

УДК 621.396.965.81
DOI: 10.15827/0236-235X.141.115-122

Дата подачи статьи: 19.10.22, после доработки: 15.11.22
2023. Т. 36. № 1. С. 115–122

Имитационная модель радиолокационного сопровождения распределенных объектов

Д.В. Хрестинин¹, преподаватель, *vka@mil.ru*

А.А. Поздняков¹, к.т.н., ст. преподаватель, *vka@mil.ru*

¹ Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, 197082, Россия

Предметом исследования является радиолокационное сопровождение распределенных объектов, а именно групп малых беспилотных летательных аппаратов. Особенность таких объектов заключается в их сложном составе, а также в непривычном для большинства классических летательных аппаратов характере движения.

Методом исследования выбрано имитационное моделирование, позволяющее оценивать результативность различных алгоритмов радиолокационного сопровождения и классификации в выбранных условиях.

В статье представлена организация процесса имитационного моделирования функционирования средств радиолокационного наблюдения в режимах обнаружения, измерения, сопровождения и классификации. Дано описание взаимодействия аналитических моделей, приведены результаты моделирования. Они получены с помощью традиционных методов обработки результатов экспериментов с учетом их необходимого количества для получения значений вероятностей в доверительном интервале не более 0,01 от полученного значения с доверительной вероятностью не менее 0,8. Оценена результативность самых часто используемых алгоритмов сопровождения – фильтр Калмана, расширенный фильтр Калмана, парциальный фильтр, α - β - γ -алгоритм, а также алгоритмов классификации – оптимальный байесовский алгоритм, ветвящийся алгоритм, алгоритм Витерби, алгоритм Саврасова. В модели, в отличие от известных, учитывается влияние всех отражений и переотражений зондирующего сигнала от элементов распределенного объекта.

По результатам проведенного моделирования можно заключить, что среди алгоритмов сопровождения наиболее результативными являются алгоритмы, основанные на парциальном фильтре и расширенном фильтре Калмана, а среди алгоритмов классификации алгоритм Саврасова. Однако, исходя из требований, предъявляемых к результативности радиолокационных средств, ни один из рассмотренных алгоритмов не обеспечивает необходимое качество в описанных условиях. Это говорит о необходимости усовершенствования научно-методического аппарата радиолокационной траекторной обработки.

Ключевые слова: *распределенные объекты наблюдения, радиолокационное сопровождение, моделирование в радиолокации.*

Одним из самых ярких и эффектных представлений, получивших широкое распространение, являются шоу групп малых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) типа дронов (вертолетного типа), снабженных светодиодами. Они выстраиваются в определенные надписи, фигуры, символы, причем в динамике. Такие представления используются в коммерческих и развлекательных целях, и спрос на них постоянно растет. Очевидно, что основной спрос на такие услуги да и возможности по их оказанию имеются только в крупных городах. Однако относительно открытых пространств, где можно проводить подобные красочные представления, в крупных городах не так много. Это, как правило, парки, сады, прибрежные зоны и окраины. К тому же на этих открытых

пространствах подобные демонстрации сталкиваются с такими проблемами, как наличие птиц (их количество в этих местах выше из-за мест гнездования), проведение других мероприятий, не требующих дополнительного согласования, но тем или иным образом использующих воздушное пространство. Таким образом, проведение представлений в крупных городах затрудняется, с одной стороны, плотной и высотной застройкой, с другой – наличием в необходимом для шоу воздушном пространстве мешающих объектов. Все это говорит о проблеме безопасности проведения таких мероприятий, ведь даже небольшой дрон, падающий с большой высоты после столкновения с каким-нибудь объектом, представляет опасность для людей, имущества, зданий и сооружений.

Одним из путей разрешения возникшей проблемы и обеспечения безопасности проведения демонстрационных мероприятий является использование *радиолокационных средств* (РЛС). Для них такие группы малых БЛА являются распределенными объектами наблюдения, то есть по сути сложными объектами, состоящими из множества одиночных. Особенно актуально использование именно РЛС в ночное время.

Эти средства позволяют контролировать динамически меняющиеся размеры распределенных объектов наблюдения, отслеживать перемещения других объектов в воздушном пространстве, которые могут привести к опасным сближениям, а также траектории падения неисправных БЛА после их столкновений или выхода из строя по другим причинам. РЛС можно использовать в комплекте с группой малых БЛА как составную часть общей системы для предупреждения о возникновении нештатных ситуаций в интересах безопасности проведения шоу с использованием БЛА.

Однако для выбора конкретного типа средства, которое можно использовать в этих целях, их технических характеристик, определяющих возможности этих средств, алгоритмов обработки, более подходящих для целевых условий, необходимо провести моделирование их функционирования с имитацией этих самых условий. Очевидно, что нужно основное внимание при этом уделить траекторной обработке, а именно сопровождению, а также учесть особенности сигнальной обработки распределенных целей, которая с точки зрения радиолокации является относительно непростой.

Целью данного исследования является разработка имитационной модели РЛС сопровождения распределенных целей, благодаря которой можно будет оценить и целесообразность использования РЛС при проведении демонстраций с использованием групп малых БЛА, и эффективность применения тех или иных алгоритмов траекторной обработки, в первую очередь, алгоритмов сопровождения.

Концептуальная модель

За последнее время рассмотрено немало новых условий функционирования РЛС [1–3], созданы модели для рассмотрения работы тех или иных алгоритмов [4–6], но таких имитационных моделей, в которых рассматривались бы условия, подобные описанным выше, авторский коллектив не встречал. Речь идет о моде-

лях, имитирующих работу РЛС и позволяющих оценить эффективность алгоритмов траекторной обработки в условиях сопровождения распределенных объектов с непредсказуемой динамикой и составом.

К разрабатываемой модели предъявлялись следующие требования.

- Имитатор входных воздействий должен адекватно отражать условия воздушной обстановки в зоне функционирования РЛС. При этом должно задаваться движение как группы малых БЛА, так и случайных объектов, попадающих в зону их полета. Полет группы малых БЛА (их траектории) может быть априори известен РЛС, если он работает как составляющая часть системы, или неизвестен, если рассматриваются какие-либо универсальные средства. Полет случайных объектов должен моделироваться исходя из всех возможных траекторий с учетом их вероятностей. Возможно, главным моментом моделирования входных воздействий является имитация столкновений отдельных дронов с мешающими объектами или друг с другом и их последствий, а именно траекторий падения. При этом движение как самого дрона, так и мешающего объекта необязательно должно моделироваться как просто падающее. Их движение может носить и управляемый характер, ведь как и сам дрон, так и объект, с которым он столкнулся, могут выйти из строя частично. Их движение при этом будет уже менее предсказуемым. Степень выхода из строя этих объектов должна определяться вероятностно. В качестве мешающих объектов можно симулировать движение птиц (разных размеров и разных скоростей), вертикально поднимающихся шаров, различных твердых предметов с баллистической характеристикой движения (в свободном падении), реактивных снарядов (элементов фейерверков) или других БЛА (также разных размеров и разных скоростей).

- Модели отраженных от объектов и принимаемых сигналов РЛС должны адекватно отражать условия сопровождения распределенного и мешающих объектов, все особенности, связанные с отражением от большого количества элементов и переотражениями внутри распределенного объекта, городские условия шума и помех. Этот вопрос требует дополнительного исследования, так как в нем раскрывается принципиальная возможность работы в описанных условиях.

- Модель измерений РЛС должна учитывать все его возможности работы по объектам.

Это касается таких характеристик, как разрешающая способность, точность измерения координат и их количество, размер зоны функционирования, способы сканирования, дополнительные возможности по получению информации от принимаемого сигнала или других средств (своего рода возможности по получению целеуказаний).

- Выходной информацией модели должны быть оценки вероятностей успешного окончания работы того или иного этапа функционирования. Если интересует сопровождение, то это может быть или вероятность срыва сопровождения, или обратная ей вероятность успешного сопровождения, если интересует классификация, – вероятность правильной классификации и т.п. Под классификацией в данном случае можно понимать правильное или неправильное принятие решения как о типе объекта сопровождения, так и о возникновении каких-либо характерных событий. Для более детального анализа работы алгоритмов РЛС также необходима информация о качестве оценивания (фильтрации) и экстраполяции на каждом цикле работы алгоритма сопровождения. Помимо перечисленного, нужна информация, характеризующая оперативность работы используемых алгоритмов.

На рисунке 1 представлена концептуальная схема разработанной имитационной модели.

Блок 2 включает в себя все исходные данные, подаваемые в модель: технические характеристики РЛС, параметры и характеристики используемых сигналов, характеристики окружающей среды (к примеру, показатели, характеризующие шумы и помехи), параметры и характеристики, определяющие движение БЛА и мешающих объектов, и др.

Блок 3 представляет собой имитатор входных воздействий. Именно здесь описывается движение групп малых БЛА, мешающих объектов, их столкновений, изменений траекторий после столкновений, в том числе и падения. Выходной информацией этого блока являются координаты векторов состояний, скоростей и ускорений в заданные моменты времени для всех имитируемых объектов:

$$B(t) = \begin{pmatrix} B_1^1(t) & B_1^2(t) & \vdots & B_1^m(t) \\ B_2^1(t) & B_2^2(t) & \vdots & B_2^m(t) \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ B_N^1(t) & B_N^2(t) & \vdots & B_N^m(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $B_j^i(t) = \begin{pmatrix} x(t) & y(t) & z(t) \\ \dot{x}(t) & \dot{y}(t) & \dot{z}(t) \\ \ddot{x}(t) & \ddot{y}(t) & \ddot{z}(t) \end{pmatrix}$ – матрица координат

движения одного объекта; m – количество элементов распределенных объектов; N – количество объектов.

Кроме координат каждого элемента, выходной информацией блока являются данные об их отражательных характеристиках также в требуемые моменты времени. Этот блок требует глубокой проработки вариантов обстановки в зоне функционирования РЛС, а значит, отдельного исследования.

Моделирование движения объектов может производиться как исключительно в зоне функционирования РЛС, так и не привязываясь к нему. В последнем случае в блоке 4 проводится проверка на наличие конкретного объекта в зоне функционирования РЛС.

После проверки в блоке 5 номера измерения в блоке 10 имитируется сигнал, принимаемый РЛС, в основе которого заложен сигнал, излучаемый РЛС, он имитируется в блоке 20. Для первого измерения предполагается сигнал, используемый при обзоре пространства, в последующих циклах обработки он может корректироваться также в блоке 20. Уже отмечалось, что вопрос адекватного описания принимаемого сигнала с учетом отражений и переотражений от множества объектов требует глубокой проработки.

Блоки 11–19 представляют собой модель функционирования РЛС, из них блоки 13–19 относятся к сопровождению объектов.

В блоке 11 имитируется процесс обнаружения. Степень детализации этого процесса можно свести к принятию решения об обнаружении в соответствии с заданными вероятностями правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги, заданными в исходных данных для РЛС, также можно учесть влияние ошибки экстраполяции.

В блоке 12 происходит трансформация параметров, заключенных в принятом сигнале, в РЛ измерения в соответствии с точностными характеристиками РЛС. На выходе этого блока формируется отметка от объекта, то есть вектор всех измерений, полученных об объекте. В блоке 13 происходит принятие решения о принадлежности полученной отметки к конкретным траекториям. В блоке 14 производится фильтрация полученной и привязанной отметки, то есть оценивание измеренных значений в текущий момент времени в соответ-

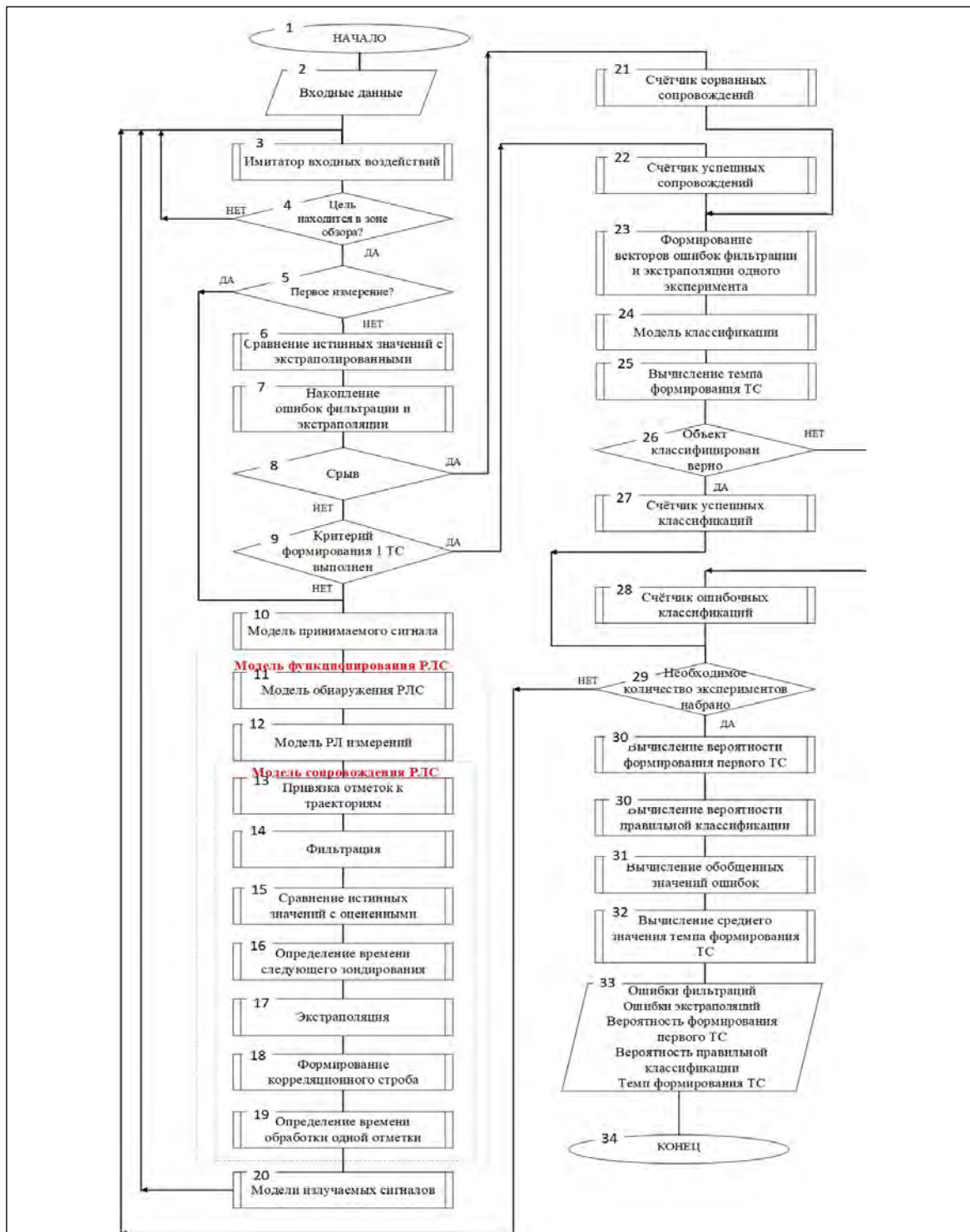


Рис. 1. Концептуальная схема имитационной модели

Fig. 1. A conceptual diagram of the simulation model

ствии с выбранным критерием оптимизации. Качество такой фильтрации для каждого цикла обработки оценивается в блоке 15 путем сравнения полученных значений с истинными, то есть получаемыми в блоке 3.

В блоке 16 в соответствии с загруженностью РЛС вычисляется время для следующего зондирования в направлении конкретного объекта, а в блоке 17 производится экстраполяция траектории для этого времени. Качество прове-

денной экстраполяции проверяется на следующем цикле обзора в блоке 6 также путем сравнения с истинными значениями для указанного времени. В блоке 7 производится накопление ошибок фильтрации и экстраполяции, которые по завершении сопровождения выдаются в блок 23, где формируются векторы ошибок по одному эксперименту. После проведения всех экспериментов в блоке 32 формируются обобщенные (усредненные) векторы ошибок и экстраполяции, которые являются выходными данными модели. По этим векторам можно судить и о качестве алгоритмов траекторной обработки.

В блоке 18 вычисляются размеры и форма корреляционного строга на следующий цикл обзора. На этом заканчивается первый (один) цикл обработки, и в блоке 19 высчитывается затраченное на него время.

Далее в блоке 20 формируется излучаемый сигнал и процедуры функционирования РЛС (блоки 11–19) повторяются. Окончание сопровождения происходит по критериям, проверяемым в блоке 8 (срыв сопровождения) или 9 (успешное окончание). Критерии могут выбираться разные: наличие более двух пропусков подряд, устойчивое сопровождение более 60 секунд и т.п. При этом, если зафиксирован срыв, то в блоке 21 прибавляется единица, если успешное окончание, то единица прибавляется в блоке 22. По результатам одного эксперимента единица может прибавиться в блоке 21 или 22. На основании данных, накопленных в этих блоках, в блоке 30 после проведения всех экспериментов высчитывается вероятность успешного сопровождения:

$$p_s = \frac{N_s}{N}, \quad (2)$$

где N_s – количество успешно сопровождаемых траекторий; N – общее количество заданных траекторий.

После окончания сопровождения (независимо от успеха или срыва) по накопленным отметкам в блоке 24 производится классификация по типу. Для классификации по характерным событиям возможно добавление в блоки функционирования РЛС. В блоке 26 проверяется правильность проведенной классификации путем сравнения с истинными данными из блока 3. Как и при сопровождении, в блоке 27 или 28 добавляется единица в случае правильной или неправильной классификации. На основании данных, накопленных в этих блоках, в блоке 31 после проведения всех экспериментов

высчитывается вероятность правильной классификации:

$$p_k = \frac{N_k}{N}, \quad (3)$$

где N_k – количество успешно классифицированных траекторий; N – общее количество заданных траекторий.

В блоке 25 вычисляется показатель пропускной способности, например, темп успешных сопровождений, по результатам одного эксперимента. В блоке 33 это значение усредняется по результатам всех экспериментов.

В модели задаются новые сценарии имитатора входных воздействий, пока не будет набрано необходимое количество экспериментов. Этот критерий проверяется в блоке 29. Количество экспериментов выбирается исходя из требуемых значений доверительных интервалов при заданной доверительной вероятности для выходных значений вероятностей правильной классификации и успешного сопровождения.

Таким образом, выходными значениями модели (блок 34) являются следующие:

- ошибки фильтраций (текущих оцениваний);
- ошибки экстраполяции;
- вероятность успешного сопровождения;
- вероятность правильной классификации;
- темп успешных сопровождений.

Программно модель реализована в универсальном пакете математического проектирования MathCad 15.0. На рисунке 2 показан интерфейс программы, реализующий модель, а на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2023-1/2023-1-dop/6.jpg>) приведена часть программного кода с описанием работы фильтра Калмана.

Результаты моделирования

На модели была проверена работа абстрактного моноимпульсного РЛС сантиметрового диапазона. Была оценена результативность самых используемых алгоритмов в различных ситуациях [7, 8]:

- сопровождение распределенного объекта типа группы малых БЛА (20 дронов);
- сопровождение мешающего объекта (рассматривался другой БЛА со случайной траекторией в зоне функционирования РЛС);
- сопровождение двух свободно падающих БЛА после их столкновения;

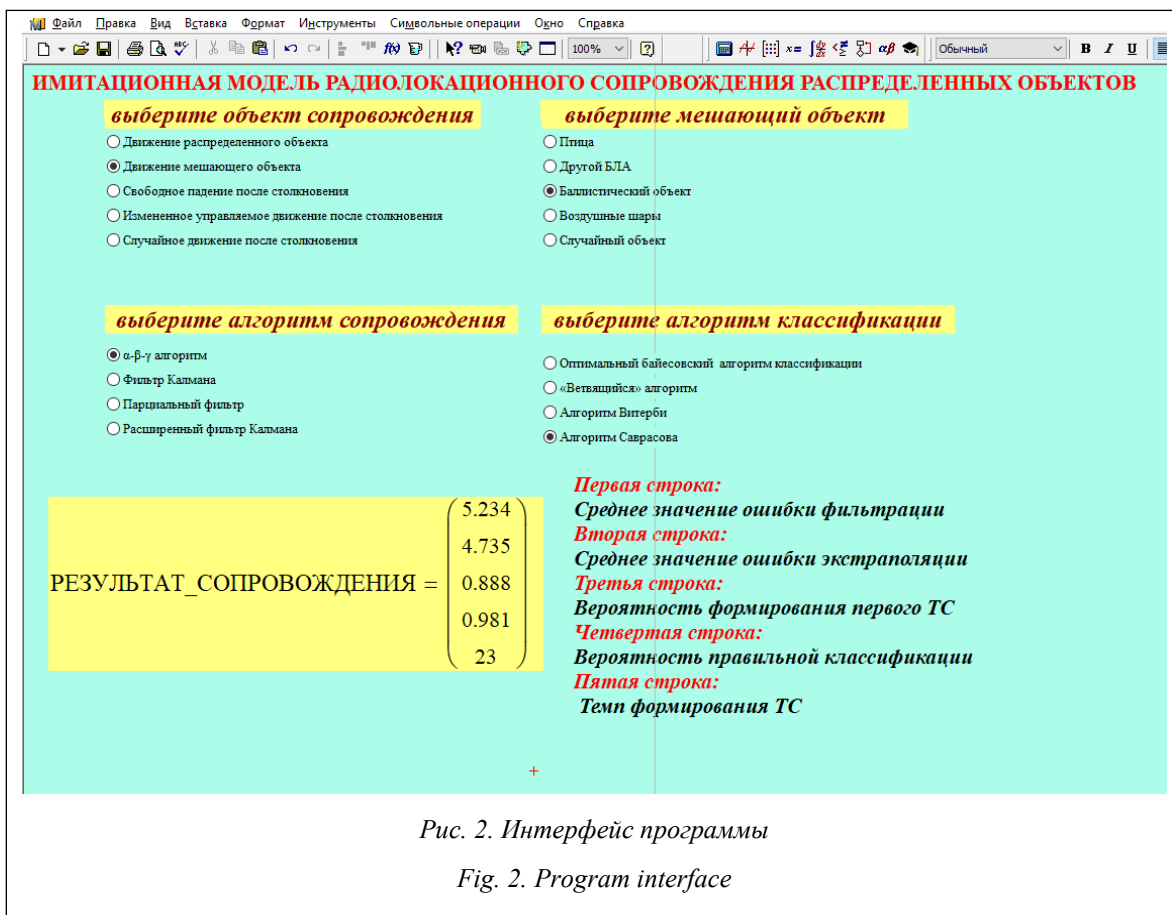


Рис. 2. Интерфейс программы

Fig. 2. Program interface

– сопровождение двух БЛА после их столкновения с измененными управляемыми траекториями;

– сопровождение двух БЛА после их столкновения с измененными случайным образом траекториями.

Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Также была оценена результативность некоторых алгоритмов по классификации мешающих объектов в условиях сопровождения распределенного объекта [9, 10]. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

По результатам проведенного моделирования можно заключить, что среди алгоритмов сопровождения наиболее результативны алгоритмы, основанные на парциальном фильтре и расширенном фильтре Калмана, а среди алгоритмов классификации – алгоритм Саврасова. Однако, исходя из требований, предъявляемых к результативности РЛС, ни один из рассмотренных алгоритмов не обеспечивает заданное качество (как правило, 0,95) в описанных условиях, что говорит о необходимости усовершенствования научно-методического аппарата РЛ траекторной обработки.

Заключение

Разработанная имитационная модель позволяет:

- задавать варианты функционирования РЛС с распределенными объектами в различных условиях;
- задавать различные технические характеристики и возможности РЛС;
- имитировать отражательные характеристики с учетом особенностей распределенных объектов;
- проверять качество алгоритмов сопровождения и классификации объектов.

Модель адекватно описывает поведение объектов в воздушном пространстве, работу алгоритмов функционирования РЛС в различных режимах (обнаружение, измерение, сопровождение, классификация) и позволяет оценить их результативность.

В модели учитывается влияние всех отражений и переотражений зондирующего сигнала от элементов распределенного объекта. Это открывает новые возможности по сопровождению элементов и классификации распределенных объектов.

Таблица 1

Вероятность успешного сопровождения объектов для различных алгоритмов сопровождения

Table 1

The probability of successful object tracking for various tracking algorithms

Ситуация	α - β - γ -алгоритм	Фильтр Калмана	Парциальный фильтр	Расширенный фильтр Калмана
Движение распределенного объекта	0,96	0,98	0,98	0,98
Движение мешающего объекта	0,89	0,91	0,95	0,93
Свободное падение после столкновения	0,9	0,91	0,93	0,94
Измененное управляемое движение после столкновения	0,76	0,88	0,91	0,91
Случайное движение после столкновения	0,78	0,89	0,92	0,91

Таблица 2

Вероятность правильной классификации для различных алгоритмов классификации

Table 2

The probability of correct classification for various classification algorithms

Мешающий объект	Оптимальный байесовский алгоритм классификации	Ветвящийся алгоритм (многогипотезной классификации)	Алгоритм Витерби	Алгоритм Саврасова
Птица	0,9	0,92	0,92	0,94
Другой БЛА	0,82	0,81	0,87	0,91
Баллистический объект	0,91	0,93	0,93	0,98
Воздушные шары	0,95	0,98	0,97	0,96
Случайный объект	0,88	0,92	0,91	0,95

Практическая значимость заключается в возможности применять разработанную модель при проектировании ПО РЛС для определения наиболее результативных алгоритмов сопро-

вождения и классификации объектов в конкретных условиях применения РЛС, а также оценивать результативность решения других задач радиолокации на этапе проектирования.

Литература

1. Поздняков А.А., Калинин Т.В., Ходатаев Н.А., Шаталов А.А. Особенности сопровождения маневрирующих целей с быстроизменяющейся скоростью в радиотехнических устройствах // Вестн. РосНОУ. Сер. Сложные системы: модели, анализ, управление. 2018. № 3. С. 37–47.
2. Дементьев В.Е., Кондратьев Д.С., Стрельцова А.С. Траекторная обработка на основе комбинации байесовских нейронных сетей и процедур нелинейной фильтрации // Автоматизация процессов управления. 2019. № 4. С. 57–63.
3. Жуков А.О., Буторин В.В., Окунев Е.В. Подход к радиолокационному сопровождению высокоскоростных объектов и прогнозированию их движения // РТИ Системы ВКО: тр. V Всерос. науч.-технич. конф. 2018. С. 362–367.
4. Liu Y., Wang S., Sun Z., Shen J. Evaluation of nonlinear filtering for radar data tracking. EURASIP J. on Wireless Communications and Networking, 2015, no. 18, p. 9. DOI: 10.1186/s13638-015-0249-x.
5. Сычев М.И. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе многомодельной фильтрации // Тр. МАИ. 2016. № 90. С. 1–30.
6. Саверкин О.В. Сравнительное моделирование алгоритмов траекторной фильтрации // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 3. С. 93–97.
7. Vorona S.G., Smirnov E.E., Pankov B.B., Pozdnyakov A.A., Zhdanova A.B. A model for tracking process of the integrated radar systems under working conditions with maneuvering targets. J. of Physics: Conf. Ser., 2020, vol. 1499, art. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012027.
8. Пророк В.Я., Халиков Э.М., Охотников Ю.Ю., Шаймухаметов Ш.И. Алгоритм формирования строга сопровождения по маневрирующим летательным аппаратам на основе нечеткого логического вывода // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1. С. 100–107.
9. Смирнов Е.Е., Поздняков А.А., Паршин М.С. Модель классификации объектов наблюдения в условиях пересечения их траекторий движения на основе совместного анализа траекторной и поляризованной информации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. № 4. С. 14–26. DOI: 10.18127/j20700814-202104-02.
10. Бачевский А.С., Коновалов Д.Ю., Лабец В.В., Шаталова В.А. Адаптивный алгоритм распознавания сигналов, принимаемых от быстро флуктуирующих целей с доплеровским рассеянием при наличии помех // Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. 2017. № 2. С. 25–34.

A simulation model of distributed object radar tracking

D.V. Khrestinin¹, Lecture, vka@mil.ru

A.A. Pozdnyakov¹, Ph.D. (Engineering), Senior Lecture, vka@mil.ru

¹ A.F. Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg, 197082, Russian Federation

Abstract. The subject of research is radar tracking of distributed objects like groups of small drones. The peculiarity of these objects is in their complex composition and an unusual for most classic aircrafts movement character.

The research method is simulation modeling. It allows evaluating the effectiveness of radar tracking algorithms and classification in selected terms.

The article presents the process organization of simulation modeling of integrated radar system functioning in the detection, measurement, tracking and classification modes. It also presents the description of analytical models and their interaction, as well as simulation results, which are received using traditional experiment processing methods. The methods take into account a required number of tests to provide probability values in confidence interval no more than 0,01 of the obtained value with a confidence probability no more than 0.8. The authors evaluated performance of the most popular tracking and classification algorithms. Tracking algorithms include α - β - γ algorithm, Kalman filter, Unscented Kalman filter, partial filter. Classification algorithms include optimal Bayes algorithm, parting algorithm, Viterbi algorithm, Savrasov algorithm. The model, unlike the known ones, takes into account the influence of all reflections and re-reflections of the probing signal from the sophisticated object elements.

According to the simulation results, the authors make a conclusion that among the tracking algorithms, the most efficient are algorithms based on the partial filter and Unscented Kalman filter; among the classification algorithms, the most efficient is Savrasov algorithm. However, based on the requirements for a radar performance, none of the considered algorithms provides the required quality under the described conditions. This indicates the need to improve the scientific and methodological apparatus of radar trajectory processing.

Keywords: distributed observation objects, radar tracking, radar simulation.

References

1. Pozdnyakov A.A., Kalinin T.V., Khodataev N.A., Shatalov A.A. Special features of tracking maneuvering targets in the radio devices. *Bull. of RosNOU. Ser.: Complex Systems: Models, Analysis, Management*, 2018, no. 3, pp. 37–47 (in Russ.).
2. Dementev V.E., Kondratov D.S., Streltsova A.S. The object-trajectory tracking algorithm based on the combination of Bayesian neural networks and nonlinear Kalman filtration procedures. *Automation of Control Processes*, 2019, no. 4, pp. 57–63 (in Russ.).
3. Zhukov A.O., Butorin V.V., Okunev E.V. The approach to the radar support of high-speed objects and to their trajectory forecasting. *Proc. Sci.-Pract. Conf. RTI Systems. Armies of Aerospace Defense*, 2018, pp. 362–367 (in Russ.).
4. Liu Y., Wang S., Sun Z., Shen J. Evaluation of nonlinear filtering for radar data tracking. *EURASIP J. on Wireless Communications and Networking*, 2015, no. 18, p. 9. DOI: 10.1186/s13638-015-0249-x.
5. Sychev M.I. Radar data trajectory processing based on multi-model filtering. *Trudy MAI*, 2016, no. 90, pp. 1–30 (in Russ.).
6. Saverkin O.V. Comparative modeling of trajectory filtering algorithms. *DSPA*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 93–97 (in Russ.).
7. Vorona S.G., Smirnov E.E., Pankov B.B., Pozdnyakov A.A., Zhdanova A.B. A model for tracking process of the integrated radar systems under working conditions with maneuvering targets. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1499, art. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012027.
8. Prorok V.Ya., Khalikov E.M., Okhotnikov Yu.Yu., Shaymukhametov Sh.I. An algorithm for forming a tracking gate for maneuvering aircraft based on fuzzy logical inference. *High Tech in Earth Space Research*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 100–107 (in Russ.).
9. Smirnov E.E., Pozdniakov A.A., Parshin M.S. Model of classification of observation objects under conditions of intersection of their motion paths based on joint analysis of trajectory and polarization information. *Information-Measuring and Control Systems*, 2021, no. 4, pp. 14–26. DOI: 10.18127/j20700814-202104-02.
10. Bachevskiy A.S., Konovalov D.Yu., Labets V.V., Shatalova V.A. An adaptive algorithm for recognizing signals received from rapidly fluctuating targets with Doppler scattering with interference. *Proc. Mozhaisky MSA*, 2017, no. 2, pp. 25–34 (in Russ.).

Для цитирования

Хрестинин Д.В., Поздняков А.А. Имитационная модель радиолокационного сопровождения распределенных объектов // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 1. С. 115–122. DOI: 10.15827/0236-235X.141.115-122.

For citation

Khrestinin D.V., Pozdnyakov A.A. A simulation model of distributed object radar tracking. *Software & Systems*, 2023, vol. 36, no. 1, pp. 115–122 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.141.115-122.