



УДК 621.396.967

А. А. Коновалов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Разработка системы траекторной обработки для пассивного когерентного локатора¹

Рассмотрена разработка системы траекторной обработки для создаваемого в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) пассивного когерентного локатора. Предложен вариант двухэтапной схемы обработки, предусматривающей отожествление обнаруживаемых и сопровождаемых траекторий в бистатической системе координат с учетом измерений бистатической радиальной скорости, а фильтрацию – в прямоугольной системе координат нелинейным ансцентным фильтром Калмана, инициализируемым по двум бистатическим измерениям.

Пассивная когерентная локация, траекторное сопровождение, бистатическая фильтрация, ансцентный фильтр Калмана

Траекторная обработка (ТО) в РЛС заключается в нахождении текущей оценки параметров движения (пространственных координат и их производных) объектов, находящихся в ее зоне видимости, и в предсказании (экстраполяции) этих координат на заданный момент времени. Основная проблема ТО в пассивном когерентном локаторе (ПКЛ) состоит в том, что измерения осуществляются в бистатической системе координат (БСК), тогда как фильтрацию целесообразно производить в прямоугольной системе координат (ПСК). Это требует существенно нелинейного преобразования векторных случайных величин из одной системы координат (СК) в другую с использованием нелинейных алгоритмов траекторной фильтрации.

В ПКЛ нашли применение несколько видов нелинейных фильтров, среди которых расширенный фильтр Калмана (РФК) [1], ансцентный фильтр Калмана (АФК) [2], фильтры частиц (ФЧ) [3]. Использование вычислительно очень затратных ФЧ избыточно, если нет причин считать шумы и помехи негауссовскими. С другой стороны, АФК при сопоставимых вычислительных затратах обеспечивает более точную оценку, чем РФК, и не требует нахождения производных [4].

В настоящей статье рассмотрено сопровождение цели, движущейся равномерно и прямолинейно, при гауссовских шумах наблюдения и движения. В этих условиях нелинейную фильтрацию параметров траектории в ПКЛ целесообразно осуществлять при помощи АФК. При необходимости сопровождения маневрирующей цели алгоритм следует сделать многомодельным [5].

В рассмотренной схеме ПКЛ (рис. 1) измеряются задержка отраженного сигнала относительно прямого τ , доплеровское смещение частоты отраженного сигнала f_d , азимут α и угол места ϵ . Задержка пересчитывается в бистатическую дальность цели $r_b = c\tau$ (c – скорость света), доплеровское смещение – в бистатическую скорость $v_b = \dot{r}_b = \lambda f_d$ (λ – длина волны передатчика подсвета; точкой над переменной обозначена производная по времени).

Введем прямоугольную систему координат, в начале которой расположен приемник. В ней $r_b = R_{\text{пер}} + R_{\text{прм}} - L$, где $R_{\text{пер}}$, $R_{\text{прм}}$ – расстояния от цели до передатчика и приемника соответственно; $L = \sqrt{x_{\text{пер}}^2 + y_{\text{пер}}^2 + z_{\text{пер}}^2}$ – база ПКЛ (расстояние между приемником и передатчиком), при-

¹ При подготовке публикации использовались результаты работ по ОКР "Разработка пассивного когерентного локационного комплекса для охраны важных объектов", выполняемой СПбГЭТУ "ЛЭТИ" по договору с ОАО «НИИ "Вектор"» в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при финансовой поддержке работ по проекту Министерством образования и науки Российской Федерации (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

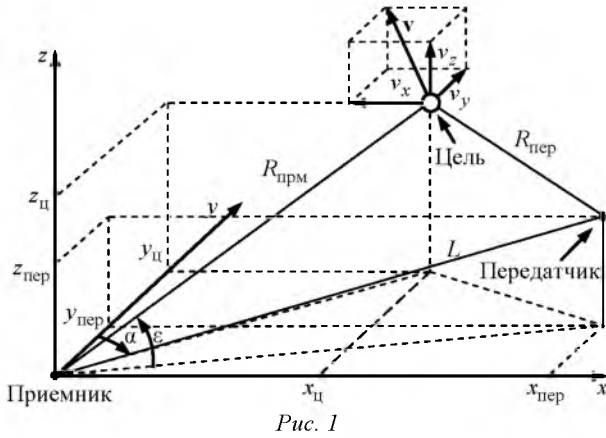


Рис. 1

чем $x_{пер}$, $y_{пер}$, $z_{пер}$ – известные координаты передатчика. Угол α отсчитывается по часовой стрелке от направленной на север оси y ; угол ϵ отсчитывается от поверхности Земли. Необходимо получить текущую оценку вектора состояния цели, включающего в себя 3 пространственные координаты $x_{ц}$, $y_{ц}$, $z_{ц}$ и 3 компоненты вектора скорости $\mathbf{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$ в ПСК.

В ТО ПКЛ получила распространение двухэтапная схема [1]–[3], согласно которой одна часть ТО выполняется в БСК, другая – в ПСК. Например, в польском PaRaDe (Warsaw University of Technology) [1] в БСК реализуется обнаружение траектории, в ПСК – отождествление и фильтрация. При этом, однако, из отождествления исключается бистатическая скорость (для ее однозначного преобразования в ПСК нужно либо знать курс цели, либо иметь синхронные измерения скоростей на других приемных позициях). Это нежелательно, поскольку измерения бистатической скорости одни из наиболее точных и достоверных. В ТО итальянской системы Aulos (SELEX Sistemi Integrati) [2] вся ТО проводится в БСК линейным бистатическим фильтром Калмана (БФК), а в ПСК преобразуются уже отфильтрованные отметки исключительно для нужд потребителя. Недостатком этого варианта является существенно нелинейный характер траекторий в БСК даже для тех целей, которые в ПСК движут-

ся прямолинейно и равномерно. Нелинейные модели движения цели в БСК в настоящее время, по-видимому, отсутствуют, а использование линейного фильтра в такой схеме нецелесообразно, поскольку он удовлетворительно работает только в условиях слабых нелинейностей (как в рассмотренном в [2] примере) либо на небольших участках траектории. В более сложных условиях с течением времени фильтр начинает расходиться.

Общая схема траекторной обработки в ПКЛ.

Основная идея предложенного в настоящей статье алгоритма заключается в отождествлении в бистатических координатах обнаруживаемых и сопровождаемых траекторий с учетом измерений бистатической доплеровской скорости. При этом фильтрация для всех траекторий выполняется в прямоугольных координатах некоторым нелинейным фильтром (в частности, АФК) (рис. 2). При этом необходимо обратное преобразование из ПСК в БСК, что является основным алгоритмическим отличием от существующих методов (в [2] обратное преобразование используется только на стадии обнаружения траектории). Обратное преобразование – это цена, которую необходимо заплатить за возможность использования измерений v_b в отождествлении. Преимуществом описанного подхода является то, что при отождествлении используется больше информации, что может значительно повысить качество отождествления (количественная оценка выигрыша будет осуществлена на следующей стадии работы).

При сопровождении в ПСК определение мгновенного значения бистатической скорости возможно при синхронном измерении этой величины пространственно разнесенными приемными позициями или при известном курсе цели. В первом случае оценка скорости требует модели движения в координатах ПСК, которая, насколько известно, отсутствует. Предпочтительным способом учета измерения мгновенного значения доплеровской скорости при отождествлении является описанный далее вариант двухэтапной схемы.

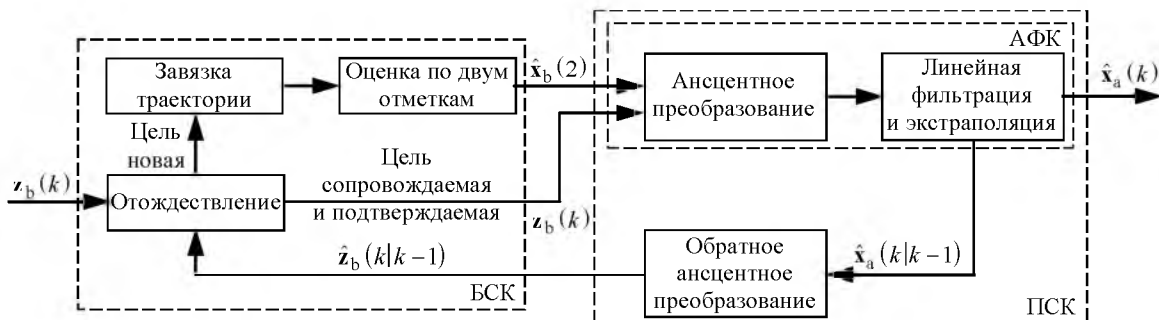


Рис. 2

Обнаружение траектории включает в себя завязку по критерию $2/L$ и подтверждение по критерию M/N [6]. Согласно указанным критериям решение об обнаружении траектории (завязке) принимается при фиксации двух отметок на L последовательных обзорах, решение о подтверждении – при фиксации не менее M отметок на N обзорах. Как показано далее, подтверждение целесообразно осуществлять в ПСК, инициализируя АФК по двум бистатистическим измерениям, полученным на этапе завязки.

Отождествление новых измерений с подтверждаемыми и сопровождаемыми траекториями производится в бистатистических координатах. Поскольку все траектории выражены в ПСК, необходимо преобразовать их обратно в БСК (преобразованию подвергаются экстраполированная оценка вектора измерения и его ковариационная матрица). Измерение, отождествленное с некоторой траекторией, пересчитывается из БСК в ПСК, где фильтруется в предположении о прямолинейном движении цели.

Для нелинейных преобразований из БСК в ПСК и обратно используется алгоритм анцентного преобразования (АП) (см. далее), причем, поскольку рассматриваемые шумовые процессы считаются гауссовскими, для трансляции их средних и ковариаций достаточно варианта АП с $2n$ сигма-точками, где n – размер преобразуемого вектора. Наличие обратного АП, осуществляемого в ходе подтверждения и сопровождения, позволяет проводить отождествление в БСК и является отличительной особенностью предложенного варианта двухэтапной схемы ТО.

Входные данные. На вход ТО поступает набор отметок, сформированных в ходе одного цикла обновления информации в ПКЛ, включающего накопление сигналов, обнаружение целей, измерение их параметров. Отметка формируется при превышении порога в обнаружителе и включает в себя время ее формирования t , вектор измеренных параметров цели $\mathbf{z}_b = [l_b, \alpha, \varepsilon, v_b]^T$ ("Т" – символ транспонирования) и погрешности измерения компонент этого вектора $\sigma_{l_b}, \sigma_\alpha, \sigma_\varepsilon, \sigma_{v_b}$. Отметка может быть обусловлена отражением от реальной радиолокационной цели (истинная отметка) или случайным превышением порога в обнаружителе (ложная отметка). Все отметки в наборе считаются одновременными.

Обработка в бистатистических координатах. Первый блок схемы ТО на рис. 2 выполняет в

БСК завязку траектории и отождествление бистатистических отметок с подтверждаемыми и сопровождаемыми траекториями.

На этапе завязки траектории по двум отметкам формируется инициализирующая АФК оценки $\hat{\mathbf{x}}_b(2)$ с ковариацией $P_b(2)$ (аргумент указывает номер измерения), где

$$\hat{\mathbf{x}}_b = [l_b, v_b, \alpha, \dot{\alpha}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}]^T, \\ P_b = \text{diag}[\sigma_{l_b}^2, \sigma_{v_b}^2, \sigma_\alpha^2, \sigma_{\dot{\alpha}}^2, \sigma_\varepsilon^2, \sigma_{\dot{\varepsilon}}^2].$$

Измеряемые параметры берутся из второй отметки $\mathbf{z}_b(2)$, а оценки скоростей по угловым координатам и их дисперсии вычисляются следующим образом:

$$\dot{\alpha} = [\alpha(2) - \alpha(1)]/\tau_2; \quad \sigma_{\dot{\alpha}}^2 = [\sigma_\alpha^2(1) + \sigma_\alpha^2(2)]/\tau_2^2; \\ \dot{\varepsilon} = [\varepsilon(2) - \varepsilon(1)]/\tau_2; \quad \sigma_{\dot{\varepsilon}}^2 = [\sigma_\varepsilon^2(1) + \sigma_\varepsilon^2(2)]/\tau_2^2,$$

где $\tau_2 = t(2) - t(1)$.

Отождествление новых отметок с преобразованными экстраполированными оценками векторов измерения для каждой траектории производится в бистатистических координатах в четырехмерном пространстве $(l_b, v_b, \alpha, \varepsilon)$ при помощи стандартной процедуры стробирования, в дополнение к которой, при необходимости, используется какой-либо из методов точного отождествления (в простейшем случае алгоритм ближайшего соседа или, для групповой цели, глобального ближайшего соседа [6]).

Обработка в прямоугольных координатах. Второй блок ТО выполняет нелинейное преобразование из БСК в ПСК измерений, отождествленных с подтверждаемыми и сопровождаемыми траекториями; экстраполяцию и фильтрацию этих траекторий; преобразование экстраполированных оценок в БСК.

На вход анцентного фильтра Калмана поступает либо инициализирующий вектор $\mathbf{z}_a = \hat{\mathbf{x}}_b(2)$ (а – анцентный) с ковариацией $P_b(2)$ (после завязки), либо отождествленное с данной траекторией измерение $\mathbf{z}_a = \mathbf{z}_b(k)$ с ковариацией

$$P_b(k) = \text{diag}[\sigma_{l_b}^2, \sigma_\alpha^2, \sigma_\varepsilon^2, \sigma_{v_b}^2].$$

На выходе АФК формируется оценка вектора состояния в ПСК $\hat{\mathbf{x}}_a = [x_{Ц}, y_{Ц}, z_{Ц}, v_x, v_y, v_z]^T$, связанная со входной величиной \mathbf{z}_a соотношением

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k) = \mathbf{h}_a[\mathbf{z}_a(k)] + \mathbf{v}_a,$$

где $\mathbf{h}_a(\cdot)$ – нелинейное преобразование координат из БСК в ПСК [2]; \mathbf{v}_a – шум измерения с ковариационной матрицей R_a .

Преобразование $\mathbf{h}_a(\cdot)$ определяется как

$$x_{\Pi} = N_x/D; \quad y_{\Pi} = N_y/D; \quad z_{\Pi} = N_z/D,$$

где

$$\begin{aligned} N_x &= \left[(\hat{r}_b + L)^2 - x_{\text{пер}}^2 - y_{\text{пер}}^2 - z_{\text{пер}}^2 \right] \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon}; \\ N_y &= \left[(\hat{r}_b + L)^2 - x_{\text{пер}}^2 - y_{\text{пер}}^2 - z_{\text{пер}}^2 \right] \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon}; \\ N_z &= \left[(\hat{r}_b + L)^2 - x_{\text{пер}}^2 - y_{\text{пер}}^2 - z_{\text{пер}}^2 \right] \sin \hat{\varepsilon}; \\ D &= 2(\hat{r}_b + L - \\ &\quad - x_{\text{пер}} \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} - y_{\text{пер}} \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} - z_{\text{пер}} \sin \hat{\varepsilon}). \end{aligned}$$

Результат преобразования вектора $\mathbf{z}_b(k)$ – трехмерный вектор координат цели в ПСК. Для инициализирующей отметки $\hat{\mathbf{x}}_b(2)$ дополнительно вычисляется вектор скорости в ПСК [2]:

$$\begin{aligned} v_x &= (1/D^2) \left[(dN_x/dt)D - (dD/dt)N_x \right]; \\ v_y &= (1/D^2) \left[(dN_y/dt)D - (dD/dt)N_y \right]; \\ v_z &= (1/D^2) \left[(dN_z/dt)D - (dD/dt)N_z \right], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} dN_x/dt &= 2\hat{r}_b(\hat{r}_b + L) \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} - \\ &\quad - \left[(\hat{r}_b + L)^2 - x_{\text{пер}}^2 - y_{\text{пер}}^2 - z_{\text{пер}}^2 \right] \times \\ &\quad \times (\hat{\alpha} \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} \sin \hat{\alpha} \sin \hat{\varepsilon}); \\ dN_y/dt &= 2\hat{r}_b(\hat{r}_b + L) \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} - \\ &\quad - \left[(\hat{r}_b + L)^2 - x_{\text{пер}}^2 - y_{\text{пер}}^2 - z_{\text{пер}}^2 \right] \times \\ &\quad \times (\hat{\alpha} \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} \cos \hat{\alpha} \sin \hat{\varepsilon}); \\ dN_z/dt &= 2\hat{r}_b(\hat{r}_b + L) \sin \hat{\varepsilon} + \\ &\quad + \left[(\hat{r}_b + L)^2 - x_{\text{пер}}^2 - y_{\text{пер}}^2 - z_{\text{пер}}^2 \right] \hat{\varepsilon} \cos \hat{\varepsilon}; \\ dD/dt &= 2 \left[\hat{r}_b - x_{\text{пер}} (\hat{\alpha} \cos \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon} \sin \hat{\alpha} \sin \hat{\varepsilon}) + \right. \\ &\quad \left. + y_{\text{пер}} (\hat{\alpha} \sin \hat{\alpha} \cos \hat{\varepsilon} + \hat{\varepsilon} \cos \hat{\alpha} \sin \hat{\varepsilon}) - z_{\text{пер}} \hat{\varepsilon} \cos \hat{\varepsilon} \right]. \end{aligned}$$

Уравнение движения в ПСК линейное:

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k) = F\mathbf{x}_a(k-1) + \mathbf{w}_a,$$

где $F = \text{diag}[F_1, F_1, F_1]$; \mathbf{w}_a – шум процесса с ковариационной матрицей Q_a , причем

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1 & \tau_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad Q_a = q \begin{bmatrix} \tau_k^4/4 & \tau_k^3/2 \\ \tau_k^3/2 & \tau_k^2 \end{bmatrix}$$

(q – дисперсия шума; $\tau_k = t(k) - t(k-1)$).

Для отождествления новых измерений с подтверждаемыми и сопровождаемыми траекториями необходимо иметь выраженные в БСК оценки экстраполированного положения цели на k -й момент времени, для вычисления которых используется уравнение

$$\hat{\mathbf{z}}_b(k|k-1) = \mathbf{h}_b[\hat{\mathbf{x}}_a(k|k-1)] + \mathbf{v}_b(k|k-1),$$

где $\mathbf{h}_b(\cdot)$ – нелинейное преобразование координат из ПСК в БСК [2]; \mathbf{v}_b – шум измерения, пересчитанный в БСК, с ковариацией $R_b(k|k-1)$.

Преобразование $\mathbf{h}_b(\cdot)$ определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} r_b &= \sqrt{x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2 + z_{\Pi}^2} + \\ &\quad + \sqrt{(x_{\Pi} - x_{\text{пер}})^2 + (y_{\Pi} - y_{\text{пер}})^2 + (z_{\Pi} - z_{\text{пер}})^2} - L; \\ \varphi &= \arctg(x_{\Pi}/y_{\Pi}); \\ \varepsilon &= \arcsin(z_{\Pi}/\sqrt{x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2 + z_{\Pi}^2}); \\ v_b &= \frac{x_{\Pi}v_x + y_{\Pi}v_y + z_{\Pi}v_z}{\sqrt{x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2 + z_{\Pi}^2}} + \\ &\quad + \frac{(x_{\Pi} - x_{\text{пер}})v_x + (y_{\Pi} - y_{\text{пер}})v_y + (z_{\Pi} - z_{\text{пер}})v_z}{\sqrt{(x_{\Pi} - x_{\text{пер}})^2 + (y_{\Pi} - y_{\text{пер}})^2 + (z_{\Pi} - z_{\text{пер}})^2}}. \end{aligned}$$

Анцентное преобразование. Вычисление средних значений и ковариаций для нелинейных векторных функций $\mathbf{h}_b(\cdot)$ и $\mathbf{h}_a(\cdot)$ производится при помощи следующего анцентного преобразования.

Пусть необходимо преобразовать случайный n -мерный вектор χ со средним $\bar{\chi}$ и ковариацией P_{χ} нелинейной векторной функцией $\mathbf{g} = \mathbf{f}(\chi)$. Для этого [4], [7]:

1. При помощи разложения Холецкого вычисляется D – матричный квадратный корень из P_{χ} , такой, что $P_{\chi} = DD^T$.

2. Формируются $2n$ сигма-векторов \mathbf{X}_i по следующему правилу:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i &= \bar{\chi} + \sqrt{n}\mathbf{D}_i, \quad i = 1, \dots, n; \\ \mathbf{X}_i &= \bar{\chi} - \sqrt{n}\mathbf{D}_{i-n}, \quad i = n+1, \dots, 2n, \end{aligned}$$

где \mathbf{D}_i – i -й столбец матричного квадратного корня.

3. Сигма-векторы преобразуются с помощью нелинейной функции $f(\chi)$, результатом чего является набор апостериорных сигма-векторов:

$$\mathbf{G}_i = \mathbf{f}(\mathbf{X}_i), \quad i = 1, \dots, 2n.$$

4. Среднее и ковариация преобразованного случайного вектора \mathbf{g} оцениваются с использованием взвешенных апостериорных сигма-векторов:

$$\bar{\mathbf{g}} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \mathbf{G}_i; \quad P_{\mathbf{g}} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} (\mathbf{G}_i - \bar{\mathbf{g}})(\mathbf{G}_i - \bar{\mathbf{g}})^T.$$

В ходе преобразования из БСК в ПСК из измерения $\mathbf{z}_b(k)$ или оценки $\hat{\mathbf{x}}_b(2)$ получают входную оценку $\mathbf{z}_a(k)$ или $\hat{\mathbf{z}}_a(2)$, в ходе обратного преобразования из ПСК в БСК – из экстраполированной оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_a(k|k-1)$ – экстраполированную оценку вектора измерения $\hat{\mathbf{z}}_b(k|k-1)$ с соответствующими ковариациями.

Фильтрация в АФК. Уравнения АФК соответствуют уравнениям стандартного ФК. Экстраполированная оценка вектора состояния и его ковариация имеют вид:

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k|k-1) = F\hat{\mathbf{x}}_a(k-1);$$

$$P_a(k|k-1) = FP_a(k-1)F^T + Q_a,$$

а оценка вектора состояния и его ковариация:

$$\hat{\mathbf{x}}_a(k|k) = \hat{\mathbf{x}}_a(k|k-1) + K[\mathbf{z}_a(k) - H\hat{\mathbf{x}}_a(k|k-1)];$$

$$P_a(k|k) = P_a(k|k-1) - KHP_a(k|k-1),$$

где

$$K = P_a(k|k-1)H^T [HP_a(k|k-1)H^T + R_a(k)]^{-1}$$

– матричный коэффициент усиления; H – матрица наблюдения, служащая для согласования размера и состава выраженных в ПСК векторов наблюдения и состояния ансцентного фильтра.

Сравнение линейного и нелинейного фильтров в ТО ПКЛ. В предложенной схеме ТО вся фильтрация выполняется нелинейным АФК. В других известных схемах вся или по меньшей мере некоторая часть (при подтверждении) фильтрации осуществляется линейным БФК, т. е. линейный фильтр используется при нелинейной модели движения в бистатических координатах. Неадекватность линейного допущения может привести к существенному снижению точности фильтрации и сбросу сопровождения.

Пример. Пусть цель в момент начала наблюдения имеет координаты $x_{Ц} = 9000$ м, $y_{Ц} = 5000$ м,

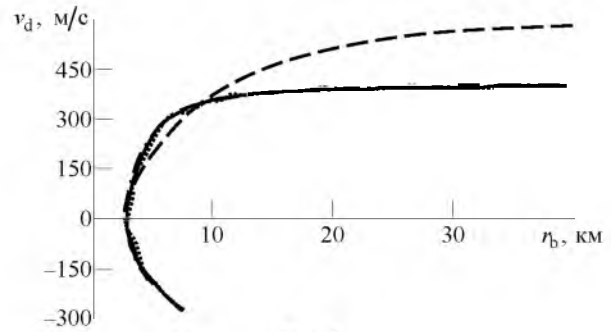


Рис. 3

$z_{Ц} = 1000$ м относительно приемной позиции, скорость 200 м/с, курс 256°, высота цели постоянна. Координаты передатчика: $x_{пер} = 8000$ м, $y_{пер} = 0$, $z_{пер} = 300$ м. СКО измерения бистатической дальности 200 м, азимута и угла места 0.5°, бистатической скорости 5 м/с; время наблюдения 150 с, интервал между измерениями 3 с. Критерий завязки 2/2, этап подтверждения отсутствует. Для наглядности представления результатов вероятности обнаружения цели и ложной тревоги приняты равными $P_d = 1$ и $F = 0$ соответственно.

На рис. 3 представлены траектория цели в бистатических координатах "дальность–скорость" (сплошная линия – положение цели, пунктирная – измерение) и результат ее сопровождения БФК (штриховая линия) и АФК (штрихпунктирная линия). На начальном участке траектории БФК уверенно сопровождает цель, однако изменение характера нелинейности в районе 100 м/с он отследить не смог, после чего результат фильтрации начал расходиться с истинной траекторией. Напротив, АФК уверенно сопровождает цель на всей траектории ее движения.

На рис. 4 приведена временная зависимость СКО σ измерений (штриховая линия) и полученных предложенным алгоритмом оценки координат в трехмерном декартовом пространстве (сплошная линия). На рис. 5 – СКО оценки скорости σ_v (для скорости исходные измерения отсутствуют). Усред-

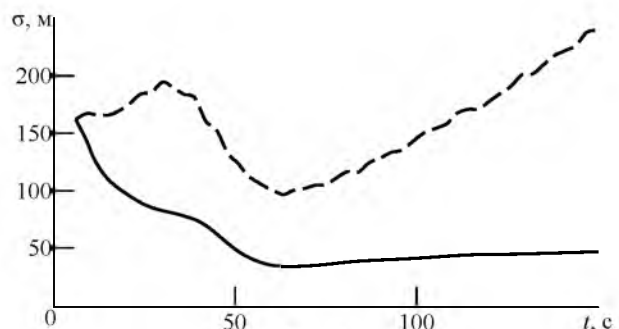


Рис. 4

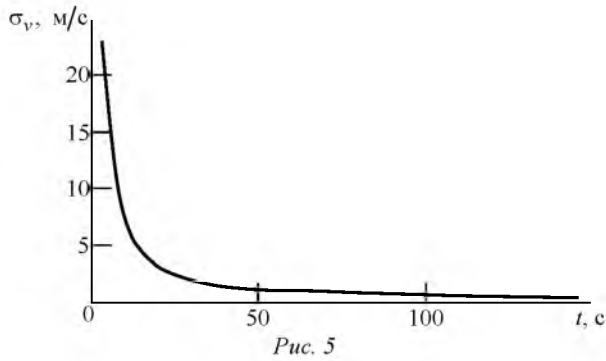


Рис. 5

нение выполнено по 1000 реализациям. В приведенном примере СКО при оценке координат составляет в установившемся режиме менее 50 м, скорости – в пределах 1...2 м/с.

Обнаружение траектории. Используется критерий $2/L + M/N$. Завязка заключается в проверке попадания второй отметки, пришедшей в момент времени t_2 , в кольцевой строб, выставленный вокруг полученной в момент времени t_1 начальной отметки. Внутренний и внешний радиусы сто́ба пропорциональны минимальной v_{\min} и максимальной v_{\max} возможным скоростям цели соответственно. В рассмотренной реализации кольцевой сто́б дополнен эллиптическим для учета погрешностей измерений [6]. Отличием ПКЛ является то, что отметки выражены в бистатистических координатах, тогда как v_{\min} и v_{\max} задаются в прямоугольных. Воспользуемся тем, что состав бистатистических измерений позволяет пересчитать отметку в ПСК. Тогда алгоритм завязки приобретает следующий вид:

1. Первая отметка преобразуется в ПСК при помощи АП: $\mathbf{z}_b(1) \rightarrow \mathbf{z}_c(1)$, причем $\mathbf{z}_b = [r_b, \alpha, \varepsilon, v_b]$, $\mathbf{z}_c = [x_{11}, y_{11}, z_{11}]^T$. Также вычисляется ковариация $R_c(1)$.

2. Аналогичным образом в ПСК преобразуется вторая отметка: $\mathbf{z}_c(2)$, $R_c(2)$.

3. Проверяется попадание второй отметки в кольцевой строб с радиусами $R_{\min} = v_{\min} \tau_2$ и $R_{\max} = v_{\max} \tau_2$. Для этого вычисляются значения $d_{12} = |\mathbf{z}_c(2) - \mathbf{z}_c(1)|$ и

$$\varepsilon = \begin{cases} -1, & d_{12} < R_{\min}; \\ 0, & R_{\min} \leq d_{12} \leq R_{\max}; \\ 1, & d_{12} > R_{\max}. \end{cases}$$

Равенство $\varepsilon = 0$ означает, что отметка попала в кольцо; стробирование на этом заканчивается.

4. При непопадании второй отметки в кольцевой строб проверяется возможность ее выхода за пределы кольца из-за погрешностей измерений. Для этого вычисляются координаты точки \mathbf{z}_m пересечения прямой, проходящей через отметки $\mathbf{z}_c(1)$ и $\mathbf{z}_c(2)$, с внешним (при $\varepsilon = 1$) или внутренним (при $\varepsilon = -1$) кольцом:

$$\mathbf{z}_m = R \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \varepsilon \\ \cos \alpha \cos \varepsilon \\ \sin \varepsilon \end{bmatrix},$$

где $R = R_{\max}$ при $\varepsilon = 1$ и $R = R_{\min}$ при $\varepsilon = -1$.

5. Вычисляется квадратичная форма

$$\rho = [\mathbf{z}_c(2) - \mathbf{z}_m]^T [R_c(1) + R_c(2)]^{-1} [\mathbf{z}_c(2) - \mathbf{z}_m].$$

6. Значение квадратичной формы сравнивается с порогом, вычисленным для заданной вероятности стробирования P_G по критерию χ^2 с тремя степенями свободы (что соответствует размеру вектора \mathbf{z}_c). Если ρ меньше порога, отметка попала в строб.

Аналогичные действия производятся для каждой отметки, полученной на обзорах по $(L-1)$ -й включительно и не попавшей в стробы отождествления других сопровождаемых и подтверждаемых траекторий. Обнаружение траектории продолжается по всем отметкам, попавшим в стробы захвата на этих обзорах.

Как и при сопровождении, на этапе подтверждения, реализующем критерий M/N , возможно использование БФК или АФК. Сравним 2 варианта: 1) подтверждение – БФК, сопровождение – АФК и 2) все выполняется АФК. Условия моделирования соответствуют описанным выше, завязка – по критерию $2/2$.

На рис. 6 показаны результаты сопровождения: зависимости погрешностей положения цели измерений от номера отсчета $\sigma(l)$ для обоих вариантов. Штриховая линия – погрешности исходных измерений. Погрешности оценки по схеме

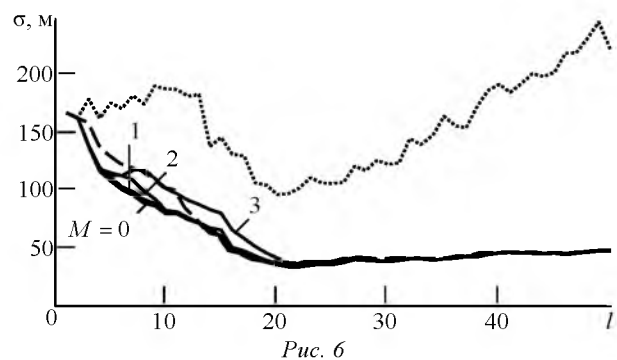


Рис. 6

БФК + АФК (сплошные линии) представлены для разных значений параметра M . Ухудшение точности с ростом M объясняется тем, что траектория дольше находится на сопровождении в БФК, и, поскольку движение нелинейное, а модель линейная, ошибка накапливается. Отсюда вывод – в такой схеме следует ограничиваться небольшими значениями M ; для достижения наилучшей точности $M = 0$, т. е. отсутствие подтверждения.

При использовании только АФК значение M не влияет на точность, поскольку в ходе подтверждения и сопровождения используются одни и те же вычисления. Результат представлен на рис. 6 пунктирной линией. Из рисунка следует, что БФК + АФК обеспечивает лучшую точность на начальной стадии. Причина – в разном способе инициализации АФК, точнее, формирования оценки скорости по координатам. В варианте БФК + АФК на каждом шаге подтверждения оцениваются скорости изменения четырех бистатических координат, формируется шестимерный вектор оценки в БСК (без ускорения по радиальной дальности), который после окончания обнаружения траектории преобразуется в ПСК при помощи АП.

В варианте с АФК каждая отметка преобразуется в ПСК, по двум соседним вычисляются скорости изменения трех прямоугольных координат. В БСК скорости вычисляются по измерениям в бистатических координатах, в ПСК – в прямоугольных. В первом случае оценка точнее, поскольку используется измерение бистатической

скорости. Поэтому представляется целесообразным совместить подтверждение с помощью АФК с его инициализацией по двум бистатическим измерениям, которые имеются по окончании завязки. Это обеспечит наиболее точную инициализацию и наиболее точное подтверждение. Фактически это схема БФК + АФК при $M = 0$, однако в этой схеме M может быть задано любым, что сохраняет этап подтверждения и позволяет управлять числом формируемых ложных траекторий. Погрешность оценки положения цели в такой схеме соответствует кривой для $M = 0$ (рис. 6). Единственная операция, выполняемая в БСК (помимо экстраполяции), – оценка скорости изменения бистатических координат по отметкам, полученным на первых двух обзорах (т. е. бистатическая фильтрация отсутствует).

Критерий сброса сопровождения – серия пропусков K отметок подряд. В пределах меньшего числа пропусков в качестве фильтрованной отметки принимается экстраполированная.

Предложенный в статье вариант двухэтапной схемы траекторной обработки для ПКЛ, в которой отождествление производится в бистатических координатах, а фильтрация при подтверждении и сопровождении траекторий – в прямоугольных при помощи нелинейного АФК, позволяет уверенно сопровождать бистатические траектории с сильно выраженными нелинейностями и обеспечивает высокую точность сопровождения в прямоугольных координатах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malanovski M. Algorithm for target tracking using passive radar // Int. J. of Electronics and Telecommunications. 2012. № 4. P. 345–350.
2. Ortenzi L., Timmoneri L., Vigilante D. Unscented Kalman filter (UKF) applied to FM band passive radar // Int. Radar Conf., Bordeaux, 12–16 Oct. 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5438493> (дата обращения 03.12.15).
3. Benavoli A., Di Lalo A. Why should we use particle filtering in FM band passive radar? // Proc. of the 5th Europ. Radar Conf., Amsterdam, 30–31 Oct. 2008. P. 344–347. URL: ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4760872 (дата обращения 03.12.15).
4. Julier S. J., Uhlmann J. K. Unscented filtering and nonlinear estimation // Proc. of the IEEE. 2004. № 3. P. 401–422.
5. Petsios M. N., Alivizatos E. G., Uzunoglu N. K. Maneuvering target tracking using multiple bistatic range and range-rate measurements // Signal processing. 2007. № 4. P. 665–686.
6. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.
7. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.

A. A. Konovalov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The target tracking system design for the passive coherent locator

The target tracking system design for the passive coherent locator creating at Saint Petersburg electrotechnical university "LETI" are discussed. The variant of two-stage scheme is proposed as an original solution. In this scheme data association for confirmed and maintained tracks is fulfilled in bistatic coordinates and filtering on the track initiation and maintenance stages is made by nonlinear unscented Kalman filter initialized by two bistatic measurements.

Passive coherent location, target tracking, bistatic filtering, unscented Kalman filter

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2015 г.