

РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ОДНОВРЕМЕННЫМ КОНТРОЛЕМ БАРЬЕРНОЙ ЗОНЫ

Белавин Никита Александрович,

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
г. Ярославль, Россия, nbelavin1987@rambler.ru

Силантьев Александр Борисович,

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
г. Ярославль, Россия, silantiev@mail.ru

Бабкин Юрий Владимирович,

Акционерное общество РТИ им. А.Л. Минца, Москва, Россия,
ybabkin@rti-mints.ru

Ким Виолетта Игоревна,

Акционерное общество РТИ им. А.Л. Минца, Москва, Россия

Тимошенко Александр Васильевич,

Акционерное общество РТИ им. А.Л. Минца, Москва, Россия,
atimosenko@rti-mints.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-9-4-12

Manuscript received 02 July 2022;

Accepted 28 July 2022

Ключевые слова: высокоорбитальные космические объекты, обзорный радиолокатор, многообзорное наблюдение, управление наблюдениями, процедура "track-before-detect", пропускная способность

Радиолокационное наблюдение (РЛН) космических объектов (КО) имеет целый ряд преимуществ по сравнению с оптическим. Актуальной является задача РЛН удалённых КО, к которым в числе других относят высокоорбитальные КО (ВОКО) с высотой апогея более 2500 км над поверхностью Земли. В современных радиолокаторах известные модели, методы и технические решения наблюдения удалённых КО реализуются за счёт увеличения длительности (энергии) зондирующих сигналов (ЗС) и времени наблюдения. Данное ограничение не позволяет осуществлять одновременно с наблюдением ВОКО обнаружение и сопровождение объектов "барьерной зоны" (БЗ) при решении штатных задач радиолокационной станцией дальнего обнаружения (РЛС ДО). В результате пропускная способность радиолокатора может снижаться. Предлагается использовать ресурсоэффективные методы многообзорного наблюдения (МОН). Методы позволяют эффективно накапливать энергию отражённых сигналов, полученных в течение нескольких обзоров РЛС ДО. Цель. Обеспечение требуемой пропускной способности РЛС ДО при обзоре пространства БЗ и наблюдении ВОКО с использованием методов МОН в условиях ограниченного временного ресурса. В исследовании ставится и решается задача ресурсоэффективного управления РЛС ДО, заключающегося в планировании и организации обзора РЛС ДО для наблюдения ВОКО с одновременным контролем (обнаружением и со-

провождением) объектов БЗ. В целом, в рамках статьи формулируется задача РЛН удалённых КО, обосновывается алгоритм планирования и организации обзора радиолокатора для наблюдения ВОКО в условиях ограниченного энергетического (временного) ресурса. Методы. Аналитическими методами обосновывается алгоритм ресурсоэффективного управления РЛС ДО с использованием МОН. В основе ресурсоэффективного управления лежит использование априорной информации о параметрах траекторий ВОКО, планирование, организация и совместная обработка результатов РЛН. Обосновывается также модель РЛС ДО с каналом МОН в виде системы массового обслуживания (СМО) для оценки пропускной способности радиолокатора. Результаты. Результаты имитационного моделирования свидетельствуют о сохранении требуемой пропускной способности РЛС ДО при наблюдениях ВОКО, что подтверждает работоспособность и эффективность метода управления радиолокатором для решения задачи одновременного наблюдения ВОКО и контроля объектов БЗ. Заключение. Структура радиолокатора с каналом МОН и метод ресурсоэффективного управления позволяют реализовать наблюдение ВОКО с одновременным обнаружением и сопровождением объектов БЗ. В отличие от существующих предлагаемый алгоритм планирования и управления обзором обеспечивает требуемую пропускную способность радиолокатора при наблюдениях ВОКО.

Информация об авторах:

Белавин Никита Александрович, адъюнкт 2 курса, Ярославское высшее военное училище ПВО (ЯВВУ ПВО), г. Ярославль, Россия

Силантьев Александр Борисович, к.т.н, доцент, профессор кафедры, Ярославское высшее военное училище ПВО (ЯВВУ ПВО), г. Ярославль, Россия

Бабкин Юрий Владимирович, ведущий инженер-аналитик, акционерное общество РТИ им. А.Л. Минца (АО РТИ им. А.Л. Минца), Москва, Россия

Ким Виолетта Игоревна, главный разработчик программного обеспечения, акционерное общество РТИ им. А.Л. Минца (АО РТИ им. А.Л. Минца), Москва, Россия

Тимошенко Александр Васильевич, д.т.н., профессор, начальник комплексного отдела, акционерное общество РТИ им. А.Л. Минца (АО РТИ им. А.Л. Минца), Москва, Россия

Для цитирования:

Белавин Н.А., Силантьев А.Б., Бабкин Ю.В., Ким В.И., Тимошенко А.В. Ресурсоэффективное управление радиолокационной станцией дальнего обнаружения для наблюдения высокоорбитальных космических объектов с одновременным контролем барьерной зоны // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №9. С. 4-12.

For citation:

Belavin N.A., Silantiev A.B., Babkin Yu.V., Kim V.I., Timoshenko A.V. (2022) Resource efficient control of long-range detection radar for monitoring of high earth orbit objects with simultaneous control of barrier zone. T-Comm, vol. 16, no.9, pp. 4-12. (in Russian)

1. Введение

Современные многофункциональные радиолокаторы, к которым относят также РЛС ДО, решают ряд важных задач по контролю космического пространства [1]. С их помощью осуществляется радиолокационное наблюдение множества объектов, находящихся в зоне ответственности радиолокатора, так называемой «барьерной зоне». Важной и актуальной является задача обнаружения малоразмерных и удаленных КО, среди которых особый интерес представляют объекты, находящиеся на высокоэллиптических и геостационарных орбитах [2-4].

Наблюдение таких ВОКО из-за значительной удаленности от поверхности Земли характеризуются повышенной сложностью. В настоящее время поиск и обнаружение ВОКО осуществляется РЛС ДО с использованием пачек сигналов большой длительности [2,5]. Обнаружения ВОКО и измерения их координат приводит в целом к неэффективному расходованию временного ресурса радиолокатора. В течение определенного интервала времени, необходимого для наблюдения ВОКО, выполнение штатных задач, связанных с контролем объектов в БЗ, как правило, прерывается.

Важной тактической характеристикой радиолокатора является его пропускная способность [6-8]. Известны методы повышения пропускной способности современных обзорных радиолокаторов за счет адаптивных или многоэтапных процедуры обнаружения [9,10], когда в радиолокаторах с программируемым (управляемым) обзором имеется возможность перераспределения энергии излучения за счет изменения продолжительности зондирований определенных угловых направлений. Однако увеличение времени зондирования этих угловых направлений приводит при наблюдениях ВОКО к дополнительному расходу временного ресурса и снижению пропускной способности РЛС ДО. Сохранение пропускной способности при одновременном увеличении дальности действия радиолокатора возможно за счет применения методов МОН [11,12], когда энергия и требуемое число зондирований в определенных угловых направлениях (общее время накопления) распределяются на несколько обзоров.

Методы МОН являются альтернативой известным и реализованным в радиолокаторах методам увеличения энергетического потенциала на основе сигналов большой длительности [1,2,5]. При использовании методов МОН увеличение энергии сигнала происходит за счет некогерентного многообзорного накопления эхо-сигналов, то есть, по сути, путем объединения результатов нескольких обзоров в единый радиолокационный сигнал. Методы, решающие единую задачу «обнаружения-измерения», с начала 1990-х годов получили в иностранной научной литературе название «track-before-detect» (TBD) [12]. Применение методов МОН (технологий TBD) предполагает повышение «энергетики» радиолокационных сигналов за счет увеличения общей продолжительности радиолокационного контакта с объектом локации [13].

Управление обзором на основе методов МОН призвано обеспечить эффективное распределение ограниченного временного ресурса наблюдения [7,14]. При этом в ходе планирования и организации многообзорных наблюдений ВОКО временной ресурс распределяется на несколько периодов обзора радиолокатора.

В этой связи необходимы эффективные методы управления распределением временного ресурса РЛС ДО. Решения задачи управления основано на априорной информации о характеристиках целей в зоне ответственности радиолокатора, траекториях и параметрах их движения. Траекторная информация от внешних источников, является исходной для планирования и организации функционирования радиолокатора в ходе мониторинга космического пространства.

Управление наблюдениями радиолокатора следует осуществлять так, чтобы, реализуя в радиолокаторе процедуру совместной обработки результатов наблюдений множества обзоров, наилучшим образом принять решение о траекториях обнаруживаемых целей. Необходимы также методики оценки эффективности управления.

В настоящее время достаточно хорошо исследованы и подробно проанализированы различные аспекты применения методов МОН и технологий TBD [11-13]. Однако, в известных источниках [12,13] подобные технологии и методы рассматриваются лишь в целях повышения эффективности радиолокаторов в части увеличения дальности обнаружения целей. Вопросы обеспечения требуемой пропускной способности радиолокатора обычно не рассматриваются. Кроме того, при анализе методов МОН не учитывается их влияние на имеющийся ограниченный временной ресурс наблюдения радиолокатора. В статье рассматриваются вопросы управления РЛС ДО на основе методов МОН с учетом ограниченности временного ресурса наблюдения.

2. Постановка задачи управления наблюдениями радиолокатора

РЛС ДО, как и большинство современных радиолокаторов являются многофункциональными, осуществляя одновременно обзор космического пространства и обнаружение целей, завязку (обнаружение) траекторий и сопровождение обнаруженных целей [1,2,5]. Реализованный в РЛС ДО «функционал» определяет их пропускную способность, то есть число обнаруживаемых и сопровождаемых целей в единицу времени. Сохранить пропускную способность, в том числе при наблюдении удаленных КО, или же добиться её минимального снижения представляется возможным за счет рационального распределения временного ресурса радиолокатора на основе методов МОН [2,5,14].

Математическая постановка научной задачи может быть сформулирована в следующем виде: необходимо разработать усовершенствованный метод управления обзором пространства РЛС ДО, обеспечивающий сохранение её пропускной способности (или минимальное допустимое снижение) при наблюдении удаленных целей. Предполагается, что радиолокатор также осуществляет обзор БЗ и сопровождение обнаруженных целей с целью получения траекторной информации требуемого качества.

Математическую формулировку научной задачи запишем с использованием отношения предпочтения (\succ) для существующих и исследуемых (реализуемых, например, на основе МОН) методов управления обзором пространства. Сравнение производится в условиях одновременного обзора БЗ и сопровождения удаленных объектов, в том числе ВОКО. Решение предполагает сравнение разрабатываемого метода m^* с ранее существующими $m_{is} \in M_{is}$

$$m^* \succ A_T^H(m^*) > A_T^H(m_{is}),$$

$$m^* \in M, m_{is} \in M_{is},$$

где m^* – разрабатываемый на основе МОН метод управления обзором пространства РЛС ДО; m_{is} – существующий метод управления обзором; $M (M_{is})$ – множество разрабатываемых (существующих) методов управления обзором пространства соответственно; $A_T^H(m)$ – показатель, характеризующий метод обзора (пропускная способность радиолокатора при одновременном обзоре БЗ и сопровождении целей, включая ВОКО).

Необходимо также определить и учесть ограничения на допустимые значения и совокупности значений параметров: время обзора радиолокатора (период обновления информации) не превышает допустимого, а выполняемые наблюдения обеспечивают необходимую точность, то есть дисперсию ошибок измерения координат $\sigma_\alpha^2 \leq \sigma_\alpha^2_{дон}$. Иногда также дополнительно определяют долю временного ресурса радиолокатора, выделяемую для реализации этапа поиска радиолокатора [7]

$$R_{1min} \leq R_1 \leq R_{1max}.$$

Таким образом, при одновременном обзоре БЗ и сопровождении удаленных объектов типа ВОКО разрабатываемый и реализуемый на основе многообзорного наблюдения метод m^* оказывается предпочтительнее существующего метода m_{is} управления обзором пространства. То есть, метод m^* , основанный на МОН, должен обеспечить максимальное по сравнению с существующим методом m_{is} увеличение пропускной способности радиолокатора $\Delta A_T^H(m) = A_T^H(m) - A_T^H(m_{is})$ при одновременном наблюдении удаленных объектов типа ВОКО.

Каждую цель будем характеризовать процессом изменения нескольких измеряемых координат $\vec{\alpha}(t)$. В общем виде пространственную координату некоторого объекта можно представить в виде некоторого многомерного процесса $\vec{\alpha}(t)$. Будем полагать, что координату определенной i -ой цели радиолокатор наблюдает с периодом T_{oi} для последующего воспроизведения процесса $\vec{\alpha}_i(t)$. Вопросы выбора и обоснования периодичности МОН при реализации данных методов достаточно хорошо исследованы [9,10].

Рассмотрим радиолокатор, осуществляющий обзор некоторой зоны ответственности. В пределах этой зоны осуществляется обнаружение новых и сопровождение обнаруженных целей. Пусть обзор пространства с учетом обнаружения и сопровождения объектов зоны происходит за некоторое время T_s . В зависимости от внешних условий длительность очередного обзора может несколько изменяться. Будем полагать, что продолжительность j -го обзора составляет T_{sj} .

Длительность очередного обзора T_{sj} составляет некоторый ресурс наблюдения, который частично или полностью может быть потрачен на обнаружение и сопровождение совокупности целей. От обзора к обзору этот ресурс может несколько изменяться. Наблюдение (обнаружение, завязка траекторий и сопровождение каждой цели) приводит к периодическому расходу имеющегося ресурса наблюдения. В течение периода обзора ресурс для наблюдения каждой i -ой цели расходуется определенными «квантами» наблюдения Δt_i . Будем также полагать, что обнаружение и сопровождение ряда целей (например, ВОКО) осуществляется методами МОН с учетом имеющейся априорной траекторной информации.

Задача управления наблюдениями [15] характеризуется тем, что плотности вероятностей $p_n(y|\alpha)$ наблюдаемых величин Y_n заданы не полностью, а содержат некоторые «свободные» параметры u_n (параметры управления), которые следует выбирать перед наблюдением величины Y_n :

$$p_n(y|\alpha) = p_n(y|\alpha, u_n).$$

В результате «наблюдатель» оказывает влияние на статистические свойства наблюдаемых величин и должен распорядиться этой возможностью «управлять наблюдениями» в интересах своей конечной задачи – принятия наилучших решений о ненаблюдаемом траекторном процессе $\vec{\alpha}(t)$. Рассматриваемое далее управление обзором радиолокатора при наличии априорной координатной информации о целях представляет характерный пример решения задачи управления наблюдениями.

3. Управление обзором радиолокатора

На практике радиолокатор осуществляет сопровождение большого числа целей, каждая из которых характеризуется процессом изменения координат $\alpha_i(t)$. В [14] было предложено рассматривать организацию наблюдений совокупности целей, как задачу мультиплексирования множества процессов $\vec{\alpha}_i(t)$. То есть в качестве мультиплексируемых процессов $\vec{\alpha}_i(t)$ будем анализировать процессы изменения координат наблюдаемых целей. Период мультиплексирования составляет T_{sj} и при нерегулярном обзоре может изменяться от обзора к обзору.

Процесс управления обзором радиолокатора может быть представлен в виде алгоритма (рис. 1). В процессе управления для каждого текущего (j -го) периода обзора осуществляется рациональное расходование имеющегося временного ресурса радиолокатора T_{sj} . Для этого с учетом априорной

траекторной информации определяются периодичность и продолжительность наблюдений каждого ВОКО [14]. Далее, в ходе анализа периодических последовательностей «временных окон» предполагаемых (потенциальных) зондирований целей, определяется совокупность сопровождаемых целей-кандидатов.

Потенциальные моменты зондирования этих целей соответствуют определенному периоду обзора. На этапе планирования из всех целей-кандидатов с учетом имеющегося временного ресурса окончательно отбираются объекты для реализации наблюдений в очередном периоде обзора.

На практике планирование осуществляется на период времени порядка десятков минут с дискретизацией до минуты. В отличие от этапа планирования тактовое расписание создается на более короткий интервал времени.

Пусть в определенный момент времени в зоне действия радиолокатора находится совокупность целей для их последующего наблюдения. Очевидно, можно различным образом распределить имеющийся свободный ресурс T_{sj} для наблюдения этих объектов с учетом установленных приоритетов и рассчитанной продолжительности интервалов («квантов») Δt_i однократного визирования каждой цели. Временной ресурс данного периода обзора расходуется «квантами» Δt_i для наблюдения отобранных целей $T_{sj} - \sum_i a_{ij} \Delta t_i$. Значение веса устанавливается здесь равным $a_{ij} = 1$, если некоторая i -ая цель отобрана для наблюдения в j -ом обзоре, в противном случае вес $a_{ij} = 0$.

В исходном состоянии все элементы массива нулевые ($a_{ij} = 0$). По поступающему ЦУ или по результатам поиска необходимо организовать сопровождение совокупности объектов, однократное визирование каждого из которых происходит в течение интервала наблюдения Δt_i с определенным периодом T_{oi} .

Таким образом, на этапе планирования управление наблюдениями заключается в определении периода наблюдений T_{oi} целей, а также потенциальных интервалов обзора радиолокатора для визирования выбранных целей (рис. 1). Состав совокупности целей, предварительно отобранных для наблюдения в очередном обзоре, может уточняться.

Задачу выбора подмножества обнаруживаемых и сопровождаемых целей из всей совокупности целей-кандидатов можно свести, например, к известной математической задаче о «рюкзаке» [16]. Наилучшим будет решение, когда имеющийся временной ресурс наблюдения j -ого обзора расходуется наиболее полно

$$\left(T_{sj} - \sum_i a_{ij} \Delta t_i \right) \rightarrow \min .$$

К точным методам решения подобных задач относят: полный перебор, метод ветвей и границ, метод динамического программирования [16]. Метод полного перебора из-за большого числа всех состояний (возможных вариантов наблюдений) является недостаточно эффективным. Метод ветвей и границ предполагает, по сути, сокращение полного перебора с отсечением заведомо плохих решений. Возможно также решение задачи методом динамического программирования, основанным на принципе оптимальности Беллмана.

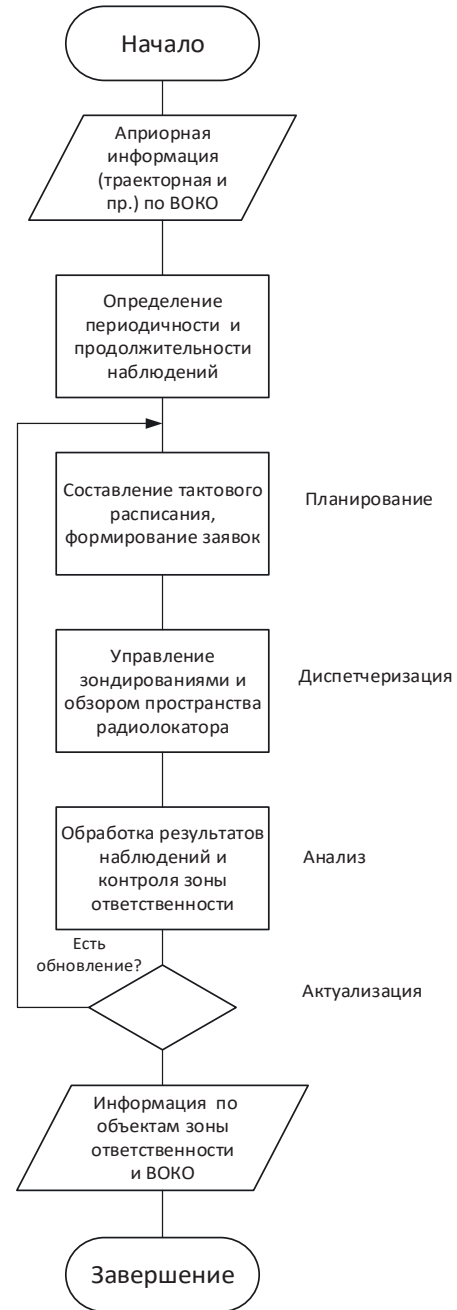


Рис. 1. Алгоритм управления обзором РЛС ДО

К приближенным методам относят жадные алгоритмы, на их основе может быть найдено относительно хорошее и «дешевое» решение [16].

На практике функционирование радиолокатора осуществляется под управлением соответствующих программных модулей. Для организации функционирования РЛС ДО, в том числе с излучением в эфир, программными модулями формируются заявки. Среди формируемых можно выделить заявки, которые обеспечивают регулярный обзор БЗ и сопровождение КО из этой зоны, заявки однократного визирования выбранных ВОКО для их последующего многообзорного наблюдения и т.п. Сформированные заявки отправляются в диспетчер, где из заявок формируется так называемое «тактовое расписание».

Для этого поступающие заявки упорядочиваются, ранжируются и выстраиваются в ряд по времени выполнения. Не попадающие в расписание заявки, характеризующиеся наименьшим приоритетом, сбрасываются с выполнения.

Таким образом, в ходе управления тактовым расписанием радиолокатора на очередном этапе наблюдения целей необходимо корректировать список объектов-кандидатов, используя максимально полно имеющийся временной ресурс наблюдения очередного периода обзора. Задача управления обзором состоит в оптимальном распределении ресурса наблюдения между наблюдаемыми в данный момент объектами и ВОКО с использованием методов МОН. По результатам очередного обзора информация по целям может уточняться, уточненная информация используется при составлении очередного тактового расписания. Задача радиолокационного наблюдения может быть решена, например, на основе методов приоритетного планирования в системах реального времени с учетом прогноза количества целей в зоне ответственности РЛС ДО [5,14].

4. Анализ эффективности управления

На основании известного подхода [6,7] в ходе дальнейшего анализа представим РЛС ДО в виде системы массового обслуживания (СМО). Объекты, находящиеся в зоне ответственности радиолокатора, включая ВОКО, будем рассматривать как заявки на входе СМО (рис. 2).

Поступающие заявки проходят последовательно три этапа (фазы) обслуживания: обнаружение сигналов, обнаружение траекторий и сопровождение объектов. Обслуживание завершается после выхода объектов за пределы зоны ответственности радиолокатора. С учетом этого модель содержит трехфазные каналы обслуживания заявок (объектов в зоне ответственности РЛС ДО).

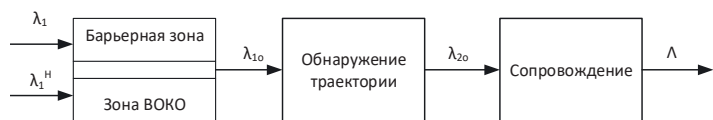


Рис. 2. Трехфазная (трехэтапная) модель радиолокатора в виде СМО

На входы каналов (БЗ и зоны ВОКО) поступают потоки заявок с интенсивностями λ_1 и λ_1^H соответственно. Отличия этих каналов поиска обусловлены особенностями областей зоны ответственности, интенсивностями и характером потоков поступающих целей.

Анализа эффективности изложенного в статье алгоритма проводился путем оценки затрат временного ресурса для наблюдения КО, проходящих через сектор ответственности РЛС ДО с использованием данных реальной космической обстановки. В процессе эксперимента по данным каталога NORAD [17] вычислялось моменты времени входа КО в зону обзора «снизу» по углу места. Предполагалось, что такие цели составляют основной поток КО, сопровождаемых РЛС ДО. Численный эксперимент проводился применительно к радиолокатору, находящемуся в средней полосе страны, с размером сектора обзора в 120 градусов по углу места и биссектрисой сектора обзора, направленной на юг.

Эксперимент проводился для следующих параметров сопровождения объектов:

- средняя продолжительность сопровождения КО – 60 с;
- темп сопровождения КО (период обзора) – 2 с.

Анализ показал, что заявки на входе СМО, могут быть представлены квазистационарным, простейшим потоком Пуассона. На интервале стационарности закон распределения времени между соседними заявками можно полагать экспоненциальным с плотностью $P_1(t) = \lambda_1 \exp(-\lambda_1 t)$.

Дальнейший анализ радиолокатора в виде СМО будем выполнять, исходя из условий баланса времени, с использованием известного соотношения [6,7]

$$R_1 + R_2 + R_3 = 1. \tag{1}$$

Здесь R_1, R_2 и R_3 – общие относительные затраты времени на обзор зоны поиска, обнаружение траекторий и сопровождение целей соответственно.

Для случая совместного наблюдения ВОКО и объектов БЗ будет справедливо соотношение

$$R'_1 + R'_2 + R'_3 = 1, \tag{2}$$

где R'_1, R'_2 и R'_3 – общие относительные затраты времени на обзор, обнаружение траекторий и сопровождение целей БЗ и наблюдении ВОКО.

Относительные временные затраты на обзор БЗ R_1 и зоны ВОКО R_1^H суммируются

$$R'_1 = R_1 + R_1^H = \tau_1 n_1 \frac{1}{T_s} + R_1^H. \tag{3}$$

Здесь τ_1 – время, затрачиваемое на зондирование направления в БЗ; n_1 – число зондируемых направлений БЗ; T_s – период обзора БЗ.

Анализ показывает, что число зондируемых направления при поиске ВОКО по точной информации целеуказания может быть относительно невелико $n_1^H \ll n_1$ и обращения к зоне ВОКО могут быть достаточно редкие $T_{oi} > T_s$. Однако, в целом временные затраты по поиску ВОКО оказываются существенными. Это связано с большой продолжительностью зондирования каждого направления зоны ВОКО $\tau_1^H \gg \tau_1$. Так, например, для увеличения дальности действия радиолокатора лишь на 40% время зондирования (излучаемую энергию) необходимо увеличивать в четыре раза. Дополнительно необходимо учитывать также временные затраты на «обслуживание» ложных отметок. Потоком ложных отметок можно пренебречь, лишь когда затраты на «обслуживание» ложных отметок относительно невелики (малая вероятность ложных тревог).

Выходящий поток первой фазы λ_{1o} служит входящим для второй фазы – фазы обнаружения траекторий. Относительные временные затраты на совместное обнаружение траекторий целей БЗ и траекторий ВОКО также складываются и могут быть представлены в виде

$$R'_2 = R_2 + R_2^H = \tau_2 n_2 \lambda_{1o} + R_2^H. \tag{4}$$

Здесь τ_2 – время, затрачиваемое на зондирование направления в БЗ в режиме обнаружения траектории; значения n_2 определяются критерием обнаружения траекторий типа « n_2 / n_2 », то есть для принятия решения об обнаружении траектории требуется получить n_2 отметок в n_2 соседних зондированиях [7,9]. На практике также дополнительно учитывают непроизводительные временные затраты, связанные с ненулевой вероятностью срыва процесса обнаружения траектории после нескольких циклов зондирования [6,7]. Обнаружение траекторий ВОКО наряду с траекториями объектов БЗ приводит к существенному увеличению относительных временных затрат, связанных с необходимостью увеличения времени на зондирование направлений в зоне ВОКО $\tau_2^H \gg \tau_2$. Общие относительные временные затраты на сопровождение целей (объектов БЗ и ВОКО) определяются выражением, аналогичным (4).

С учетом (1), (2), (3) и (4) в соответствии с известной методикой Кузьмина С.З. [7] можно получить выражение для плотности выходящего потока (пропускной способности) радиолокатора при одновременном сопровождении объектов БЗ и ВОКО

$$\Lambda' = \frac{(1 - R_1 - R_1^H - R_2^H - R_3^H)P_2P_3}{\tau_2N_2 + \tau_3P_2N_3}, \quad (5)$$

где N_2 – среднее число зондирований при обнаружении траекторий с учетом объектов БЗ (ВОКО); N_3 – среднее число зондирований при сопровождении объектов БЗ (ВОКО).

Если наблюдение ВОКО не проводится и весь временной и энергетический ресурс расходуется лишь на решение задач обнаружения траекторий и сопровождения целей, то полученное выражение (5) характеризует так называемую предельную пропускную способность РЛС ДО [6,7]

$$\Lambda = \frac{P_2P_3}{\tau_2N_2 + \tau_3P_2N_3}.$$

Для этого случая множитель $1 - R_1 - R_1^H - R_2^H - R_3^H = 1$. Подобная ситуация наблюдается, когда наиболее приоритетные задачи обнаружения траекторий и сопровождения целей полностью расходуют имеющийся временной ресурс РЛС. Здесь P_2 и P_3 – относительная пропускная способность второй и третьей фазы обслуживания соответственно; τ_2 (τ_3) – среднее время, затрачиваемое на зондирование выбранного направления в режиме обнаружения траектории (сопровождения); N_2 (N_3) – среднее число зондирований при обнаружении траектории (сопровождении цели).

Введем обозначение $1 - R_1 - R_1^H - R_2^H - R_3^H = 1 - \Delta R$. Значение ΔR характеризует относительную долю временного ресурса, выделяемую на поиск целей в БЗ, а также на поиск, обнаружения траекторий и сопровождения ВОКО.

С ростом относительных временных затрат на наблюдение ВОКО $R_1^H + R_2^H + R_3^H$ пропускная способность радио-

локатора «по обслуживанию» целей БЗ снижается.

Эффективное управление радиолокатором, в том числе при наблюдении ВОКО, может быть достигнуто (реализовано) за счет уменьшения веса составляющих, входящих в ΔR . На практике минимальная доля временного ресурса R_1 , выделяемая на поиск новых целей в БЗ, обычно фиксируется.

Составляющие выражения $R_1^H + R_2^H + R_3^H$ определяют относительные затраты временного ресурса на поиск, обнаружение траекторий и сопровождение ВОКО. При методе МОН эти составляющие могут быть уменьшены за счет снижения продолжительности зондирования каждого направления в зонах ВОКО. Реализуемое в методах МОН длительное некогерентное накопление дает выигрыш в характеристиках обнаружения. Это позволяет существенно (практически в 7...10 раз [11,12]) снизить энергию и длительность зондирующих сигналов. Кроме того, при МОН этапы поиска и обнаружения траекторий ВОКО объединяются $R_1^H + R_2^H + R_3^H = R_{12}^H + R_3^H$, в ряде случаев по результатам МОН быть получена также требуемая траекторная информация [5], то есть $R_{12}^H + R_3^H = R_{123}^H$. Все это позволяет оптимизировать и снизить общее число зондирований зон ВОКО для их эффективного наблюдения.

Окончательно для случая МОН выражение (5) имеет вид

$$\Lambda' = \frac{(1 - R_1 - R_{12}^H - R_3^H)P_2P_3}{\tau_2N_2 + \tau_3P_2N_3}$$

где R_{12}^H – относительные временные затраты на результирующее обнаружение траекторий ВОКО.

Оценка затрат временных ресурсов радиолокатора выполнялась методом моделирования, результаты оценки приведены на графике (рис. 3). Показан объем затрачиваемых временных ресурсов при работе штатных алгоритмов РЛС ДО, отдельно показано ожидаемое снижение объема затрат временного ресурса радиолокатора за счёт использования метода МОН.

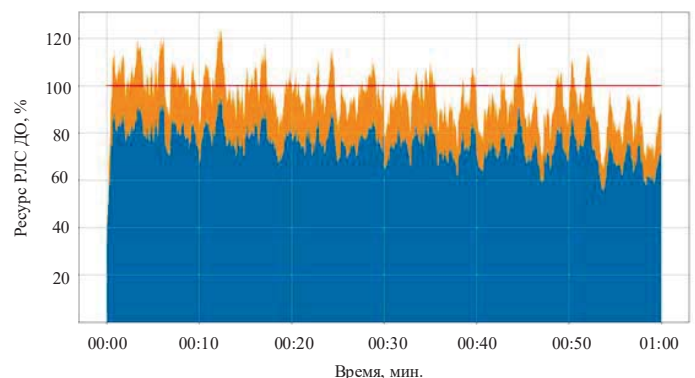


Рис. 3. Оценка затрат временных ресурсов радиолокатора на сопровождение КО, включая ВОКО

Таким образом, при многообзорном наблюдении ВОКО относительные затраты времени на обзор зоны поиска оказываются меньше, так как сокращается время зондирования угловых направлений зоны поиска ВОКО.

Энергия и требуемое число зондирований в определенных угловых направлениях (общее время накопления) распределяются на несколько обзоров.

Обнаружение ВОКО реализуется на практике по результатам обнаружения его траектории. Поэтому при оценивании пропускной способности РЛС необходимо однократно учитывать относительные временные затраты на обзор зоны поиска ВОКО и обнаружение траектории ВОКО. В то же время приведенные соотношения позволяют производить лишь предварительную оценку пропускной способности РЛС, так как не учитывают влияние целого ряда факторов (ложных отметок из-за шумов и внешних помех и т.п.).

Ориентировочные расчеты показывают менее существенное ожидаемое снижение результирующей пропускной способности РЛС за счет реализации методов многообзорного наблюдения ВОКО по сравнению с известной двухэтапной процедурой обнаружения и завязки траектории. Более точная оценка возможна по результатам моделирования конкретной целевой, сигнальной и помеховой обстановки.

Заключение

Радиолокационное наблюдение (обнаружение и сопровождение) удаленных КО требует повышенной энергии зондирующих сигналов и времени наблюдения. В таких условиях одновременное наблюдение ВОКО и контроль объектов БЗ оказывается затруднительным, а пропускная способность радиолокатора снижается. С учетом этого особое значение приобретают ресурсоэффективные методы управления радиолокатором, обеспечивающие повышение его пропускной способности в условиях ограниченного энергетического и временного ресурсов.

Показано, что в сложной целевой обстановке слежение за большим числом целей, включая ВОКО, целесообразно осуществлять с использованием известных методов длительного МОН. В этом случае выделяемый на сопровождение ВОКО временной ресурс радиолокатора не ограничивается лишь одним периодом обзора, а определяется общим временем слежения за объектом (временем сопровождения или наблюдения). Предложен и обоснован метод ресурсоэффективного управления РЛС ДО на основе методов МОН, заключающийся в планировании и организации наблюдений ВОКО и объектов БЗ.

При использовании методов МОН управление наблюдениями радиолокатора основано на использовании априорной «траекторной» информации о характере и параметрах движения целей, находящихся в его зоне ответственности РЛС ДО, получаемой, например, из каталога СККП. Эта информация является исходной для планирования и организации обзора радиолокатора в ходе мониторинга космического пространства. Показано, что задача управления обзором состоит в оптимальном распределении свободного ресурса наблюдения между наблюдаемыми в данный момент объектами, включая ВОКО. В системах реального времени задача эффективного радиолокационного наблюдения может быть решена, например, на основе методов приоритетного планирования с учетом прогноза количества целей в зоне ответственности РЛС ДО.

Обоснована методика анализа РЛС ДО с каналом МОН в виде многофазной СМО. Сформулирован обобщающий критерий эффективности управления РЛС ДО при использова-

нии МОН. В качестве такого критерия предложено рассматривать пропускную способность радиолокатора. Установлено, что из-за увеличения времени наблюдения фаза обнаружения и завязки траекторий удаленных КО характеризуются дополнительными временными затратами, а пропускная способность радиолокатора при использовании известных методов РЛН может уменьшаться. За счет ресурсоэффективного управления и реализации методов МОН время накопления сигналов ВОКО распределяется на несколько обзоров. Это позволяет сохранить требуемую пропускную способность РЛС ДО при наблюдениях ВОКО.

Литература

1. Боев С.Ф., Линкевичиус А.П., Логовский А.С. и др. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения: Монография; Под ред. С.Ф. Боева. М.: Научная книга, 2019.
2. Тимошенко А.В., Шустов В.И., Бабкин Ю.В., Силантьев А.Б. Наблюдение высокоорбитальных космических объектов радиолокационными станциями дальнего обнаружения // Научно-технический журнал «Информация и космос». № 3. 2020. С. 20-25.
3. Титенко Е.А., Сизов А.С., Щитов А.Н., Шевцов А.Н., Щитова Е.Н., Скрипкина Е.В. Структурная схема модуля определения местоположения малых космических аппаратов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №4. С. 28-34.
4. Рассадин А.Э. Траекторные нестабильности космического носителя РСА, обусловленные эффектами общей теории относительности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт», Спецвыпуск «Технологии информационного общества», Часть III, август, 2009. С. 117-118.
5. Силантьев А.Б., Бабкин Ю.В., Тимошенко А.В., Якубовский С.В. Обнаружение и сопровождение высокоорбитальных космических объектов с использованием алгоритма многообзорного наблюдения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 4. С. 15-22.
6. Шишов Ю.А., Ворошилов В.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. М.: Радио и связь, 1987. 144 с.
7. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: Издательство «Квіц», 2000. 428 с.
8. Баринев С.П., Гриб В.Н., Насенков И.Г., Маевский Ю.И. Уравнение временного баланса сетевой радиолокационной системы // Радиотехника. 2016. № 1. С. 5-17.
9. Радиозлектронные системы: основы построения и теория: справ. / ред. Я.Д. Ширман. М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. 826 с.
10. Васин В.А., Власов И.Б., Егоров Ю.М. и др. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учебное пособие; под ред. И.Б. Федорова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 672 с.
11. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. Ч.1. 164 с.
12. Carlson B.D., Evans E.D., and Wilson S.L. Search radar detection and track with the Hough transform. System concept // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 30, 1 (Jan. 1994), Part I: 102-108, Part II: 109-115, Part III: 116-124.
13. Кричигин А.В., Маврычев Е.А. Алгоритмы многообзорного обнаружения траектории движущейся цели. Труды НИТУ им. Алексея Р.Е. №4(83). 2010. С. 11-18.
14. Timoshenko A.V., Babkin Y.V., Silantsev A.B. and Golubev A.V. Control of Multi-Scanning Radar Monitoring of Space Objects on Medium and High Orbits // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, 2021), pp. 1-6, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488366.
15. Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н.А. Обнаружение движущихся объектов / Под ред. П.А. Бакута. М.: Советское радио, 1980. 288 с.
16. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2012. 1296 с.
17. NORAD Satellite Catalog Number [сайт]. 2005. Обновляется в течении суток. URL: <https://www.celestrak.com/Norad/elements.com> (дата обращения: 15.05.2022).

RESOURCE EFFICIENT CONTROL OF LONG-RANGE DETECTION RADAR FOR MONITORING OF HIGH EARTH ORBIT OBJECTS WITH SIMULTANEOUS CONTROL OF BARRIER ZONE

Nikita A. Belavin, Yaroslavl Higher Military School of Antiaircraft Defense, Yaroslavl, Russia, nbelavin1987@rambler.ru

Alexandr B. Silantsev, Yaroslavl Higher Military School of Antiaircraft Defense, Yaroslavl, Russia, silantsev@mail.ru

Yuriy V. Babkin, Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia, ybabkin@rti-mints.ru

Violetta I. Kim, Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia, atimosenko@rti-mints.ru

Alexandr V. Timoshenko, Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia, atimosenko@rti-mints.ru

Abstract

Radar surveillance (RS) of space objects has a number of advantages over the optical one. An urgent task is the RS of remote spacecraft, including high Earth orbit (HEO) spacecraft with the apogee height of more than 2500 km above the Earth's surface. In modern radars, well-known models, methods and technical solutions for observing remote spacecraft are implemented by increasing the duration (energy) of transmitted signals and observation time. This restriction does not allow to simultaneously detect and track objects of the "barrier zone" (BZ) while solving routine tasks using a long-range detection (LRD) radar. As a result, the radar throughput may decrease. It is proposed to use resource-efficient methods of multi-scanning monitoring (MSM). The methods make it possible to efficiently accumulate the energy of echo signals received during several radar observations. Purpose. In this paper, we research how to ensure the required throughput of the LRD radar when monitoring the BZ and observing the HEO objects using the MSM methods in conditions of a limited time resource. The study sets and solves the task of resource-efficient management of the LRD radar. This method consists in planning and organizing RS of the LRD radar for observation of the HEO objects with simultaneous control (detection and tracking) of BZ objects. In general, we formulate the task of RS of remote spacecraft and substantiate the algorithm for planning and organizing a RS for monitoring the HEO objects in conditions of a limited energy (time) resource. Methods. Analytical methods are used to substantiate the algorithm of resource-efficient control of the LRD radar using the MSM methods. Resource-efficient management is based on the use of a priori information about the parameters of the HEO objects trajectories, planning, organization and joint processing of RS results. The model of the LRD radar with the MSM channel is also substantiated in the form of a queuing system for assessing the radar throughput. Results. The simulation results indicate maintenance of the required throughput of the radar during the observations of the radar. It confirms the operability and effectiveness of the radar control method for solving the problem of simultaneous observation of the radar and monitoring of the objects of the BZ. Conclusion. The structure of the radar with the MSM channel and the method of resource-efficient management allow to implement the monitoring of the HEO objects with simultaneous detection and tracking of BZ objects. In contrast to the existing ones, the proposed algorithm for planning and control of the surveillance provides the required radar throughput during monitoring of the HEO objects.

Keywords: high Earth orbit objects, surveillance radar, multi-scanning monitoring, radar surveillance control, "track-before-detect" procedure, radar target throughput.

References

1. Boev, S.F., Linkevichius, A.P., Logovskiy, A.S. (2019), Upravlenie sozdaniem i ekspluatatsiy radiolokatsionnykh sistem dalnego obnaruzheniya [Management of the creation and operation of long-range radar detection systems] in Boev S.F. (ed.), Nauchnaya kniga, Moscow, Russia.
2. Timoshenko, A.V., Shustov, V.I., Babkin, Yu. V. and Silantsev, A.B. (2020), "Observation of high-orbit space objects with radar distance detection", *Information and Space*, no. 3, pp. 20-25.
3. Titenko, E.A., Sizov, A.S., Shevtsov, A.N., Schitova, E. N. and Skripkina, E.V. (2021), "Structural diagram of the module for determining the location of small space vehicle", *T-Comm*, vol. 15, no. 4, 2021, pp. 15-22.
4. Rassadin, A.E. (2009), "Trajectory instabilities of the RSA space carrier caused by the effects of the general theory of relativity", *T-Comm. Special issue*, part III, august, pp. 117-118.
5. Silantsev, A.B., Babkin, Yu.V., Timoshenko, A.V. and Yakubovskiy, S.V. (2020), "Detection and observation of high-altitude space objects using the multi-view observation algorithm", *H&ES Research*, vol. 12, no. 4, pp. 15-22.
6. Shishov, Yu.A., Voroshilov, V.A. (1987), *Mnogokanal'naya radiolokatsiya s vremenny'm razdeleniem kanalov* [Multi-channel radar with time division of channels], Radio i svyaz, Moscow, Russia.
7. Kuzmin, S.Z., (2000), *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital radar. Introduction to the theory], Kvits, Kyiv, Ukraine.
8. Barinov, S.P., Grib, V.N., Nasenkov, I.G. and Maevskiy, Yu.I. (2016), "Upravlenie vremennogo balansa setevoy radiolokatsionnoy sistemy", *Radiotekhnika*, no. 1, pp. 5-17.

9. Shirman, Ya.D. (1998), Radioelektronnyye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya: spravochnik [Radio electronic systems: fundamentals of construction and theory: handbook] in Shirman Ya.D. (ed.), ZAO "Makvis", Moscow, Russia.
10. Vasin, V.A., Vlasov, I.B., Egorov, Yu.M. et al. (2003), Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh [Information technologies in radio engineering systems], BMSTU, Moscow, Russia.
11. Konovalov, A.A. (2013), Osnovy traektornoy obrabotki radiolokacionnoy informacii [Fundamentals of trajectory processing of radar information]: in 2 parts, part I, ETU "LETI", St. Petersburg, Russia.
12. Carlson, B. D., Evans, E. D., and Wilson, S. L. (1994), "Search radar detection and track with the Hough transform. System concept", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Part I: pp.102-108, Part II: pp.109-115, Part III: pp. 116-124.
13. Krichigin, A.V., Mavrychev, E.A. (2010), "Multi-scanning detection algorithms of moving target track", *Proceeding of NNSU*, no. 4(83), pp. 11-18.
14. Timoshenko A.V., Babkin, Y.V., Silantsev A.B. and Golubev, A.V. (2021), "Control of Multi-Scanning Radar Monitoring of Space Objects on Medium and High Orbits," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*, Svetlogorsk, Russia, 30 June - 2 July 2021, pp. 1-6.
15. Bakut, P.A., Julina, Yu.V. and Ivanchuk, N.A. (1980), Obnaruzhenie dvijushihhsya ob'ektov [Detection of moving objects], Sov. radio, Moscow, Russia.
16. Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. and Stein C. (2002), Introduction to algorithms. Second edition. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
17. NORAD Satellite Gatalog Number (2005), [Online], available at: URL: <https://www.celestrak.com/Norad/elements.com> (Accessed 15 May 2022).

Information about authors:

Nikita A. Belavin, doctoral student, Yaroslavl Higher Military School of Antiaircraft Defense, Yaroslavl, Russia

Alexandr B. Silantsev, Associate Professor, Ph.D., Yaroslavl Higher Military School of Antiaircraft Defense, Yaroslavl, Russia

Yuri V. Babkin, Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia

Violetta I. Kim, Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia

Alexandr V. Timoshenko, Professor, Doctor of Science, Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia

XII Ежегодный Форум "Revenue Assurance & Fraud Management Forum"

ТЕЛЕКОМ / БАНКИ / РЕГУЛЯТОРЫ. Влияние санкций"

Открыта регистрация на XII Ежегодный Форум "Revenue Assurance & Fraud Management Forum ТЕЛЕКОМ / БАНКИ / РЕГУЛЯТОРЫ. Влияние санкций", который пройдет 20 октября 2022 года в Москве. Участники могут зарегистрироваться на официальном сайте мероприятия.



В ходе мероприятия будет всесторонне рассмотрена проблематика гарантирования доходов и антифрода, в частности блоки: Главные тренды, санкции, госрегулирование; Роль и технологии, сервисы RA&FM, санкции.

Кроме того, запланирован ряд дискуссий по таким темам как прикладное взаимодействие с государством в условиях санкций, RA&FM - санкции, взаимодействия, перспективы, технологии, сервисы.

Форум объединит топ-руководителей, представителей подразделений, ответственных за направления RA&FM, ИБ, Risk Management. Представители секторов: РЕГУЛЯТОРЫ, ТЕЛЕКОМ, ФИНАНСЫ, ПЛАТЕЖНЫЕ СИСТЕМЫ, МЕДИА/ИНТЕРНЕТ, ТРАНСПОРТ/ЛОГИСТИКА, ЭНЕРГЕТИКА, РОЗНИЦА и др.