

УДК 621.391

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ

В. С. Верба, В. И. Меркулов, Б. Г. Татарский

Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»,  
121170, г. Москва, Кутузовский пр-т, д. 34

Статья поступила в редакцию 16 октября 2018 г.

**Аннотация.** Рассмотрены особенности многоцелевого сопровождения наземных объектов естественного и искусственного происхождения в когерентных и некогерентных РЛС воздушного базирования. Показано, что одновременное непрерывное формирование текущих оценок координат наземных целей, используемых в процедурах навигации и прицеливания, должно осуществляться с учётом решаемых носителем задач, используемых средств поражения, особенностей вариантов обзора земной поверхности, типов целей, особенностей радиолокационного контраста, наличия или отсутствия целеуказаний от систем более высокого уровня иерархии. Оценена роль оператора при решении задач многоцелевого сопровождения. Кратко охарактеризованы особенности всех основных этапов сопровождения наземных объектов: формирования первичных измерений, завязки траекторий, идентификации измерений, экстраполяции и фильтрации (коррекции результатов экстраполяции по идентифицированным измерениям), сброса траекторий.

**Ключевые слова:** наземные цели, радиолокационные ориентиры, многоцелевое сопровождение, реальный луч, синтезирование апертуры антенны.

**Abstract.** The features of multi-target tracking of ground objects of natural and artificial origin in coherent and non-coherent air-based radars are considered. It is shown that concurrent continuous formation of the current estimates of the coordinates of ground targets used in the navigation and aiming procedures should be carried out taking into account carrier's mission, munition used, mode of ground

surface monitoring, types of the targets, radar contrast, presence or absence of target indications from the systems of a higher level of hierarchy. Carrier's mission determines whether the mode of operation of the radar should be coherent or non-coherent. Advantages of using coherent mode of the radar are evaluated. Muniton in addition to the mode determines working coordinates and accuracy requirements. Modes of ground surface monitoring used for different types of targets dictate radically different types of radar images and corresponding processing logic. The role of the operator in solving the problems of multi-target tracking is evaluated. The features of all the major stages of the tracking of ground objects are summarized: formation of primary measurements, track initiation, measurement identification, extrapolation and filtration (correction of extrapolation results by identified measurements), track reset.

**Key words:** ground target, radar marking, multi-target tracking, real beam, focused synthesized aperture.

## **1. Введение**

Вопросы многоцелевого сопровождения наблюдаемых целей с помощью радиолокационных систем воздушного и наземного базирования достаточно подробно рассмотрены в научно-технической литературе, например, в [1-3]. Однако, как правило, авторы данных источников рассматривают алгоритмы многоцелевого сопровождения и особенности их построения применительно к воздушным объектам. В то же время, при построении алгоритмов многоцелевого сопровождения наземных целей (НЦ) необходимо учитывать особенности, присущие процессу формирования их радиолокационных образов и в целом радиолокационного изображения (РЛИ) наблюдаемой земной поверхности.

Необходимо заметить, что в [5] отмечены особенности сопровождения бортовой РЛС одиночных НЦ, которые при организации процедуры многоцелевого сопровождения данных целей в той или иной степени также будут присутствовать.

Целью работы является рассмотрение особенностей разработки алгоритмов многоцелевого сопровождения НЦ, которые обусловлены спецификой измерения координат местоположения данных объектов и формирования РЛИ наблюдаемой поверхности радиолокационными системами различных типов, устанавливаемых на авиационных носителях.

## **2. Факторы, влияющие на разработку алгоритмов многоцелевого сопровождения НЦ**

Многоцелевое сопровождение (МЦС) наземных целей, рассматриваемое как составная часть режима обзора земной поверхности бортовой РЛС воздушного носителя, предназначено для постоянного формирования оценок координат наземных объектов без перехода радиолокатора в режим непосредственного измерения местоположения отдельно взятой цели.

Объектами наблюдения бортовых РЛС обзора земли, как известно [6], являются точечные и поверхностно-распределенные цели, в качестве которых могут выступать радиолокационно-контрастные ориентиры в виде участков местности с характерными особенностями, небольших поселков и городов, железнодорожных узлов, мостов, а также объекты городской и военной инфраструктуры, стационарные искусственные инженерные сооружения, объекты военной техники.

В зависимости от стоящих перед носителем и бортовой РЛС задач координаты данных объектов могут быть известны заранее либо определяться в процессе решения конкретной задачи. В частности, при решении задач навигации летательного аппарата (ЛА) координаты ориентиров известны заранее и используются для уточнения местоположения воздушного носителя. Также заранее могут задаваться координаты стационарных целей, которые выбраны для поражения при использовании бортовой РЛС в режиме прицеливания. Работа же по оперативно обнаруживаемым целям предполагает измерение их координат непосредственно в процессе обзора земной поверхности.

В общем случае при МЦС НЦ необходимо решать те же задачи, что и в режиме многоцелевого сопровождения воздушных целей (ВЦ) [4]:

- формирование первичных измерений;
- завязку (обнаружение) траекторий;
- экстраполяцию траекторий;
- идентификацию измерений;
- фильтрацию /коррекцию экстраполированных значений параметров траекторий по результатам идентифицированных измерений;
- ранжирование целей по степени важности;
- сброс траектории (прекращение сопровождений).

Однако на процесс разработки алгоритмов МЦС НЦ оказывают влияние следующие факторы:

- задачи, которые должны решаться носителем РЛС, и виды используемого им вооружения;
- особенности процедуры обзора земной поверхности, реализуемые бортовой РЛС (РЛС), тип целей и специфика их выделения на её фоне;
- наличие и отсутствие информационного обеспечения в виде цифровой карты местности;
- наличие или отсутствие целеуказаний от систем более высокого уровня иерархии.

Задачи, решаемые носителем, определяют выбор типа бортовой РЛС и режимов ее работы. В зависимости от решаемых задач РЛС может быть построена по когерентному или некогерентному принципу. В частности, если основными целями являются крупные стационарные наземные объекты, то для наблюдения их можно обойтись некогерентным бортовым радиолокатором, работающим в режиме обзора земной поверхности реальным лучом (РЛ) антенны. Если же основными объектами, по которым должен работать носитель являются малоразмерные объекты как неподвижные, так и движущиеся, а также объекты средних размеров, то бортовой радиолокатор

должен быть когерентным и иметь режим синтезирования искусственной апертуры антенны (РСА).

В свою очередь, используемое носителем вооружение предопределяет перечень координат наблюдаемых целей, которые необходимо оценивать, точности их представления, используемую систему координат (полярную, прямоугольную, географическую и т. д.), а также режимы обзора земной поверхности бортовой РЛС.

Выбор режима обзора земной поверхности также связан с типом РЛС и задачами, возлагаемыми на носитель. Как правило, если РЛС является некогерентной, то, как правило, используются три вида обзора: круговой, секторный, микроплан. Если радиолокатор является когерентным, то возможно осуществление более разнообразных видов обзора, а именно: полосовой, секторный, микроплан в режиме РЛ, микроплан в режиме доплеровского обужения луча (ДОЛ), микроплан в режиме фокусированной синтезированной апертуры (ФСА), микроплан в режиме телескопического обзора. В свою очередь, при работе по НЦ обычно используются два основных режима функционирования РЛС — обзор и прицеливание (сопровождение). При этом режимы обзора подразделяются на картографирование в режиме РЛ, в режимах среднего (СР) и высокого разрешения (ВР), последний из которых еще именуют режимом детального разрешения [4].

Основным отличием НЦ от воздушных является то, что, как правило, их нельзя считать точечными, поскольку они могут занимать несколько элементов разрешения, т.е. являются поверхностно-распределенными, что затрудняет точное измерение их координат и соответственно сопровождение.

При этом выделяют площадные цели (рис. 1) и линейные (взлётно-посадочные полосы, железнодорожные составы и т. д. — рис. 2), высокоточное сопровождение которых является весьма проблематичным (на рисунках  $l_x, l_y$  — характерные размеры наземной цели по соответствующим координатам,  $\delta D, \delta l_{A3}$  — параметры разрешения РЛС по дальности и линейной шкале азимута, соответственно).

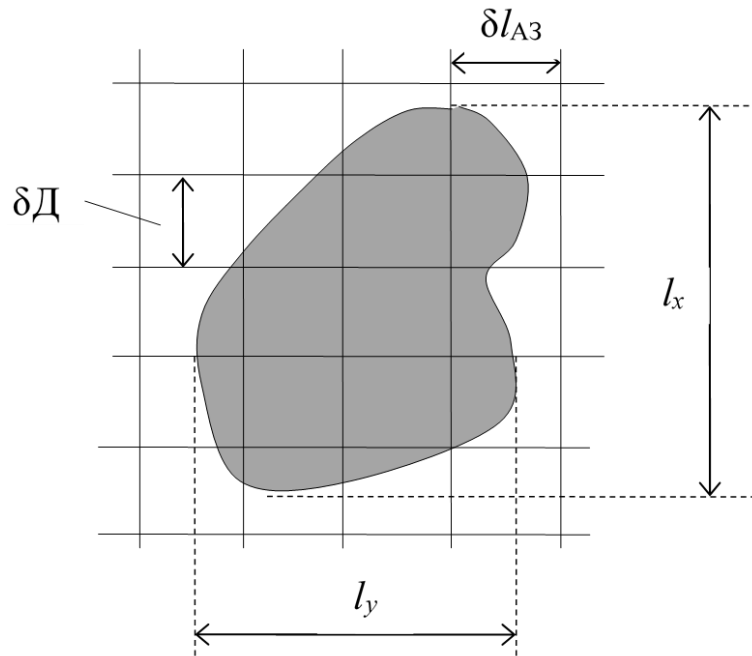


Рис. 1. Пример изображения площадной НЦ

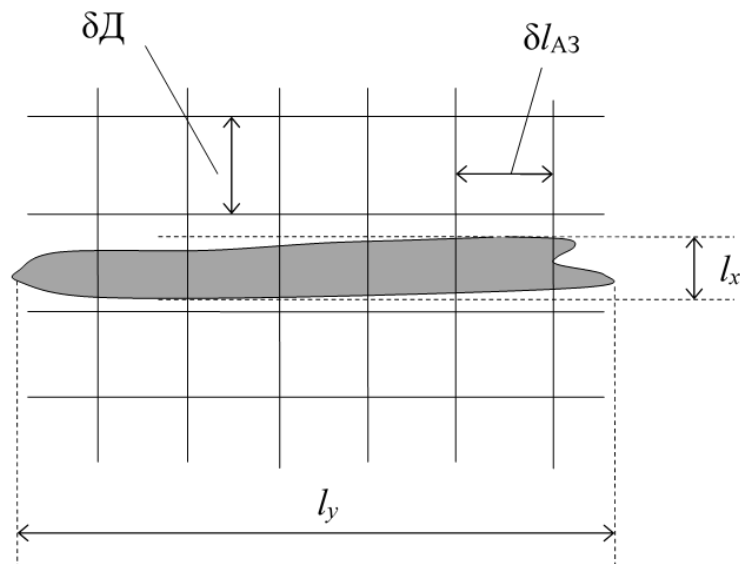


Рис. 2. Пример изображения линейной НЦ

Одновременное корреляционное сопровождение по азимуту изображения нескольких площадных / линейных целей также проблематично.

Специфической задачей при обзоре поверхности земли является выделение НЦ. Они наблюдаются не на фоне свободного пространства как ВЦ, а на фоне отражений от подстилающей поверхности, что затрудняет их селекцию и, соответственно, измерение их координат и сопровождение. При этом по отношению к фону НЦ могут иметь как положительный, так и отрицательный контраст (например, взлётно-посадочные полосы аэродромов, участки шоссе и

т. д.), либо не иметь его как такового. Поэтому, как правило, при первичной оценке координат наблюдаемых целей участвует человек-оператор, который, накладывая подвижный маркер на изображение цели, определяет точку, относительно которой ведется отсчет координат цели.

Принципиально разный характер просмотра земной поверхности при обзоре земной поверхности в некогерентном и когерентном режимах работы РЛС предопределяет и разные варианты представления радиолокационного изображения (РЛИ) наблюдаемой поверхности и объектов на ней. В некогерентном режиме, как правило, РЛИ представляется в полярной системе координат в виде сектора (рис. 3), а в когерентном — предпочтительнее использование прямоугольной системы (рис. 4). В свою очередь, использование различных систем координат обуславливает использование соответствующих им моделей состояния и измерений.

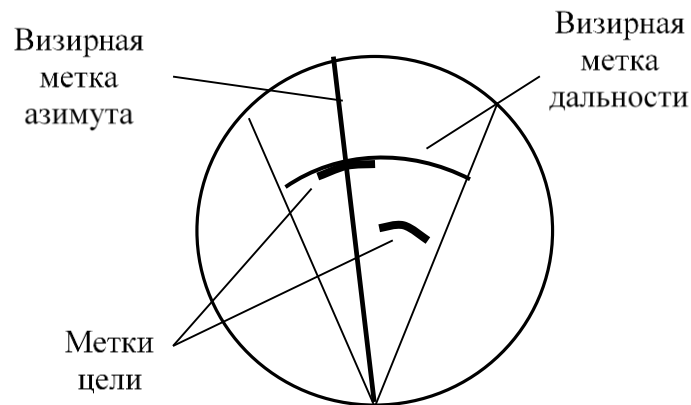


Рис. 3. Секторный вариант радиолокационного изображения

Необходимо отметить, что скорость перемещения наземных подвижных целей пренебрежимо мала по сравнению со скоростью носителя, в связи с чем при МЦС наземных целей достаточно использовать простые модели состояния, как правило, второго порядка. Исключением могут быть только математические модели состояния для морских целей [7], которые являются более маневренными по отношению к НЦ.

В общем случае состав модели состояния при МЦС определяется необходимостью решения задач управления траекторией полёта и набором

команд целеуказаний. С учётом особенности решения этих задач в некогерентном (секторном) режиме достаточно иметь оценки наклонной дальности, бортовых пеленгов и скоростей их изменения.

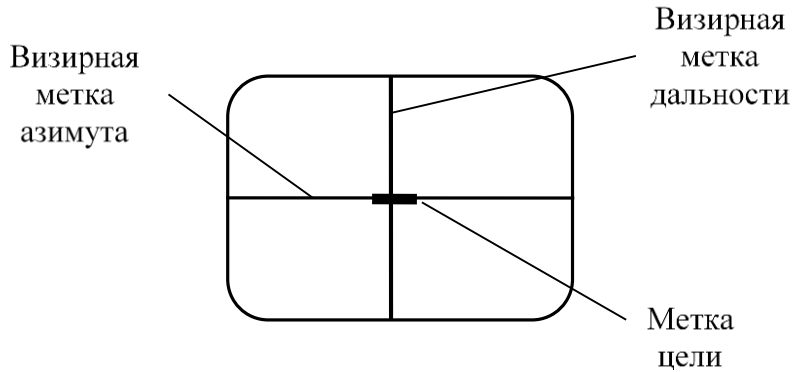


Рис. 4. Радиолокационное изображение цели в прямоугольной системе координат

При использовании режимов СА достаточно иметь оценки координат целей и скоростей их изменения в прямоугольной системе координат. Необходимо, однако, отметить сложности повторного просмотра в этом режиме зоны ответственности, а, соответственно, и формирования последующих измерений.

Специфической особенностью РЛИ по сравнению с фотографическим представлением является отсутствие передачи на изображении высоты наблюдаемого объекта. Кроме того, при обзоре земной поверхности в режиме РЛ формируемое изображение носит условный характер, поскольку линейный размер элемента разрешения по шкале азимута (рис. 5) зависит от дальности

$$\delta l_{Az} = D \times \delta \varphi_r = D \times \theta_{Ar}, \quad (1)$$

где  $\delta \varphi_r$  — угловая разрешающая способность РЛС,  $D$  — дальность до цели,  $\theta_{Ar}$  — ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС в горизонтальной плоскости.

При использовании когерентного режима с СА отображение участка наблюдаемой поверхности обеспечивается в прямоугольной системе координат с существенно более высокой адекватностью его воспроизведения.



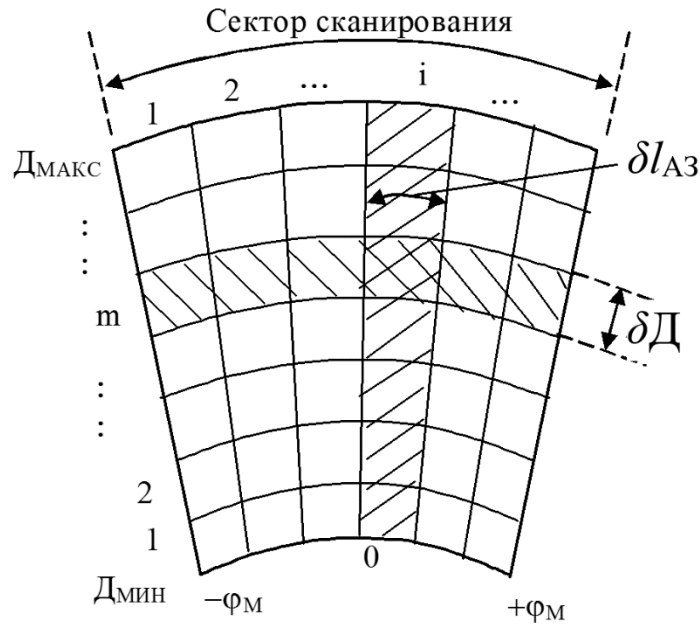


Рис. 5. Зависимость линейного разрешения по азимуту от дальности

Возможность формирования адекватного РЛИ наблюдаемой поверхности позволяет реализовать алгоритмы МЦС НЦ не только в виде сопровождения траекторий, но и виде сопровождения изображений.

На сформированном кадре РЛИ наблюдаемой поверхности положение цели однозначно определяется ее измеренными координатами. При движении носителя координаты НЦ меняются и, следовательно, меняется ее положение на РЛИ. Поэтому, рассматривая последовательно формируемые кадры РЛИ, можно осуществить покадровое сопровождение наблюдаемой цели. При покадровом сравнении РЛИ наряду с сопровождением стационарных целей возможно одновременно и решение задачи селекции наземных движущихся целей с последующим их сопровождением.

### 3. Особенности выполнения этапов МЦС наземных целей

С учётом отмеченных обстоятельств кратко остановимся на особенностях выполнения отдельных этапов МЦС НЦ.

Формирование первичных измерений площадных и линейных целей осуществляется либо по ближайшему их элементу, либо по геометрическому или энергетическому центру, определяемому по результатам интегрирования площади цели по дальности и азимуту.

Идентификация измерений осуществляется, как правило, стробовым методом, при этом размеры стробов должны превышать размеры целей.

Завязка траектории НЦ, как правило, выполняется оператором путём маркирования того или иного участка цели метками дальности и азимута. Эта операция выполняется либо по радиолокационному изображению, либо по целеуказаниям от сопрягаемых с РЛС оптических систем, либо систем более высокой иерархии, например, АК РЛДН [8].

Экстраполяция и фильтрация идентифицированных измерений может выполняться с использованием алгоритмов классического оценивания с использованием фильтров второго порядка. Специфической эта процедура становится при представлении результатов оценивания в прямоугольных координатах при условии, что в качестве измерений используются дальности до целей и их бортовые пеленги. В такой ситуации для оценивания целесообразной становится процедура расширенного фильтра Калмана либо может выполняться пересчет измерений дальности и пеленгов в косвенные (искусственные) измерения в прямоугольных координатах с дальнейшей их линейной фильтрацией.

В виду того, что наблюдение НЦ ведется на фоне отражений от земли, отметка цели может маскироваться фоновыми отражениями. В результате в процессе МЦС некоторые отметки сопровождаемых целей могут пропадать в текущий момент времени и появляться затем при следующих циклах обзора. Кроме того, сильные фоновые отражения могут быть восприняты как НЦ. В этой связи для исключения ложного сброса сопровождаемой траектории НЦ при МЦС должно быть предусмотрено сопровождение по «памяти». Для его реализации могут быть использованы подходы, используемые при МЦС ВЦ [6].

### **Литература**

1. Фарина А. Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993, 320 с.

2. Бар-Шалом Я., Ли Х.-Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев; Издательство КВЦ, 2000, 428 с.
4. Меркулов В. И., Верба В. С., Ильчук А. Р. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексах. Т. 1. Теоретические основы. РЛС в составе интегрированного авиационного комплекса / Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2018. – 360 с.
5. Меркулов В. И., Верба В. С., Ильчук А. Р., Колтышев Е. Е. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексах. Т. 2. Сопровождение одиночных целей / Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2018. – 348 с.
6. Дудник П. И., Герасимов А. А., Ильчук А. Р. и др. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / Под ред. П. И. Дудника. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
7. Li X. Rong, Gilkov Vesstlin P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part 1: Dynamic Models. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System Vol. 39, No 4. October 2003. P. 1333.-1363.
8. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. М.: Радиотехника, 2014. 528 с.

**Для цитирования:**

В. С. Верба, В. И. Меркулов, Б. Г. Татарский. Особенности многоцелевого сопровождения наземных целей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/17/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.17