

Г. Г. Бундин¹, В. Б. Поляков², Д. В. Павлов³¹ АО «НПП «Радар ммс», ² СПбПУ, ³ СПб УГПС МЧС России

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ

В статье приведен анализ эффективности алгоритма фильтрации параметров траектории с помощью статистического моделирования для случая совмещения источника информации с пунктом объединения радиолокационных изображений (РЛИ). Приведены характеристики основных объектов моделирования.

Ключевые слова: калмановская фильтрация, последовательное сглаживание на основе α - и β -фильтров, многопозиционная система локации, вектор наблюдения, вектор состояния.

Оценка эффективности разработанного алгоритма фильтрации параметров траектории проводилась методом статистического моделирования на ЭВМ основных операций двухэтапного варианта обработки РЛИ. Моделирование проводилось по следующим элементам:

- пункт объединения РЛИ и пространственно разнесенные источники как элементы многопозиционной системы локации;
- траектория локационного объекта;
- операции первичной обработки информации и алгоритм фильтрации параметров траектории на этапе объединения РЛИ.

При моделировании элементов многопозиционной системы локации задавались координаты точек стояния двух источников РЛИ в прямоугольной системе координат пункта объединения (X_{01} , Y_{01} ; X_{02} , Y_{02}), а также углы сближения меридианов (μ_{01} , μ_{02}). Было принято, что радиолокационные станции (РЛС) пространственно разнесенных источников реализуют круговой обзор пространства по азимуту с периодом T_0 и параллельный (многолучевой) обзор по углу места. Качество первичной обработки РЛИ источников информации характеризовалось среднеквадратическими погрешностями измерения сферических координат σ_{r1} , $\sigma_{\beta1}$, $\sigma_{\epsilon1}$ (для первого источника) и σ_{r2} , $\sigma_{\beta2}$, $\sigma_{\epsilon2}$ (для второго источника).

Параметры моделируемой траектории рассчитывались согласно выражению для гауссово-марковской модели в прямоугольной системе координат $XУН$ пункта объединения РЛИ. Результат моделирования траектории представлялся массивом отсчетов вектора состояния:

$$V_S = \{X_V, Y_V, H_V, t_V\} \quad (1)$$

с дискретностью $T_0 = t_V - t_{V-1}$.

Моделируемые координаты X_V , Y_V , H_V содержали детерминированную $\alpha_V = b_{V-1}(\alpha_{V-1})$ и случайную μ_{V-1} составляющие. Детерминированная составляющая определялась заданными параметрами закона прямолинейного равномерного движения, а случайная – составляющими μ_x , μ_y , μ_H вектора $\mu = |\mu| \arg\{\mu\}$, где $|\mu|$ – нормально распределенная величина, а $\arg\{\mu\}$ – равновероятное направление в системе координат $XУН$.

Моделирование процессов первичной обработки РЛИ сводилось к формированию двух последовательностей векторов наблюдения:

$$V_{N1}(r_c, \beta_c, \epsilon_c, t_c); \quad (2)$$

$$V_{N2}(r_s, \beta_s, \epsilon_s, t_s), \quad (3)$$

где c, s – порядковые номера первичных измерений.

Для получения данных последовательно выполнялись следующие операции:

1. Координаты вектора состояния $V_S = \{X_V, Y_V, H_V, t_V\}$ пересчитывались на моменты времени $t_c = t_V + \Delta t_1$ (для вектора V_{N1}) и $t_s = t_V + \Delta t_2$ (для вектора V_{N2}). Разностью интервалов $\Delta t_1 - \Delta t_2$ определялась степень неравнодискретности потока входных данных, подлежащих фильтрации в пункте объединения РЛИ.
2. Последовательности векторов состояния, привязанные к моментам t_c и t_s , пересчитывались из прямоугольной в сферические системы координат первого и второго источников РЛИ соответственно.
3. Для каждого источника РЛИ моделировался процесс измерения сферических координат. Эта процедура сводилась к генерированию

совокупности аддитивных независимых гауссовых погрешностей $\{\sigma_{r_c}, \sigma_{\beta_c}, \sigma_{\varepsilon_c}, \sigma_{r_s}, \sigma_{\beta_s}, \sigma_{\varepsilon_s}\}$ с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями, определяемыми точностными характеристиками РЛС и дальностями цели. Элементы $r_c, \beta_c, \varepsilon_c, r_s, \beta_s, \varepsilon_s$ векторов (2), (3) формировались путем суммирования сферических координат векторов состояния (пересчитанных в области векторов наблюдения) с соответствующими погрешностями по независимым координатам r, β, ε .

Полученные совокупности (2), (3) объединялись в единый вектор наблюдения, в котором очередность элементов определялась нарастающими значениями параметров t_c и t_s :

$$V_N = \{r_p, \beta_p, \varepsilon_p, t_p, S_j\}, \quad (4)$$

где i – порядковый номер вектора наблюдения ($i = 1 \dots N$); S_j – признак принадлежности вектора наблюдения к j -му ($j = 1, 2$) источнику информации.

Модель алгоритма фильтрации параметров траектории реализовывалась согласно уравнениям (5), (6):

$$\alpha_n^* = b_{n-1}(\alpha_{n-1}^*) + C_n^{-1} H_n^m C_{\Theta_n} \left\{ \Theta_n^* - h_n [b_{n-1}(\alpha_{n-1}^*)] \right\}, \quad (5)$$

$$C_n = (B_{n-1} C_{n-1}^{-1} B_{n-1}^T + Q_{n-1})^{-1} + H_n^T C_{\Theta_n} H_n, \quad (6)$$

матричные выражения которых достаточно подробно рассмотрены в [1].

Проведем анализ результатов статистического моделирования при совмещении источника информации с пунктом объединения РЛИ. Далее приведена простейшая ситуация, при которой моделируемые алгоритмы (5) и алгоритм последовательного сглаживания (использующий α - и β -фильтры) [1, 3] реализуют оценивание параметров траектории по данным одного источника информации, расположенного в точке стояния пункта объединения РЛИ ($X_{01} = Y_{01} = 0; \mu_{01} = 0$). То есть рассматриваемому условию соответствует случай вторичной обработки РЛИ, при котором входные данные являются практически равнодискретными и равноточными (по крайней мере, на интервале соседних шагов фильтрации).

Для получения значений первичных измерений в горизонтальной плоскости X, Y , то есть значений векторов наблюдения в пространстве вектора состояния, смоделирована траектория равномерного прямолинейного движения, начальными параметрами которой являлись $X_1 = 95$ км, $Y_1 = 160$ км, $H_1 = 1$ км, $V_x = -0,45$ км/с, $V_y = -0,62$ км/с, $V_H = 0$ км/с. Временной интервал моделирования при периоде обзора $T_0 = 10$ ограничен 320 секундами,

т.е. порядковые номера (v, i) векторов состояния и наблюдения изменялись от 1 до 33. При генерировании погрешностей первичных измерений сферических координат считалось, что источник РЛИ характеризуется среднеквадратическими погрешностями $\sigma_r = 0,4$ км, $\sigma_\beta = 0,3$ град, $\sigma_\varepsilon = 0,3$ град на максимальной дальности $r_{\max} = 300$ км. Далее приведен анализ результатов статистического моделирования.

На рис. 1 и 2 жирными линиями (кривыми 1) представлены оценки показателей качества фильтрации при использовании разработанного алгоритма (далее для краткости – алгоритма фильтрации). Для сравнительного анализа на данных рисунках пунктиром (кривыми 2) показаны аналогичные оценки для алгоритма последовательного сглаживания (далее – алгоритм сглаживания) на основе α - и β -фильтров.

Кривые, приведенные на рис. 1, представляют собой математические ожидания погрешностей фильтрации $M_\phi\{\delta\alpha_i\}$ и сглаживания $M_{\text{сгл}}\{\delta\alpha_i\}$ координаты X по трассе полета цели. Анализ данных зависимостей свидетельствует о том, что на моделируемом интервале сопровождения цели математические ожидания погрешностей фильтрации и сглаживания достаточно близки к нулю. Наблюдаемые отклонения от нуля, не превышающие единиц метров, обусловлены конечным числом испытаний и, по-видимому, псевдослучайным характером используемого датчика случайных чисел. Данный вывод подтверждается знакопеременным поведением значений $M_\phi\{\delta\alpha_i\}, M_{\text{сгл}}\{\delta\alpha_i\}$ на интервале сопровождения цели. Поэтому правомерно считать, что получаемые оценки вектора состояния α^* для рассматриваемых алгоритмов являются несмещенными.

Перейдем к анализу среднеквадратических погрешностей фильтрации ($\sigma_{\phi X}, \sigma_{\phi Y}, \sigma_{\phi H}$) и сглаживания ($\sigma_{\text{сгл} X}, \sigma_{\text{сгл} Y}, \sigma_{\text{сгл} H}$) вектора состояния α . Зависимости перечисленных параметров от пространственного положения цели для случая совмещения системы обработки с источником РЛИ показаны на рис. 2а–2в.

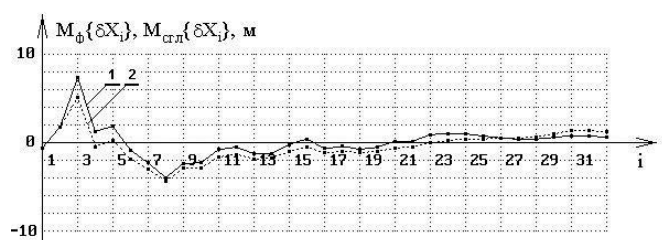


Рисунок 1. Математические ожидания погрешностей фильтрации (кривая 1) и сглаживания (кривая 2) координаты X

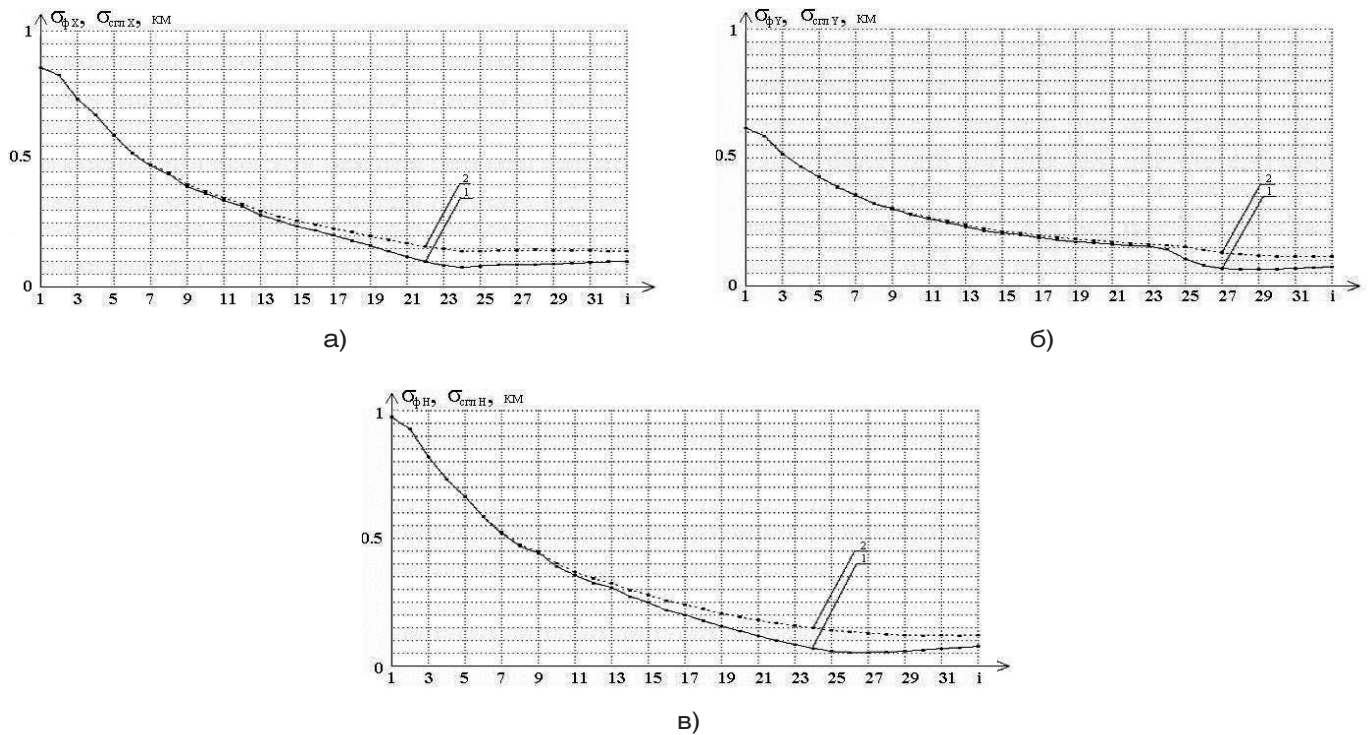


Рисунок 2. Среднеквадратические погрешности фильтрации (кривые 1) и сглаживания (кривые 2) вектора состояния α : а) по координате X; б) по координате Y; в) по координате H

Как следует из графиков, представленных на рис. 2, анализируемые алгоритмы практически равнозначны для дальностей цели более 100 км (на графиках для i от 1 до 10...15). На меньших дальностях ($i = 25...33$) точность фильтрации вектора состояния α примерно в два раза выше точности сглаживания.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы. Алгоритм фильтрации в системах, совмещенных с источником РЛИ, не уступает алгоритму последовательного

сглаживания по точности оценивания вектора состояния. Учитывая, что оценки сглаживания являются эффективными и состоятельными [2; 4], перечисленные качества, очевидно, можно перенести и на оценки фильтрации. Данное заключение подтверждается характером зависимостей значений $\sigma_{\phi X}$, $\sigma_{\phi Y}$, $\sigma_{\phi H}$ (рисунок 2а–2в), которые монотонно уменьшаются с увеличением числа первичных измерений. Заметим, что данный характер изменения $\sigma_{\phi X}$, $\sigma_{\phi Y}$, $\sigma_{\phi H}$ сохраняется, если погрешности первичных измерений не увеличиваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бундин, Г.Г., Поляков, В.Б., Павлов, Д.В. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов фильтрации и сглаживания для случая пространственно разнесенных источников радиолокационной информации // Радиопромышленность. – 2015. – № 2. – С. 68–75.
2. Кузьмин, С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Советское радио, 1974.
3. Ширман, Я.Д., Лосев, Ю.И., Минервин, Н.Н., Москвитин, С.В., Горшков, С.А., Леховицкий, Д.И., Левченко, Л.С. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998.
4. Кузьмин, С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – Киев: КВиЦ, 2000.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бундин Герман Георгиевич, д.т.н, старший научный сотрудник, АО «НПП «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37.

Поляков Вадим Борисович, д.т.н., доцент, профессор кафедры системы и технологии управления, Институт компьютерных наук и технологий (ИКНТ), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: vadim7702@yandex.ru.

Павлов Дмитрий Владимирович, старший преподаватель Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 149, e-mail: dvp24.vv@mail.ru.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ALGORITHM OF A TRAJECTORY PARAMETERS FILTRATION

The article contains the analysis of efficiency of the algorithm of a trajectory parameters filtration by means of statistical modeling for the case of combination of a source of information with point of combination of radar information. Characteristics of the main objects of modeling are provided.

Keywords: Kallman's filtration, consecutive smoothing on the basis of a- and b-filters, multiposition location system, observation vector, state vector.

REFERENCES

1. Bundin, G.G., Polyakov, V.B., Pavlov, D.V. *Sravnitel'nyi analiz effektivnosti algoritmov fil'tracii i sglazhivaniya dlya sluchaya prostranstvenno raznesennykh istochnikov radiolokacionnoi informacii // Radiopromyshlennost'.* – 2015. – № 2. – S. 68–75.
2. Kuz'min, S.Z. *Osnovy teorii cifrovoi obrabotki radiolokacionnoi informacii.* – M.: Sov. Radio. – 1974.
3. Shirman, Ya.D., Losev, Yu.I., Minervin, N.N., Moskvitin, S.V., Gorshkov, S.A., Lehovickii, D.I., Levchenko, L.S. *Radioelektronnyye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya: spravochnik / Pod red. Ya. D. Shirmana.* – M.: ZAO «MAKVIS», 1998.
4. Kuz'min, S.Z. *Cifrovaya radiolokaciya. Vvedenie v teoriyu.* – Kiev: KViC, 2000.

AUTHORS

Bundin German, Dr. Sc. in Technical Sciences, Senior Staff Scientist, «NPP «Radar mms»» JSC, Russian Federation, 197375, Saint-Petersburg, Novosel'kovskaya st., 37,

Polyakov Vadim, Dr. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Chair Systems and control technologies, Institute of computer sciences and technologies, Peter the Great St. Petersburg Politechnic University, Russian Federation, 195251, Saint-Petersburg, Polytekhnicheskaya st., 29, e-mail: vadim7702@yandex.ru.

Pavlov Dmitriy, senior lecturer at Saint-Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, Russian Federation, 196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy pr., 149, e-mail: dvp24.vv@mail.ru.