

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.969.1

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-55-62>

Алгоритм коррекции координат цели в информационно-измерительной системе радиолокационной станции на основе информации о пространственной ориентации

У. Р. Наимов✉

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

✉ umed87-88@mail.ru

Аннотация

Введение. Концепции построения перспективных радиолокационных систем предусматривают, что это будут комплексы интегрального типа. Создание таких систем предполагает наличие в их составе информационного комплекса, выполняющего функционально завершённую процедуру обработки сигналов и информации в интересах решения конкретной задачи. В этой связи в настоящей статье рассмотрены особенности создания модели маневренного движения беспилотного летательного аппарата с целью исследования путей повышения точности сопровождения воздушной цели на основе алгоритмов оценивания координат ее движения.

Цель работы. Разработка алгоритма коррекции координат цели на основе информации о пространственной ориентации.

Материалы и методы. Поставленные задачи решены методами математического анализа и численного моделирования. Для обоснования достоверности и работоспособности предложенного алгоритма была разработана модель, которая позволила получить характеристики точности алгоритма.

Результаты. Методом моделирования исследованы характеристики точности алгоритма коррекции координат цели на основе информации о ее пространственной ориентации, определяющей качество системы слежения за целью и построения ее траектории. Приведены структура и описание разработанного алгоритма. Показан вариант реализации алгоритма и результаты оценки его точности.

Заключение. В результате анализа алгоритма коррекции координат цели на основе информации о ее пространственной ориентации, а также моделирования работы сделан вывод о достоверности и работоспособности предложенного алгоритма. Представленные данные численных экспериментальных исследований характеристик точности предложенного алгоритма показали реализуемость принятых решений. Полученные результаты позволяют определить наиболее целесообразный и эффективный путь разработки упрощенных вариантов алгоритма.

Ключевые слова: радиолокационная станция, оптико-электронный канал, маневрирующая цель, линия визирования, коррекция траектории, цифровой вычислитель

Для цитирования: Наимов У. Р. Алгоритм коррекции координат цели в информационно-измерительной системе радиолокационной станции на основе информации о пространственной ориентации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 55–62. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-55-62

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.11.2019; принята к публикации после рецензирования 10.02.2020; опубликована онлайн 29.04.2020



Algorithm for Correcting Target Coordinates in the Information-Measuring System of a Radar Station Based on Information about Spatial Orientation

Umejan R. Naimov✉

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

✉ umed87-88@mail.ru

Abstract

Introduction. The concepts of constructing promising radar systems (radars) show that these will be integral type complexes. The creation of such systems implies the presence in their composition of an information system consisting of channels that produce a functionally completed procedure for processing signals and information to solve a definite task.

Aim. Development of a target coordinate correction algorithm based on spatial orientation information.

Materials and methods. The tasks were solved by methods of mathematical analysis and numerical modeling. To justify reliability and performance of the proposed algorithm, a model was developed. The model allowed one to obtain accuracy characteristics of the algorithm.

Results. As a result of the simulation, the accuracy characteristics of the target coordinate correction algorithm based on spatial orientation information were investigated. It determines the quality of building of the target trajectory and the quality of the target tracking system.

The structure and the description of the developed algorithm were given, an implementation option was shown. The results of estimation of the accuracy of the algorithm were presented.

Conclusion. As a result of the analysis of the target coordinate correction algorithm based on information about the target's spatial orientation, as well as modeling of its operation, a conclusion about the reliability and the performance of the proposed algorithm was drawn. The presented data of experimental studies on the accuracy characteristics of the proposed algorithm showed the feasibility of the decisions made. The presented results allow one to determine the most appropriate and effective way to develop simplified versions of the algorithm.

Keywords: radar station, optoelectronic channel, maneuvering target, line of sight, path correction, computer

For citation: Naimov U. R. Algorithm for Correcting Target Coordinates in the Information-Measuring System of a Radar Station Based on Information about Spatial Orientation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 55–62. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-55-62

Conflict of interest. Author declares no conflict of interest.

Submitted 21.11.2019; accepted 10.02.2020; published online 29.04.2020

Введение. Воздействие различных видов помех на устройства и каналы радиолокационной системы (РЛС) или оптико-локационной системы (ОЛС) может привести к ухудшению точности сопровождения, а в ряде случаев (например, при воздействии на РЛС широкополосной шумовой помехи) к потере информации о дальности, скорости сближения и угловых координатах цели, например беспилотного летательного аппарата (БПЛА) [1, 2].

При больших расстояниях до цели, когда ОЛС не может измерять угловые координаты (или при ее отказе), восстановление информации о них

происходит в алгоритмах вторичной обработки информации в цифровом процессоре путем сопровождения цели по занесенным в память системы параметрам отметок цели.

Достоинством указанного метода определения угловых координат цели является простота реализации. Однако этот метод основан на предположении, что сопровождаемый БПЛА движется прямолинейно с постоянной скоростью. Если он не маневрирует (не отклоняется от прямолинейной траектории), то вычисление координат происходит с небольшими ошибками. Однако способность цели

к маневрированию делает данный метод непригодным для определения угловых координат.

Существуют методы, учитывающие возможный маневр цели, но способность современных целей к сверхманевренности вынуждает использовать дополнительные источники информации для обеспечения устойчивости слежения.

Решение задачи. В настоящей статье рассмотрена коррекция координат цели в информационно-измерительной системе РЛС на основе информации о ее пространственной ориентации. Такой подход основан на довольно жесткой связи между ориентацией цели и направлением ее ускорения.

Структура угломерного канала бортовой РЛС или ОЛС, реализующего указанную возможность, представлена на рис. 1. Датчик изображения дает двумерное оптическое или радиолокационное изображение цели [3]. Сигнал, представляющий это изображение, поступает на подсистему оценки ориентации, которая по специальному алгоритму преобразует полученные данные в ориентацию трехмерной цели. Полученная оценка ориентации поступает в угломерный канал РЛС для уточнения вектора ускорения цели и повышения точности ее отслеживания.

Одной из перспективных технологий в области радиолокации является радиолокационная спеклинтерферометрия. С помощью этой технологии можно оценивать ориентацию объекта в пространстве по отношению к заданной системе координат.

Для определения параметров движения по последовательности изображений разработаны два различных подхода [4].

Первый основан на выделении на каждом изображении множества относительно редких, ярко выраженных признаков на двумерном изображении, соответствующих трехмерным признакам объектов сцены. Затем устанавливается соответствие этих признаков в последовательности кадров и их перемещение при переходе от кадра к кадру.

Полученные в результате обработки изобра-

жения данные о ракурсе цели поступают на вычислитель нормального ускорения. Нормальное ускорение цели подается в угломер, на выходе которого получаем уточненные оценки угловых координат цели (рис. 1).

Согласно второму методу по параметрам пространственной ориентации определяются приближительные значения и направления сил, действующих на БПЛА, а затем на основе полученных данных – ускорение БПЛА.

Этот алгоритм требует измерения девяти параметров: углов пространственной ориентации цели (тангажа, рыскания и крена), координат цели (дальности, угла места и азимута), а также скорости сближения и угловых скоростей линии визирования (ЛВ) в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Метод сложен, так как для его реализации используется непрерывно-дискретный расширенный фильтр Калмана с 15 уравнениями состояния.

В настоящее время ведутся работы по оценке ориентации цели и ее изменения с течением времени. Рассмотрим возможность вычисления угловых координат на основе оценки величин углов ориентации цели в пространстве [4, 5].

При этом будем полагать следующее:

- вектор скорости цели ($v_{ц}$) совпадает с осью БПЛА, т. е. $\theta = \vartheta$ и $\varphi = \psi$, где θ, φ – угол между равносигнальным направлением и линией визирования цели и пеленг цели соответственно; ϑ, ψ – углы ориентации цели в пространстве;
- маневры характеризуются высоким поперечным ускорением и низким, часто незначительным, продольным ускорением, т. е. вначале будем считать, что $a_{\chi} = dv_{ц}/dt \rightarrow 0$, а в дальнейшем проверим допустимость такого упрощения;
- учитывая, что параметры собственного движения носителя РЛС могут быть измерены достаточно точно и их влияние скомпенсировано, будем считать, что носитель РЛС неподвижен в пространстве.

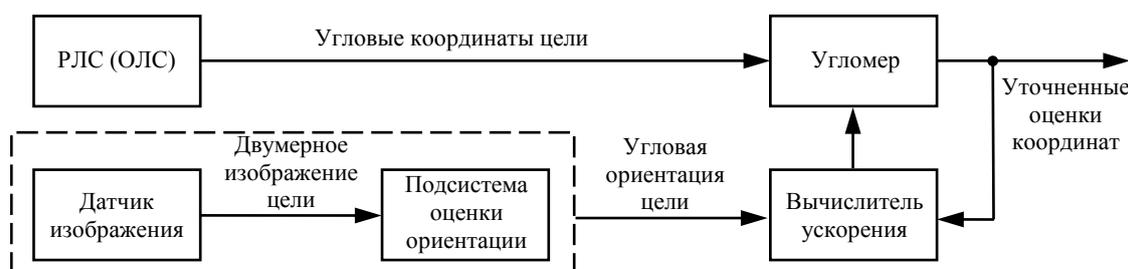


Рис. 1. Схема угломерного канала бортовой РЛС

Fig. 1. Scheme of the goniometer channel of the airborne radar

Результат работы. Для угломера перемещение цели (рис. 2, позиция $0_{Ц}$) по траектории полета (ТП) относительно носителя, расположенного в точке $0_{И}$, может быть задано в виде изменения дальности и угловой скорости линии визирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Из рис. 2 получим:

$$v_X = v_{Ц} \cos \vartheta \cos \psi; \quad (1)$$

$$v_Y = v_{Ц} \sin \vartheta; \quad (2)$$

$$v_Z = v_{Ц} \cos \vartheta \sin \psi, \quad (3)$$

где v_X , v_Y , v_Z – проекции вектора скорости цели $v_{Ц}$ на оси $0_{И}X$, $0_{И}Y$, $0_{И}Z$ соответственно.

Если воспользоваться составляющими скорости (1)–(3), заданными в трехмерной системе координат (рис. 2), то получим:

$$v_{XЛ} = v_X \cos \varepsilon_{Г} \cos \varepsilon_{В} + v_Z \sin \varepsilon_{Г} \cos \varepsilon_{В} + v_Y \sin \varepsilon_{В}; \quad (4)$$

$$v_{YЛ} = -v_X \cos \varepsilon_{Г} \sin \varepsilon_{В} - v_Z \sin \varepsilon_{Г} \sin \varepsilon_{В} + v_Y \cos \varepsilon_{В}; \quad (5)$$

$$v_{ZЛ} = -v_X \sin \varepsilon_{Г} + v_Z \cos \varepsilon_{Г}. \quad (6)$$

С учетом (1)–(3) выражения (4)–(6) будут иметь вид

$$v_{XЛ} = v_{Ц} \cos \vartheta \cos \psi \cos \varepsilon_{Г} \cos \varepsilon_{В} + v_{Ц} \cos \vartheta \sin \psi \sin \varepsilon_{Г} \cos \varepsilon_{В} + v_{Ц} \sin \vartheta \sin \varepsilon_{В};$$

$$v_{YЛ} = -v_{Ц} \cos \vartheta \cos \psi \cos \varepsilon_{Г} \sin \varepsilon_{В} - v_{Ц} \cos \vartheta \sin \psi \sin \varepsilon_{Г} \sin \varepsilon_{В} + v_{Ц} \sin \vartheta \cos \varepsilon_{В};$$

$$v_{ZЛ} = -v_{Ц} \cos \vartheta \cos \psi \sin \varepsilon_{Г} + v_{Ц} \cos \vartheta \sin \psi \cos \varepsilon_{Г}.$$

После несложных тригонометрических преобразований получим:

$$v_{XЛ} = (v_{Ц}/2) \left\{ \cos(\vartheta - \varepsilon_{В}) [1 + \cos(\psi - \varepsilon_{Г})] + \cos(\vartheta + \varepsilon_{В}) [\cos(\psi - \varepsilon_{Г}) - 1] \right\};$$

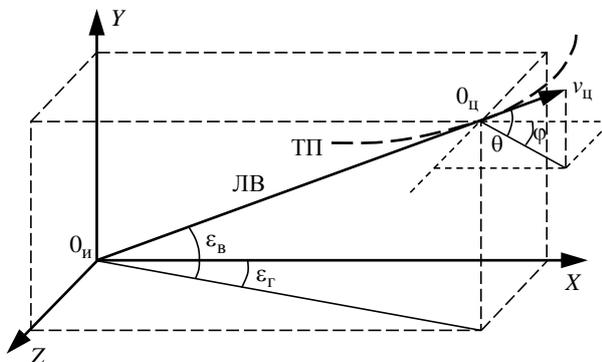


Рис. 2. Движение цели относительно РЛС
 Fig. 2. Target movement relative to the radar

$$v_{YЛ} = (v_{Ц}/2) \left\{ \sin(\vartheta + \varepsilon_{В}) [1 - \cos(\psi - \varepsilon_{Г})] + \sin(\vartheta - \varepsilon_{В}) [\cos(\psi - \varepsilon_{Г}) + 1] \right\};$$

$$v_{ZЛ} = v_{Ц} \cos \vartheta \sin(\psi - \varepsilon_{Г}).$$

С учетом того, что

$$v_{XЛ} = dD/dt = \dot{D};$$

$$v_{YЛ}/D = d\varepsilon_{В}/dt = \dot{\varepsilon}_{В};$$

$$v_{ZЛ}/D = d\varepsilon_{Г}/dt = \dot{\varepsilon}_{Г};$$

получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{D} = \frac{v_{Ц}}{2} \left\{ \cos(\vartheta - \varepsilon_{В}) [1 + \cos(\psi - \varepsilon_{Г})] + \cos(\vartheta + \varepsilon_{В}) [\cos(\psi - \varepsilon_{Г}) - 1] \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_{В} = \frac{v_{Ц}}{2D} \left\{ \sin(\vartheta + \varepsilon_{В}) [1 - \cos(\psi - \varepsilon_{Г})] + \sin(\vartheta - \varepsilon_{В}) (\cos(\psi - \varepsilon_{Г}) + 1) \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_{Г} = \frac{v_{Ц}}{D} \cos \vartheta \sin(\psi - \varepsilon_{Г}). \end{cases} \quad (7)$$

Алгоритм, основанный на решении системы дифференциальных уравнений (7), позволяет прогнозировать дальность и угловые координаты цели при пропадании информации о них от РЛС, например из-за действия помех или резкого замирания сигнала [6]. Начальными условиями для алгоритма являются значения дальности (D_0), скорости цели ($v_{Ц0}$) и углов визирования цели в горизонтальной и вертикальной плоскостях ($\varepsilon_{Г0}$, $\varepsilon_{В0}$) на момент пропадания информации. Входной информацией являются углы ориентации цели в пространстве ψ и ϑ , поступающие от датчиков оптического или инфракрасного диапазона.

Анализ работоспособности алгоритма вычисления дальности и угловых координат проводился на примере сопровождения одного БПЛА при условии, что цель движется прямолинейно и с постоянной скоростью (рис. 3, k – номер отсчетов моделирования с шагом 0.01 с). Среднеквадратические отклонения (СКО) оценок углов ориентации цели σ_{ψ} и σ_{ϑ} считались равными 1° .

На рис. 4 приведены графики СКО вычисления дальности и углов визирования цели в горизонтальной и вертикальной плоскостях на основе системы (7). Как видно из рис. 4, вычисление указанных параметров происходит с небольшими ошибками.

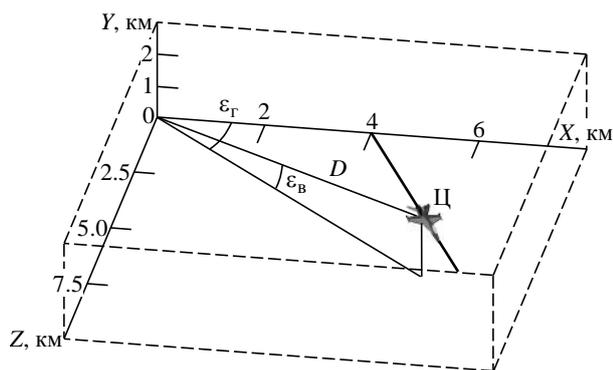


Рис. 3. Прямолинейное движение цели с постоянной скоростью

Fig. 3. Rectilinear target moving at constant speed

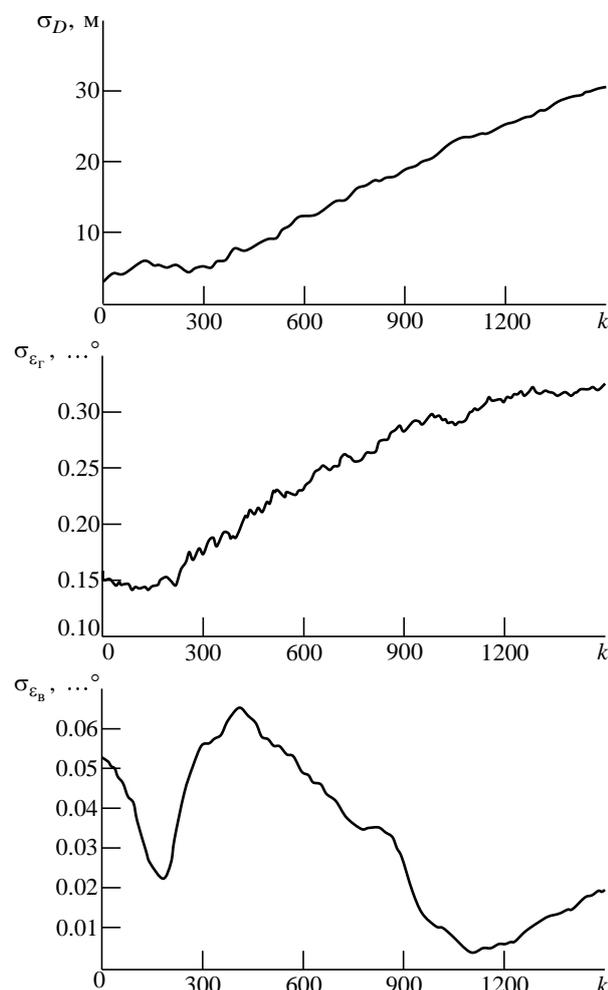


Рис. 4. СКО вычисления дальности и углов визирования цели

Fig. 4. Standard deviation of the calculation of the range and viewing angles of the target

Далее анализ алгоритма вычисления дальности и угловых координат цели проводился только для горизонтальной плоскости как основной при маневрировании.

При этом система (7) значительно упрощается и имеет вид

$$\begin{cases} \dot{D} = v_{Ц} \cos(\psi - \varepsilon_{Г}); \\ \dot{\varepsilon}_{Г} = (v_{Ц}/D) \sin(\psi - \varepsilon_{Г}). \end{cases}$$

Ранее были сделаны допущения $\theta = \vartheta$ и $\varphi = \psi$. Однако, как уже отмечалось, в реальности маневрирование цели приводит к появлению углов атаки α и скольжения β .

На рис. 5 представлены графики СКО вычисления дальности и угла визирования в горизонтальной плоскости при совершении целью виража, в процессе которого угол скольжения β увеличивался до 5° . Как видно из рисунка, увеличение угла скольжения β приводит к росту ошибок вычисления дальности и угла визирования цели.

Изменение скорости цели во времени также приводит к росту ошибок вычисления. На рис. 6 представлены графики СКО вычисления дальности и угла визирования при прямолинейном полете цели с ускорением $a_X = 0.5 \text{ м/с}^2$.

Таким образом, интенсивное маневрирование цели приводит к возрастанию ошибок вычисления дальности и угловых координат.

При пропадании сигнала от цели перемещение следящего строга выполняется на основании

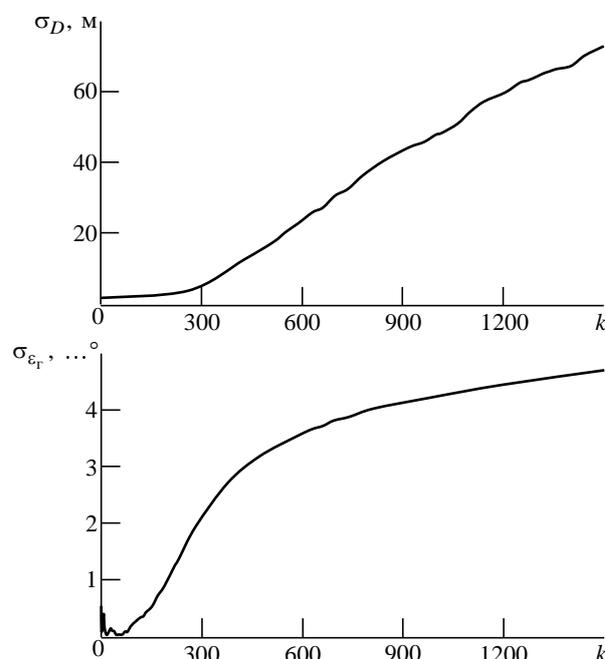


Рис. 5. СКО вычисления дальности и угла визирования в горизонтальной плоскости при вираже цели

Fig. 5. Standard deviation of the calculation of the range and viewing angle in the horizontal plane when the target is turning

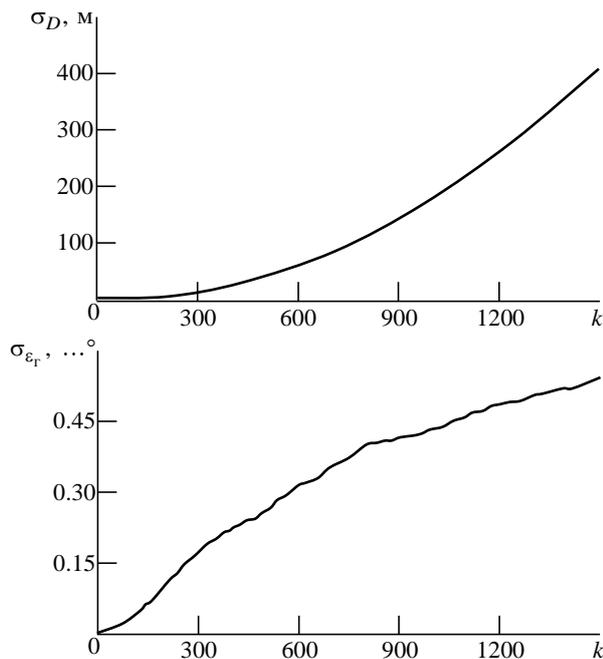


Рис. 6. СКО вычисления дальности и угла визирования в горизонтальной плоскости при прямолинейном полете цели с ускорением

Fig. 6. Standard deviation of the calculation of the range and viewing angle in the horizontal plane when the target is fighting with acceleration

вычисляемых значений дальности, а перемещение луча антенны – на основании вычисляемых угловых координат. При появлении сигнала система продолжает сопровождать цель. Однако если ошибка вычисления координат цели превысит половину ширины дискриминационной характеристики следящей системы, то система перейдет в режим поиска цели [7–10]. В условиях дефицита времени это может привести к неблагоприятному завершению (срыву) слежения.

Таким образом, возникает необходимость как можно более точного вычисления координат цели при отсутствии сигнала от цели в системе слежения РЛС в течение длительного промежутка времени (до появления сигнала).

Проведем анализ зависимости времени τ выхода ошибки вычисления за пределы дискриминационной характеристики (т. е. время памяти системы слежения за дальностью) от угла скольжения и продольного ускорения сопровождаемого БПЛА.

Границы дискриминационной характеристики для дальномеров часто определяются длительностью импульса РЛС. Для типичной РЛС она составляет единицы микросекунд. На основании этого будем считать, что ширина дискриминаци-

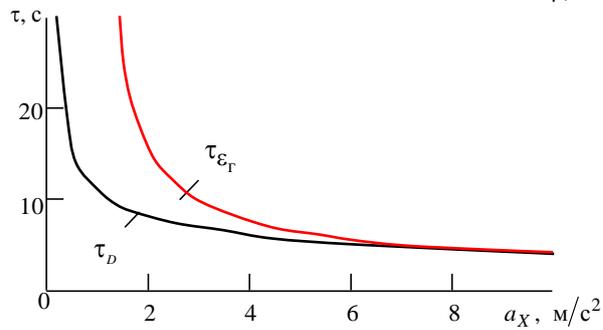
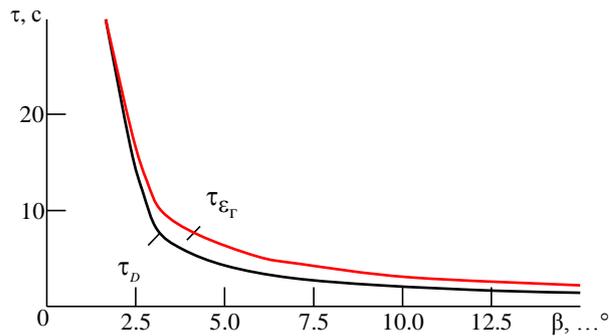


Рис. 7. Время памяти системы при совершении целью маневра и движения с ускорением

Fig. 7. System memory time when the target maneuvers and moves with acceleration

онной характеристики составляет примерно 200...400 м.

Для угломерных систем границы дискриминационной характеристики определяются шириной диаграммы направленности антенны РЛС, для современных станций составляющей примерно 3° .

Анализ времени памяти следящей системы проводился на основе метода статистических испытаний [11–14]. Указанный метод является наиболее простым и точным и позволяет найти количественные оценки срыва слежения (в данном случае время до срыва) практически для всех систем слежения.

На рис. 7 приведены зависимости времени памяти системы по дальности и угловым координатам от угла скольжения и ускорения цели соответственно.

Как видно из графиков, увеличение угла скольжения β и ускорения a_x цели во время маневра приводит к уменьшению времени памяти τ системы сопровождения по дальности и угловым координатам.

Моделирование работы алгоритма при различных видах маневров показало, что предложенный алгоритм вычисления дальности и углов визирования цели позволяет:

– увеличить время памяти системы слежения по дальности и угловым координатам выше 20 с при слежении за БПЛА, маневрирующим с ма-

лыми углом скольжения ($< 2^\circ$) и ускорением ($< 2 \text{ м/с}^2$) по сравнению с системой без учета ориентации;

– определять в течение временного интервала до 10 с дальность и до 15 с угловые координаты БПЛА, маневрирующего с большими β ($3 \dots 15^\circ$) и a_x ($2 \dots 10 \text{ м/с}^2$), с ошибками, не превышающими ширину дискриминационной характеристики следящей системы. Это позволяет опреде-

лять дальность и углы визирования интенсивно маневрирующей цели, например, в полупериодах действия прерывистой шумовой помехи [15].

Заключение. В состав радиолокационных комплексов целесообразно включать датчики пространственной ориентации цели, например, оптического, инфракрасного или радиодиапазона, позволяющие определить ориентацию цели и ее измерение. Их применение основано на довольно жесткой связи между ориентацией цели и направлением ее ускорения.

Список литературы

1. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А. И. Канащенкова, В. И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 416 с.
2. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. М.: Радиотехника, 2014. 528 с.
3. Алгоритм дальномерного канала с учетом информации бортовых датчиков воздушных судов / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, И. В. Князев // Радиотехника. 2013. № 9. С. 60–64.
4. Зledenный Н. П., Испулов А. А. Прогнозирование движения воздушной цели на основе изображений от иконической стереоскопической прицельной системы // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. науч. ст. по материалам II Всерос. науч.-практ. конф. "АВИАТОР", Воронеж, 11–13 февр. 2015 г.: в 2 т. Воронеж: ВУНЦ ВВС "ВВА", 2015. Т. 2. С. 67–70.
5. Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А. А. Ардентов, И. Ю. Бесчастный, А. П. Маштаков, А. Ю. Попов, Ю. Л. Сачков, Е. Ф. Сачкова // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3, № 3. С. 23–39.
6. Харкевич А. А. Борьба с помехами. 5-е изд. М.: Ленанд, 2018. 280 с.
7. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход / пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
8. Наимов У. Р., Данилов С. Н., Пудовкин А. П. Синтез канала слежения за параметрами случайного процесса в условиях их скачкообразного изменения // Радиотехника. 2019. № 2. С. 84–89.
9. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах / В. С. Верба, В. И. Меркулов, В. В. Дрогалин и др. М.: Радиотехника, 2010. 472 с.
10. Vabre Ph. Air Traffic Services Surveillance Systems, Including An Explanation of Primary and Secondary Radar // Retrieved. 2009. 5 p.
11. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / А. Е. Ананенков, Д. В. Марин, В. М. Нурдин, В. В. Расторгуев, А. В. Соколов // Тр. МАИ. 2016. № 91. 18 с. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/592/ananenkov_marin_nurzhin_rastorguev_sokolov_rus.pdf (дата обращения 19.04.2020)
12. Перспективы применения миллиметровой радиолокации для обнаружения и распознавания неподвижных и движущихся объектов на фоне подстилающей поверхности / С. И. Нефедов, М. И. Нониашвили, А. А. Лаговиер, М. Е. Голубцов // IV Всерос. конф. "Радиолокация и радиосвязь". Москва, 29 нояб.–3 дек. 2010 г. М.: ИРЭ РАН, 2010. С. 237–242.
13. Данилов С. Н. Алгоритм сопровождения воздушных объектов следящим устройством в режиме обзора на основе аппроксимации области неопределенности оцениваемых параметров эллипсоидом наименьшего размера // Радиотехника. 2006. № 5–6. С. 77–81.
14. Пудовкин А. П., Данилов С. Н., Панасюк Ю. Н. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах. СПб.: Экспертные решения, 2014. 256 с.
15. Наимов У. Р. Оценивание координат беспилотного летательного аппарата на основе модели маневренного движения // Вестн. ТГТУ. 2019. Т. 25, № 2. С. 236–240. doi: 10.17277/vestnik.2019/02.pp.236–240

Информация об авторе

Наимов Умеджан Розибекевич – инженер по направлению "Радиофизика и электроника" (2010, Таджикский национальный университет), ассистент кафедры оптики и спектроскопии указанного университета, соискатель по кафедре "Радиотехника" Тамбовского государственного технического университета. Автор 15 научных работ. Область научных исследований – методы оптимизации радиолокационных следящих измерителей. Адрес: Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, д. 106, Тамбов, 392000, Россия
E-mail: umed87-88@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5049-2777>

References

1. Kanaschenkov A. I., Merkulov V. I. *Zashchita radiolokatsionnykh sistem ot pomekh. Sostoyanie i tendentsii razvitiya* [Protection of Radar Systems from Interference. Status and Development Trends]. Moscow, Radioengineering, 2003, 416 p. (In Russ.)
2. Verba V. S. *Aviatsionnye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya* [Aviation Complexes of Radar Patrol and Guidance. The Principles of Construction, Development Problems and Features of Functioning]. Moscow, Radioengineering, 2014, 119 p. (In Russ.)
3. Panasyuk Yu. N., Pudovkin A. P., Danilov S. N., Knyazev I. V. The Algorithm Ranging Channel in View of the Information Onboard Sensors Aircraft. Radioengineering. 2013, no. 9, pp. 60–64. (In Russ.)
4. Zledenyni N. P., Ispulov A. A. Predicting the Movement of an Air Target Based on Images from an Iconic Stereoscopic Sighting System. A Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the II All-Russ. Scientific and Practical Conf. "AVIATOR", VUNC Air Force "VA", Voronezh, 11–13 February 2015. 2015, vol. 2, pp. 67–70. (In Russ.)
5. Ardentov A. A., Beschastny I. Yu., Mashtakov A. P., Popov A. Yu., Sachkov Yu. L., Sachkova E. F. Algorithms for Calculating the Position and Orientation of UAVs. Software Systems: Theory and Applications. 2012, no. 3, pp. 23–39. (In Russ.)
6. Kharkevich A. A. *Bor'ba s pomekhami* [Fighting Interference]. 5th ed. Moscow, Lenand, 2018, 280 p. (In Russ.)
7. Ifeachor E. C., Jervis B. W. Digital Signal Processing. A Practical Approach. 2nd ed. London, Prentice Hall, 2002, 947 p.
8. Naimov U. R., Danilov S. N., Pudovkin A. P. Synthesis of the Track Channel over Parameters of a Random Process under the Conditions of Their Drop-Change. Radioengineering. 2019, no. 2, pp. 84–89. (In Russ.)
9. Verba V. S., Merkulov V. I., Drogalin V. V., Chernov V. S., Kirsanov A. P., Perov A. I., Bogachev A. S., Gandurin V. A., Danilov S. N., Zakharov V. M., Koltyshev E. E., Kononov E. I., Krasavin S. Yu., Povalyaev A. A., Shustov E. I. *Otsenivanie dal'nosti i skorosti v radiolokatsionnykh sistemakh* [Range and Speed Estimation in Radar Systems]. Moscow, Radioengineering, 2010, 472 p. (In Russ.)
10. Vabre Ph. Air Traffic Services Surveillance Systems, Including An Explanation of Primary and Secondary Radar. Retrieved. 2009, 5 p.
11. Ananenkov A. E., Marine D. V., Nuzhdin V. M., Rastorguev V. V. On the Observation of Small Unmanned Aerial Vehicles. Trudy Mai. 2016, no. 91, 18 p. (In Russ.)
12. Nefedov S. I., Noniashvili M. I., Lagovier A. A., Golubtsov M. E. Prospects for the Application of Millimeter-Wave Radar for Detecting and Recognizing Stationary and Moving Objects Against the Background of the Underlying Surface. IV All-Russ. Conf. "Radar and Radio Communication". Moscow, 2010, pp. 237–242. (In Russ.)
13. Danilov S. N. Algorithm for Tracking Air Objects with a Tracking Device in the Review Mode Based on the Approximation of the Uncertainty Region of the Estimated Parameters by the Smallest Ellipsoid. Radioengineering. 2006, no. 5–6, pp. 77–81. (In Russ.)
14. Pudovkin A. P., Danilov S. N., Panasyuk Yu. N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radioelekhnicheskikh sistemakh* [Promising Methods of Information Processing in Radio Systems]. SPb., *Ekspertnyye resheniya*, 2014, 256 p. (In Russ.)
15. Naimov U. R. Estimation of the Coordinates of an Unmanned Aerial Vehicle Based on a Model of Maneuverable Movement. *Vestnik TSTU*. 2019, vol. 24, no. 2, pp. 236–239.

Information about the author

Umejan R. Naimov, Dipl. Engineer in "Radiophysics and Electronics" (2010, Tajik National University), Assistant of the Department of Optics and Spectroscopy of the named university, Applicant of the Department of Radio Engineering of the Tambov State Technical University. The author of 15 scientific papers. Area expertise: optimization methods for radar tracking meters.

Address: Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov 193232, Russia

E-mail: umed87-88@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5049-2777>
