^* = \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\theta}_{1/i},$$

используется как исходные данные для комплексированного гибридного алгоритма:

$$\mathbf{m}_{1/i} = \mathbf{X}_i^* = \mathbf{I}_{9 \times 9} \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\theta}_{1/i}, \quad (11)$$

где $\mathbf{I}_{9 \times 9}$ - единичная матрица, \mathbf{X}_i - точное значение параметров, $\boldsymbol{\theta}_{1/i}$ - случайный вектор ошибок измерений рекуррентного гибридного алгоритма. При действии случайных ошибок

или в эквивалентном матричном виде:

$$\mathbf{m}_{2/i} = [\mathbf{g}_{2/i} \ \mathbf{0}_{3 \times 6}] \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\theta}_{2/i}, \quad (12)$$

где $\mathbf{0}_{3 \times 6}$ - матрица, состоящая из нулей;

$$\boldsymbol{\theta}_{2/i} = [\eta_{d/i}(2r_{1/i} + 2d_i) \cos \varepsilon_{1/i}, \eta_{\beta/i}(r_{1/i} \cos \varepsilon_{1/i}),$$

$\eta_{\varepsilon/i} \left(r_{1/i} \frac{\cos \beta_{1/i}}{\cos \varepsilon_{1/i}} \right)]^T$ - случайный вектор, учитывающий ошибки измерений.

Объединяя уравнения (11) и (12), получим комплексированный гибридный алгоритм TDOA+AOA оптимальной оценки координат маневрирующего объекта:

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{1/i} = \mathbf{I}_{9 \times 9} \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\theta}_{1/i}, \\ \mathbf{m}_{2/i} = [\mathbf{g}_{2/i} \ \mathbf{0}_{3 \times 6}] \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\theta}_{2/i} \\ i = 0, 1, \dots \end{cases}$$

откуда следует:

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{g}_i \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\theta}_i. \quad (13)$$

где $\mathbf{m}_i = [\mathbf{m}_{1/i}, \mathbf{m}_{2/i}]^T$ - измеренный вектор; $\boldsymbol{\theta}_i = [\boldsymbol{\theta}_{1/i}, \boldsymbol{\theta}_{2/i}]^T$ - случайный вектор ошибок измерений; $\mathbf{g}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{9 \times 9} \\ \mathbf{g}_{2/i} \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix}_{12 \times 9}$ - измеренная матрица полного ранга.

Вариант 1. Предполагается, что для вычисления матрицы преобразования \mathbf{g}_i используются точные значения $d_i, \beta_{1/i}, \varepsilon_{1/i}$ и $r_{1/i}$. Тогда оптимальная оценка координат методом максимального правдоподобия определяется уравнением:

$$\mathbf{X}_i^{**} = \boldsymbol{\Omega}_i \mathbf{m}_i. \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\Omega}_i = [\mathbf{g}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{g}_i]^{-1} \mathbf{g}_i^T \mathbf{R}_i^{-1}$; $\mathbf{R}_i = \overline{\boldsymbol{\theta}_i \boldsymbol{\theta}_i^T} = \text{diag}[\Phi_i(1,1), \dots, \Phi_i(9,9), 4\sigma_d^2(r_{1/i} + d_i)^2 \cos^2 \varepsilon_{1/i}, \sigma_\beta^2(r_{1/i} \cos \varepsilon_{1/i})^2, \sigma_\varepsilon^2\left(r_{1/i} \frac{\cos \beta_{1/i}}{\cos \varepsilon_{1/i}}\right)^2]$ - диагональная корреляционная матрица вектора $\boldsymbol{\theta}_i$.

Корреляционная матрица Φ_i ошибок рекуррентного гибридного алгоритма TDOA+AOA также вычисляется по формуле (5) при точном значении оцениваемого вектора \mathbf{X}_i .

Так как при формировании матрицы преобразований и корреляционной матрицы используются точные значения координат, то в данном случае достигается предельная точность оценивания координат, а алгоритм (14) можно рассматривать как идеальное теоретическое решение, полезное при проведении сравнительного анализа с эффективностью других алгоритмов.

Вариант 2. Для получения практически реализуемой оценки координат маневрирующего объекта с использованием наблюдений (13) при вычислении \mathbf{g}_i и \mathbf{R}_i заменим точные величины $d_i, \beta_{1/i}, \varepsilon_{1/i}$ и $r_{1/i}$ полученными на первом этапе оценками $d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*$, а также вычисленным на их основе значением $r_{1/i}^*$. Подставляя полученные таким образом значения $\mathbf{g}_i^*, \mathbf{R}_i^*$ в алгоритм оценивания по крите-

рию максимального правдоподобия [6], получаем квазиоптимальный алгоритм:

$$\mathbf{X}_i^{**} = \boldsymbol{\Omega}_i^* \mathbf{m}_i, \quad (15)$$

где $\boldsymbol{\Omega}_i^* = \left[(\mathbf{g}_i^*)^T (\mathbf{R}_i^*)^{-1} \mathbf{g}_i^* \right]^{-1} (\mathbf{g}_i^*)^T (\mathbf{R}_i^*)^{-1}$.

Анализ эффективности алгоритмов

При моделировании алгоритма оценивания координат объекта учитывались случайные погрешности измерений $\eta_{d/i}, \eta_{\beta/i}, \eta_{\varepsilon/i}$ и возмущения траектории $\xi_{a/i}, \xi_{b/i}, \xi_{c/i}$, а дисперсия ошибки оценивания координат определяется путем статистического усреднения квадрата ошибки каждой координаты по множеству из N реализаций в зависимости от момента времени измерений i :

$$D_{xi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_{M/i} - x_{M/i}^*)^2_j,$$

$$D_{yi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_{M/i} - y_{M/i}^*)^2_j,$$

$$D_{zi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (z_{M/i} - z_{M/i}^*)^2_j.$$

где $x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i}$ - точные координаты объекта, $x_{M/i}^*, y_{M/i}^*, z_{M/i}^*$ - оценки координат.

На рис.3 и рис.4 приведены зависимости среднеквадратического отклонения оценок координат $\sqrt{D_i} = \sqrt{D_{xi} + D_{yi} + D_{zi}}$ от момента времени измерений i , полученных рекуррентным (5), нелинейным (10) гибридными алгоритмами TDOA+AOA, а также комплексированным гибридным алгоритмом TDOA+AOA (14) - вариант 1, и (15) - вариант 2. Траектория движения пункта приема T_2 в моменты времени $t_i = iT$ задана уравнениями (км):

$$x_{2/i} = 20 \cos(2\pi t_i/20), \quad y_{2/i} = 20 \sin(2\pi t_i/20),$$

$$z_{2/i} = 10, \quad i = 1, 2, \dots$$

Координаты объекта M определяются уравнением (1) с параметрами:

$$\mathbf{X}_0 = [70 \text{ км}; 70 \text{ км}; 20 \text{ км}; 0,7 \text{ км/с}; 0,3 \text{ км/с};$$

$$0,01 \text{ км/с}; 0,03 \text{ км/с}^2; 0,03 \text{ км/с}^2; 0,01 \text{ км/с}^2],$$

$$\sigma_a = 2 \text{ м/с}^2, \quad \sigma_b = 2 \text{ м/с}^2, \quad \sigma_c = 1 \text{ м/с}^2, \quad T = 0,2 \text{ с}.$$

Среднеквадратическая погрешность измерений $\sigma_d = 9$ м, $\sigma_\beta = 0,3^0$, $\sigma_\varepsilon = 0,1^0$.

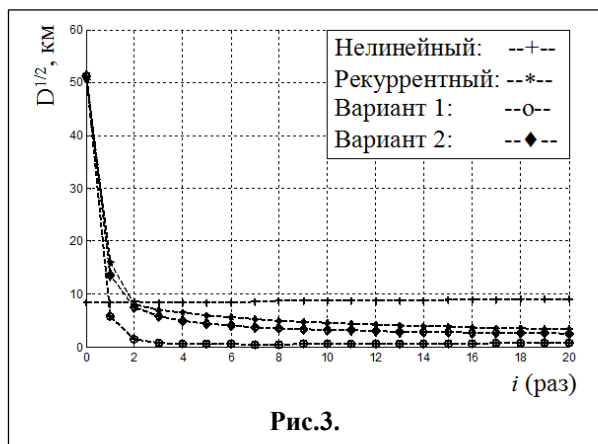


Рис.3.

На рис.3 приведены результаты моделирования при начальном расстоянии $r_{1/0} = 100$ км,

отклонении начальной оценки $\delta_0 = \frac{\sqrt{D_0}}{r_{1/0}} = 0,5$.

В момент времени $t_{10} = 10T$ получим оценку координат рекуррентного гибридного алгоритма TDOA+AOA с относительной средне-

квадратичной ошибкой $\delta_{10} = \frac{\sqrt{D_{10}}}{r_{1/0}} = 0,047$, а

для варианта 2 комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA ошибка равна $\delta_{10} = 0,0336$. Применение варианта 2 комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA уменьшает относительную ошибку оценивания координат в 1,4 раза по сравнению с рекуррентным гибридным алгоритмом TDOA+AOA.

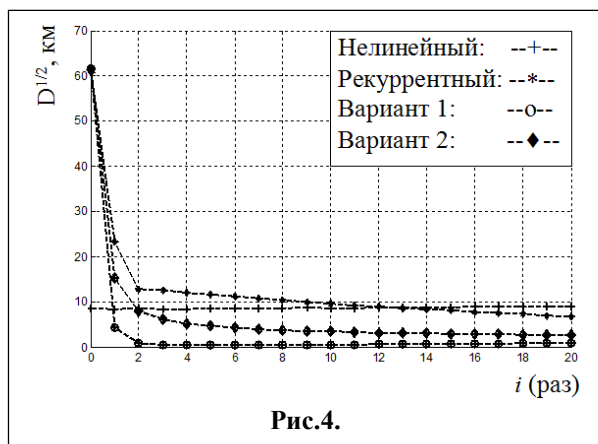


Рис.4.

На рис.4 приведены аналогичные зависимости при отклонении начальной оценки

$\delta_0 = 0,6$. В момент времени t_{10} вариант 2 комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA дает ошибку $\delta_{10} = 0,0457$, что в 2,1 раза меньше по сравнению с ошибкой $\delta_{10} = 0,0975$, полученной в результате применения рекуррентного гибридного алгоритма TDOA+AOA.

Выводы

Из приведенных результатов моделирования видно, что вариант 1 комплексированного алгоритма дает наименьшую ошибку оценивания координат. При действии случайных ошибок измерений ошибка оценивания координат варианта 2 комплексированного алгоритма значительно меньше по сравнению с рекуррентным и нелинейным гибридными алгоритмами TDOA+AOA. При увеличении времени наблюдения в пределах действия выбранной полиномиальной аппроксимации ошибка оценивания координат алгоритмом по вариантам 1 и 2 монотонно уменьшается, а нелинейного гибридного алгоритма TDOA+AOA монотонно увеличивается. Можно заключить, что применение комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA позволяет значительно уменьшить ошибку оценивания координат маневрирующего объекта, и вместе с тем повысить скорость сходимости рекуррентного алгоритма при действии случайных ошибок измерений, случайных возмущений траектории движения объекта и неточной начальной оценке.

Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1993, 416с.
2. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. - М.: Радио и связь, 1986, 264с.
3. Li Cong, Weihua Zhuang. Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems // IEEE Transactions on wireless communications, Vol. 1, № 3, July 2002, P.439-447.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. - Киев: Издательство 2000, 428с.
5. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер и англ. под ред. проф. Б.Р. Левина. - М.: связь, 1976, 496с.
6. Паршин Ю.Н., Лыонг Ч.В. Статистический синтез и анализ гибридного алгоритма определения

координат источника радиоизлучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2013, №1. С.16-27.

7. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992, 304с.

Поступила 04 декабря 2013 г.

English

Development complexing hybrid algorithm TDOA+AOA optimal estimate coordinate maneuvering sources of the radio emission

Parshin Yuri Nikolaievich – the Doctor of Science, Full Professor, the head of the department of radio-technical device. Ryazan State Radio Engineering University.

Luong Trinh Van – graduate student, the department of radio-technical device. Ryazan State Radio Engineering University (RSREU).

Address: 390005, Ryazan, St. Gagarin, 59/1.

Abstract: The paper considers the task of the radar information processing including an optimum estimation of co-ordinates and trajectory tracking of a maneuvering object carrying radiation frequency source. The hybrid recurrent hybrid TDOA+AOA algorithm of an optimum estimation of spatial co-ordinates of a maneuvering object on the basis of application of an expanded Kalman filter while using the measuring model of the object co-ordinates by two moving receiving centers in spherical co-ordinates is suggested here. It is necessary to include unknown movement parameters into the expanded vector of the estimated parameters because the prior information on the object movement parameters and space parameters of the received signals is not complete in a passive radiolocation. A non-linear hybrid TDOA+AOA algorithm of effective co-ordinates estimation under the condition of the incomplete prior information on the movement parameters of the observable object has been developed. An interconnected hybrid TDOA+AOA algorithm of an optimum estimation of maneuvering object co-ordinates on the basis of combination of recurrent and non-linear hybrid TDOA+AOA algorithms for increasing the accuracy of co-ordinates estimation under the conditions of accidental measurements errors, random disturbances of an object trajectory and inaccuracy of an original estimation of co-ordinates and object movement parameters of an object has been developed. The comparative analysis of efficiency of co-ordinates estimation done with the help of the suggested algorithms in the presence of accidental errors of measuring to the efficiency of co-ordinates estimation by complexing hybrid TDOA+AOA algorithm in the absence of measurement errors has been performed.

Key words: source of radio-frequency radiation, recurrent algorithm, perturbation of a trajectory, original estimation, complexing.

References

1. Chernjak V.S. Multiposition Radio Location. M.: Radio and Communication, 1993, 416 p.
2. Kondratev V.S., Kotov A.F., Markov L.N. Multiposition Radio Engineering Systems. M.: Radio i svjaz', 1986, 264 p.
3. Li Cong, Weihua Zhuang. Hybrid TDOA/AOA Mobile User Location for Wideband CDMA Cellular Systems. IEEE Transactions on wireless communications, Vol. 1, № 3, July 2002, P. 439-447.
4. Kuzmin S.Z. Digital Radio Engineering. Introduction into theory. Kiev: Izdatel'stvo 2000, 428p.
5. Sejdzh Je., Mels Dzh. Estimation Theory and its Application in Communication and Control. Transl. from English ed. by prof. B.R. Levina. M.: Svjaz', 1976, 496 p.
6. Parshin Ju.N., Lyong Ch.V. Statistical Synthesis and Analysis of Hybrid Algorithm of Coordinates Determination of Radio Frequency Source. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy, 2013, №1. P. 16-27.
7. Sosulin Ju.G. Theoretical Basis of Radio Location and Radio Navigation. M.: Radio i svjaz', 1992, 304 p.