

# AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396.96, 621.396.969

К.К. Васильев, Н.В. Лучков

### ТРАЕКТОРНАЯ ОБРАБОТКА НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

**Васильев Константин Константинович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, член-корреспондент АН республики Татарстан. Окончил радиотехнический факультет и аспирантуру Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина). Заведующий кафедрой «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, учебные пособия и статьи в области статистического синтеза и анализа информационных систем. [e-mail: vkk@ulstu.ru].

**Лучков Николай Владимирович**, кандидат технических наук. Окончил радиотехнический факультет и аспирантуру на кафедре «Телекоммуникации» УлГТУ. Ведущий инженер-исследователь ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области статистических методов обработки сигналов. [e-mail: nik-lnv@mail.ru].

#### Аннотация

Рассмотрены задачи траекторной обработки радиолокационных наблюдений воздушных целей. В обеспечение траекторной обработки проведено моделирование первичных отметок радиолокационных целей с их пеленгами, углами места и амплитудами, на основе которых и сформированы для дальнейшей траекторной обработки единые координатные сигналы с максимально точными пространственными координатами и минимальной вероятностью дробления группы отметок от одной цели на две или большее число групп. Для организации траекторной обработки использованы многомодельные байесовские алгоритмы одновременного различения типов целей (моделей) и оценивания изменяющихся траекторных параметров. Описана методика вычисления размера строба для отождествления наблюдений и траекторий. Формирование набора отметок, которые в последующем используются для выделения траектории и оценки ее параметров, осуществлено при помощи операций стробирования и накопления отметок. В ходе обеих этих операций произведена селекция отметок, которые в принципе могут соответствовать отметкам от цели с известными динамическими характеристиками, а значит – потенциально составлять ее траекторию. При этом стробирование имеет дело с индивидуальными отметками, а накоплению в течение заданного временного интервала подвергаются отметки, прошедшие стробирование. Приведены математические модели изменения состояния в декартовой системе при наблюдении в сферических координатах и соответствующие уравнения нелинейного векторного оценивания. Разработан комплекс программ и представлены некоторые результаты математического моделирования процесса траекторной обработки. Таким образом, предложенные методы и алгоритмы позволяют реализовать интегрированный подход к освещению обстановки театра военных действий с использованием всех имеющихся в наличии средств и могут стать основой при разработке протоколов единого информационно-управляющего пространства реального времени.

Ключевые слова: радиолокация, статистические методы, траекторная обработка, обнаружение, различение, оценивание, нелинейный фильтр.

## TRAJECTORY PROCESSING ON THE BASIS OF NONLINEAR FILTERING

**Konstantin Konstantinovich Vasiliev**, Doctor of Engineering, Professor; Honored Worker in the science and engineering of the Russian Federation; Correspondent Member of the Tatarstan Academy of Sciences; graduated from the Faculty of Radioengineering of Leningrad Institute of Electrical Engineering named after V.I. Ulyanov (Lenin); Head of the Department of Telecommunication at Ulyanovsk State Technical University; an author of monographs, textbooks, and articles in the field of statistical synthesis and analysis of information systems. e-mail: vkk@ulstu.ru

**Nikolai Vladimirovich Luchkov**, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering and completed his postgraduate studies at the Department of Telecommunications of Ulyanovsk State Technical University; Senior Research Engineer of Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and- Production Association 'Mars'; an author of articles in the field of statistic methods of signal processing. e-mail: nik-lnv@mail.ru.

### Abstract

The issues of trajectory processing of radiolocation observations of air targets are considered. In order to provide trajectory processing, modelling of radiolocation targets primary marking with bearings, angles of sights, and sweeps was carried out. On the basis of them, the unified coordinate signals with maximum sharp spatial coordinates and minimum possibility of the marking group disintegration from one target to two or more number of groups were constructed. The multimodel Bayesian algorithms of simultaneous distinction of targets' (models') types and estimation of changing trajectory parameters are used for trajectory processing organization. The methodology of the pulse gate dimensioning for identifying observations and trajectories is described. Formation of the set of marks that will be used for detailing a trajectory and estimation of its parameters is carried out with the use of strobing operations and marks gathering. In case of the operations, selection of marks was hold. The marks can basically correspond to marks from the target with acquainted dynamic characteristics, which means that they can compound its trajectory. In this case, strobing is concerned with individual marks, and the marks strobed are gathered over a time frame. The mathematical models of state changing in the Cartesian system in case of observation in spherical coordinates and the corresponding equations of nonlinear vector estimation are considered. The software complex is developed and some results of mathematical modelling of trajectory processing are shown. Accordingly, the proposed methods and algorithms allow to realize the integrated approach to situation coverage of the theatre of military operations with the use of all means available. Also, the methods and algorithms can become the basis in development of protocols of the real-time integrated information and control space.

Key words: radiolocation, statistical methods, trajectory processing, detection, distinction, estimation, nonlinear filter.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием летательных аппаратов различного назначения все большую актуальность приобретают задачи обнаружения, идентификации и высокоточного сопровождения воздушных целей. При слежении за воздушными целями в общем случае ставится задача построения алгоритма отождествления отметок для скоростных маневрирующих целей при наличии помех. Вместе с тем при синтезе информационных систем возникают проблемы одновременного различения многих сигналов и оценивания векторных параметров, изменяющихся в процессе наблюдений. В отмеченных ситуациях особый практический интерес представляют рекуррентные методы обработки последовательности наблюдений, пригодные для построения относительно простых вычислительных программ. При этом необходимо учитывать возможности попадания в строб сопровождения отметок от соседних целей и ложных отметок, а также пересечения стробов сопровождения двух и более близко расположенных траекторий [1–8].

В ходе обнаружения траектории параллельно решаются две следующие задачи:

1. Выделение из всего набора отметок, обнаруженных за несколько последовательных обзоров пространства радиолокационной станцией (РЛС), тех, которые могут принадлежать траектории реальной цели. При этом используется априорная информация о характере движения цели в соответствии с моделью изменения ее состояния.
2. Фильтрация ложных траекторий, которые не могут описывать движение какой-либо цели. При этом учитывается, что пространственное распределение ложных отметок в зоне обзора не совпадает с ожидаемым распределением отметок от цели, определяемым моделью ее движения. Поэтому траектория, начатая с ложной отметки, с большой вероятностью не подтвердится на следующих обзорах.

В связи с тем, что наблюдения ведутся в полярной системе координат, а оценивание параметров сопровождаемых траекторий – в прямоугольной, то близким к оптимальному решению может быть применение нелинейного фильтра Калмана. Таким образом, для построения систе-

мы траекторной обработки сигналов необходимо рассмотреть применяемые математические модели и процедуру нелинейной фильтрации, а также алгоритмы завязывания траектории, стробирования и отождествления.

### 1 Модель движения цели

Основным способом представления изменяющихся параметров модели движения являются случайные последовательности (СП). Необходимо, чтобы математическая модель позволяла решать задачи анализа и синтеза так, чтобы была возможность по известным параметрам модели определить, какие вероятностные свойства имеет описываемое этой моделью движение той или иной воздушной цели, и наоборот, можно было бы так выбрать параметры модели, чтобы она описывала движение воздушной цели с заданными свойствами. Для обеспечения технической реализуемости задач траекторной обработки в реальном масштабе времени опишем движение цели в декартовых координатах  $(x_i, y_i, z_i)$  с помощью простейшей линейной модели марковской СП [2–5]:

$$\bar{x}_i = \varphi_i \bar{x}_{i-1} + \bar{\xi}_i, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где  $\bar{x}_i = (x_i \ y_i \ z_i \ v_{ix} \ v_{iy} \ v_{iz})^T$ ;

$v_{ix}, v_{iy}, v_{iz}$  – проекции скорости;

$$\varphi_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & t_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & t_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$t_i$  – промежуток времени между отсчетами наблюдений на шаге  $(i-1)$  и шаге  $(i)$ ;

$$\bar{\xi}_i = (0 \ 0 \ 0 \ \xi_{ivx} \ \xi_{ivy} \ \xi_{ivz})^T$$

– порождающий белый гауссовский шум с ковариационной матрицей

$$V_{\xi} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_x^2 \frac{t_i}{t_0} \sigma_{vx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_y^2 \frac{t_i}{t_0} \sigma_{vy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_z^2 \frac{t_i}{t_0} \sigma_{vz}^2 \end{pmatrix}.$$

где  $\sigma_{vx}, \sigma_{vy}, \sigma_{vz}$  – априорные значения среднеквадратичных отклонений (СКО) проекций скорости.

Параметр  $\gamma_x = \sigma_{vx} / v_{x0}$  определяет относительное среднее значение изменения скорости цели за время обзора РЛС  $t_0$ . Если  $\gamma_x = 0$ , то  $v_{xi} = v_{x0}$ , т. е. скорость не изменится. При  $\gamma_x = 0,01$  – скорость изменится на 1% и т. д.

### 2 Модель наблюдений

В качестве модели наблюдений за объектом будем использовать следующую систему уравнений в сферической системе радиолокационных координат:

$$\bar{z}_i = h(\bar{x}_i) + \bar{n}_i, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где  $\bar{z}_i = (z_{Di} \ z_{Ai} \ z_{Bi})^T$ ;  $z_{Di}$  – наблюдаемая дальность до цели;  $z_{Ai}$  – наблюдаемый пеленг до цели;  $z_{Bi}$  – наблюдаемый угол места до цели;

$$h(\bar{x}_i) = \begin{pmatrix} \sqrt{(x_i)^2 + (y_i)^2 + (z_i)^2} \\ \arctg(y_i/x_i) \\ \arctg\left(\frac{z_i}{\sqrt{(x_i)^2 + (y_i)^2}}\right) \end{pmatrix},$$

$\bar{n}_i = (n_{Di} \ n_{Bi} \ n_{Ai})^T$  – аддитивный белый шум с нулевым средним и ковариационной матрицей

$$V_{ni} = \begin{pmatrix} \sigma_{nDi}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{nAi}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{nBi}^2 \end{pmatrix};$$

$\sigma_{nDi}$  – СКО наблюдений по дальности;

$\sigma_{nAi}$  – СКО наблюдений по пеленгу;

$\sigma_{nBi}$  – СКО наблюдений по углу места.

На основе представленных формул могут быть непосредственно реализованы алгоритмы рекуррентного оценивания векторных изменяющихся параметров на основе асинхронных наблюдений нескольких РЛС.

### 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КООРДИНАТ И ВЫЧИСЛЕНИЕ РАЗМЕРА СТРОБА

Поскольку в процессе траекторной обработки, как правило, сопровождается множество целей на фоне помех, необходимо предварительное отождествление наблюдаемых отметок с траекториями.

В ходе стробирования для каждой траектории выполняются следующие операции:

- последнее известное положение цели экстраполируется (предсказывается) на момент прихода отметки на текущем обзоре (в предположении о неизменном в течение этого интервала характере ее движения);

- определяются размер и ориентация в пространстве строба сопровождения (строб – это область пространства вокруг экстраполированной отметки, в которой с некоторой вероятностью, как правило, близкой к единице, должна оказаться цель), при этом учитываются погрешности текущего измерения и ошибки экстраполяции;

- формируется набор полученных на данном обзоре отметок, которые попадают в строб сопровождения данной траектории.

После получения отметок наблюдений на текущем обзоре определяется экстраполированное значение параметров цели:

$$\hat{x}_{zi} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{zi} \\ \hat{y}_{zi} \\ \hat{z}_{zi} \\ \hat{v}_{xzi} \\ \hat{v}_{yzi} \\ \hat{v}_{zzi} \end{pmatrix} = \varphi_i \hat{x}_{z(i-1)} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{i-1} + t_i \hat{v}_{x(i-1)} \\ \hat{y}_{i-1} + t_i \hat{v}_{y(i-1)} \\ \hat{z}_{i-1} + t_i \hat{v}_{z(i-1)} \\ \hat{v}_{x(i-1)} \\ \hat{v}_{y(i-1)} \\ \hat{v}_{z(i-1)} \end{pmatrix}$$

и экстраполированные значения ковариационной матрицы ошибок фильтрации:

$$P_{zi} = \varphi_i P_{z(i-1)} \varphi_i^T + V_{\xi_i},$$

где  $P_{z(i-1)}$  – ковариационная матрица ошибок фильтрации, вычисленная на предыдущем шаге.

Все стробы формируются в сферической системе координат, задавая для каждого очередного строба центр в точке  $(D_{zi}, \alpha_{zi}, \beta_{zi})$ ,  $i=2, 3, \dots$ , и размеры строба  $(\Delta D_i, \Delta \alpha_i, \Delta \beta_i)$ ,  $i=2, 3, \dots$ , по дальности азимуту и углу места соответственно. При этом отметка с координатами считается находящейся в стробе, если выполняются все три неравенства:

$$\begin{aligned} D_{zi} - \Delta D_i &\leq z_{Di} \leq D_{zi} + \Delta D_i, \\ \alpha_{zi} - \Delta \alpha_i &\leq z_{Ai} \leq \alpha_{zi} + \Delta \alpha_i, \\ \beta_{zi} - \Delta \beta_i &\leq z_{Bi} \leq \beta_{zi} + \Delta \beta_i. \end{aligned}$$

Значения  $(\Delta D_i, \Delta \alpha_i, \Delta \beta_i)$  вычисляются на каждом шаге исходя из общей ошибки фильтрации на текущем шаге, которая складывается из экстраполированной ошибки фильтрации и текущих ошибок наблюдений:

$$\begin{aligned} \Delta D_i &= 3\sqrt{P'_{11i}}; \Delta \alpha_i = 3\sqrt{P'_{22i}}; \Delta \beta_i = 3\sqrt{P'_{33i}}, \\ P'_i &= P_{zi} + V_{ni}, \\ P'_{zi} &= H_i P_{zi} H_i^T, \end{aligned}$$

где  $P'_{zi}$  – ковариационная матрица экстраполированной ошибки оценки координат в полярной системе координат на текущем шаге фильтрации;

$H_i$  – матрица преобразования прямоугольных координат в полярные;

$V_{ni}$  – матрица ошибок наблюдений.

Если в строб сопровождения некоторой траектории попала только одна отметка, считается, что именно она соответствует данной цели. Если же в стробе оказалось несколько отметок, возникает необходимость во втором этапе – этапе отождествления, на котором из нескольких отметок выбирается одна, с наибольшей вероятностью принадлежащая данной траектории. Если в строб сопровождения траектории не попало ни одной отметки, то проверяется критерий сброса траектории и, если он не выполняется, за текущее положение цели принимается экстраполированная оценка. Отметки, которые не попали в строб сопровождения ни одной из траекторий, принимаются за первые отметки новых траекторий.

#### 4 ЗАВЯЗЫВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ

После получения координат цели  $(z_{0D}, z_{0A}, z_{0B})$ , не входящих ни в один из имеющихся стробов сопровождения, считаем, что эта точка является возможным началом траектории, и первому значению параметров цели присваиваем следующее значение:

$$\hat{x}_0 = \begin{pmatrix} z_{0D} \cos(z_{0A}) \cos(z_{0B}) \\ z_{0D} \sin(z_{0A}) \cos(z_{0B}) \\ z_{0D} \sin(z_{0B}) \\ v_{\max X} \\ v_{\max Y} \\ v_{\max Z} \end{pmatrix}$$

с ковариационной матрицей дисперсии ошибок оценки

$$P_0 = \left( \frac{\partial \hat{x}_0}{\partial \bar{z}} \right) V \left( \frac{\partial \hat{x}_0}{\partial \bar{z}} \right)^T.$$

#### 5 ВЫЧИСЛЕНИЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛИ

Если отметка попала в построенный строб, то вычисляется оценка значения положения цели  $\hat{x}_i$  с учетом очередного наблюдения  $\bar{z}_i$ :

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{zi} + P_i H_i^T V_{ni}^{-1} (\bar{z}_i - h(\hat{x}_{zi}))$$

и ковариационную матрицу ошибок фильтрации на текущем шаге:

$$P_i = P_{zi} - P_{zi} H_i^T (H_i P_{zi} H_i^T + V_{ni})^{-1} H_i P_{zi},$$

где  $H_i = \left( \frac{\partial h(\hat{x}_{zi})}{\partial \hat{x}_{zi}} \right)$ .

#### 6 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ

Для исследования эффективности предложенных алгоритмов траекторной обработки на основе нелинейной фильтрации был разработан программный комплекс, позволяющий проводить ряд экспериментов:

- моделировать несколько траекторий движения целей;
- задавать различные типы моделей движения для реализации многомодельной фильтрации [1–8];
- моделировать наблюдения от нескольких разнесенных в пространстве РЛС;
- отображать в прямоугольной системе координат истинную траекторию, первичную радиолокационную информацию, результаты первичной и траекторной обработок;
- отображать изменения размеров стробов обнаружения по дальности, пеленгу и углу места.

Имеется возможность получения статистических характеристик исследуемых СП, подбора подходящих параметров модели.

Программный комплекс реализован на объектно-ориентированном языке Microsoft Visual C++ и работает на платформе Windows.

На рисунке 1 представлены результаты первичной обработки радиолокационной информации с заданными моделью движения цели и точностными характеристиками РЛС, а также результаты траекторной обработки на основе рассмотренного нелинейного фильтра.

На рисунке 2 отображены значения стробов по пеленгу в течение движения цели вдоль оси координат  $X$  и соответствующие значения расстояний в радианах между

экстраполированным значением траектории  $\hat{x}_{zi}$  и наблюдением  $\bar{z}_i$  на текущем шаге.

При этом на рисунке 2 можно наблюдать адаптивное изменение строба обнаружения новых отметок для формирования траектории, причем размеры строба принимают оптимальные значения, позволяющие, с одной стороны, не пропустить наблюдения, а с другой стороны, не включать в свой состав помехи и отметки, не относящиеся к данной траектории движения цели. Анализ представленных и многих других результатов моделирования позволяет убедиться в эффективности предложенных алгоритмов траекторной обработки.

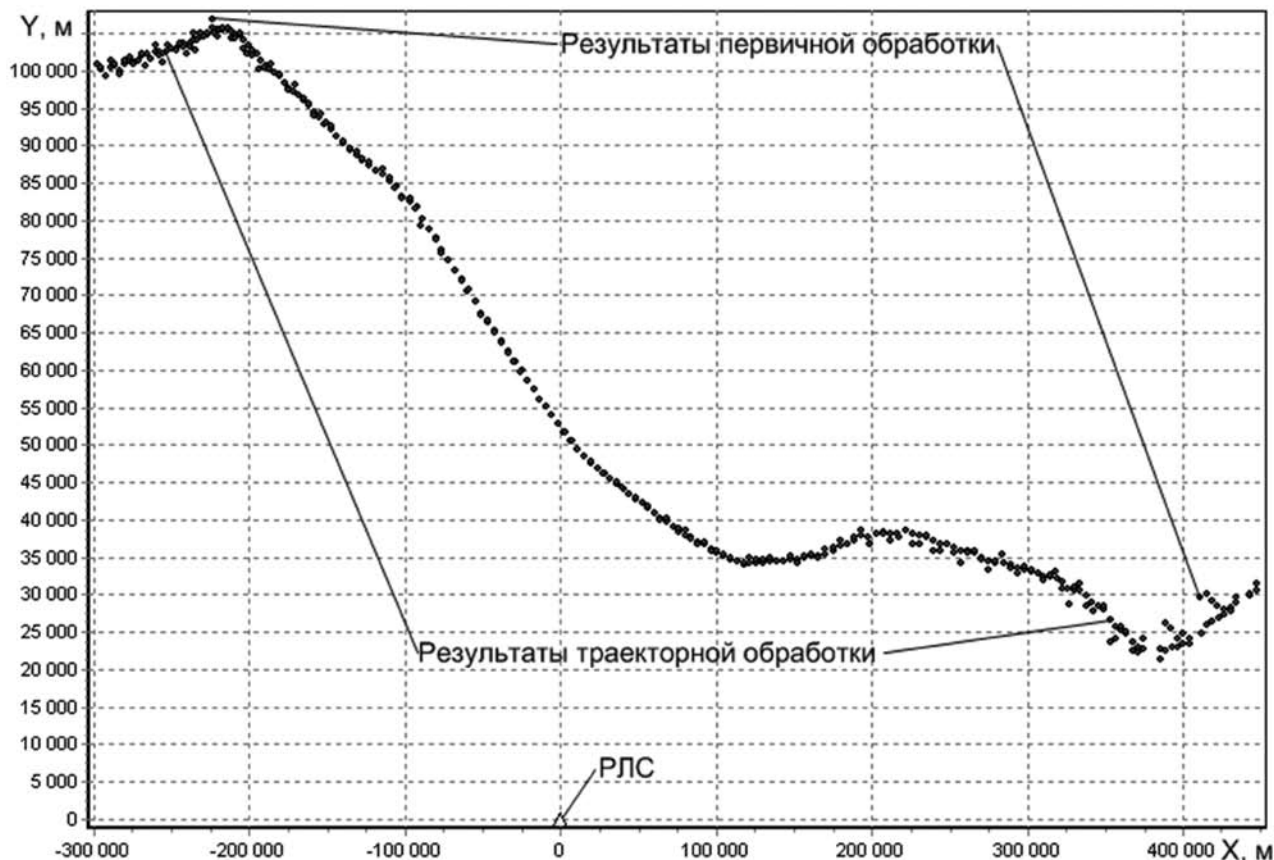


Рис. 1. Реализация обработки радиолокационной информации

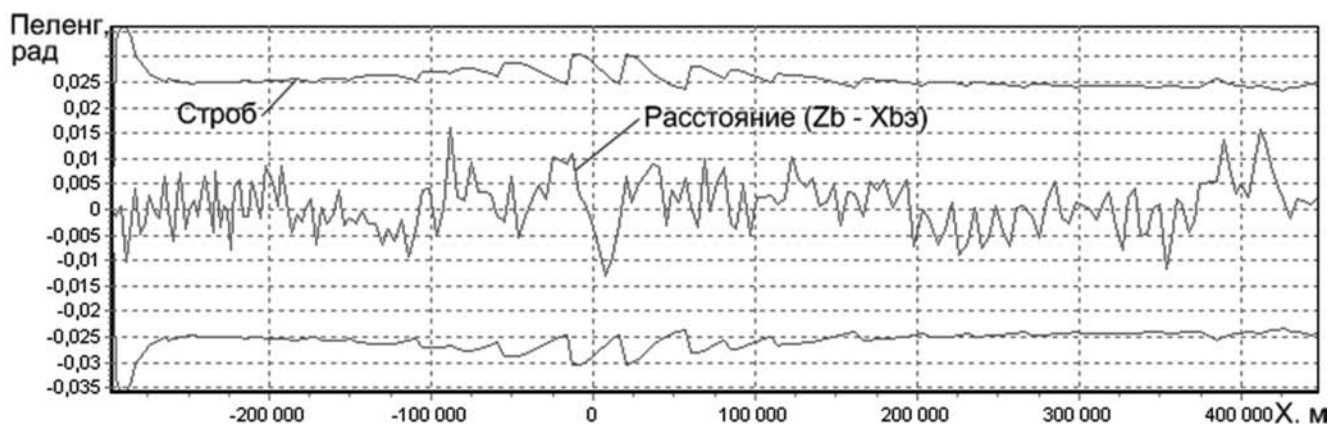


Рис. 2. Реализация строба сопровождения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена и реализована алгоритмически и программно классическая схема основных этапов траекторной обработки сигналов РЛС. Использование нелинейного фильтра позволяет выполнять наблюдения и стробирование отметок в сферических координатах, а на этапе сопровождения оценивать параметры движения цели в прямоугольных координатах, что обеспечивает возможность сохранения линейных пространственных траекторий. Предложенный подход к формированию решающих статистик позволяет для рассмотренных и более сложных моделей находить рекуррентные оптимальные процедуры траекторной обработки информации от любого числа источников.

Созданный универсальный программный комплекс моделирования основных этапов обработки радиолокационной информации может быть использован, например, для разработки элементов корабельных АСУ при решении задач автоматического захвата и сопровождения воздушных целей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационные технологии в радиотехнических системах / под ред. И.Б. Федорова.– М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 260 с.
2. Васильев К.К., Павлыгин Э.Д., Гуроров А.С. Многомодельные алгоритмы обработки данных системы мобильных РЛС // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 4 (38). – С. 4–13.
3. Рязанцев Л.Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретном времени // Вестник ТГТУ. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 729–739.
4. Создание мобильной многопозиционной радиолокационной системы на основе канала связи РТК-2 и современных методов обработки радиолокационной информации / Н.В. Лучков [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 4 (30). – С. 34–39.
5. Васильев К.К. Оптимальная обработка сигналов в дискретном времени : учеб. пособие. – М. : Радиотехника, 2016. – 288 с.
6. Лучков Н.В. Анализ объединения данных РЛС, их временная и пространственная привязки // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 1 (39) – С. 21–26.
7. Лучков Н.В. Сравнительный анализ алгоритмов объединения данных // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : сб. науч. тр. девятой Всерос. НПК. – Ульяновск, 2015. – С. 36.
8. Информационные технологии в радиотехнических системах / под ред. И.Б. Федорова.– М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 260 с.

### REFERENCES

1. *Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh*. Pod red. I.B. Fedorova [Information Technologies in Radio Systems. Under the Editorship of I.B. Fedorov]. Moscow, MSTU im. N.E. Bauman Publ, 2003. 260 p.
2. Vasilev K.K., Pavlygin E.D., Gutorov A.S. *Mnogomodelnye algoritmy obrabotki dannykh sistemy mobilnykh RLS* [The Multi-model Data Processing Algorithms of the Mobile Radar System]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2014, no. 4 (38), pp. 4–13.
3. Riazantsev L.B. *Mnogomodelnoe baiesovskoe otsenivanie vektora sostoianiia manevrennoi vozduшной tseli v diskretnom vremeni* [Multi-Model Bayesian Estimation of Maneuvering Air Target Vector in Discrete Time]. *Vestnik TGTU* [Transactions of Tambov State Technical University], 2009, vol. 15, no. 4, pp. 729–739.
4. Luchkov N.V. et al. *Sozdanie mobilnoi mnogopozitsionnoi radiolokatsionnoi sistemy na osnove kanala sviazi RTK-2 i sovremennykh metodov obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Creation of Mobile Multi-position Radar System Based Oncommunications Channel Rtk-2 and Modern Methods of Radar Information Processing]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2012, no. 4 (30), pp. 34–39.
5. Vasilev K.K. *Optimalnaia obrabotka signalov v diskretnom vremeni. Uchebnoe posobie* [Optimal Signal Processing in Discrete Time. Textbook]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 288 p.
6. Luchkov N. V., *Analiz obedineniia dannykh RLS, ikh vremennaia i prostranstvennaia priviazki* [An Analysis of Radar Data Multiplexing, Time and Spatial Bindings]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 1 (39), pp. 21–26.
7. Luchkov N.V. *Sravnitelnyi analiz algoritmov obedineniia dannykh* [Comparative Analysis of Data Multiplexing]. *Sovremennye problemy sozdaniia i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem. Sb. nauch. tr. deviatoi Vseros. NPK* [Proc. of the 9th Russian Sci. Workshop. Modern Problems of Radio System Creation and Operation ]. Ulyanovsk, 2015, p. 36.
8. *Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh*. Pod red. I.B. Fedorova [Information Technologies in Radio Systems. Under the Editorship of I.B. Fedorov]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2003. 260 p.