

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(научно-исследовательский университет)»
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий
Кафедра радиофизики и технической кибернетики

Направление подготовки / специальности: 03.03.01 прикладные
математика и физика

Направленность (профиль) подготовки: радиотехника и компьютерные
технологии

**Исследование методов и алгоритмов оптимизации обзора пространства и
оценка пропускной способности РЛС с ЦАФАР при обзоре верхней
полусферы
(бакалаврская работа)**

Студент:

Рогожкин Кирилл Александрович

Научный руководитель:

Литновский Виктор Яковлевич,

к.т.н.

Москва 2021

АННОТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА И ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РЛС С ЦАФАР ПРИ ОБЗОРЕ ВЕРХНЕЙ ПОЛУСФЕРЫ

Работа посвящена изучению вопроса пропускной способности РЛС МКО с ЦАФАР.

Целью бакалаврской работы является формирование определения пропускной способности и поставлена модели для оценки пропускной способности РЛС МКО с ЦАФАР.

Практическая значимость выпускной квалификационной (бакалаврской) работы состоит в получении зависимостей пропускной способности станции от различных параметров.

1 СОДЕРЖАНИЕ

1	СОДЕРЖАНИЕ	3
2	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ.....	4
3	ВВЕДЕНИЕ.....	5
4	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	6
4.1	Пропускная способность	6
4.2	Поиск целей.....	7
4.3	Сопровождение целей	11
5	ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ	14
5.1	Генерирование целей.....	14
5.2	Представление пространства и луча.....	14
5.3	Обнаружение цели.....	16
5.4	Процесс моделирования.....	17
5.4.1	Простейшая стратегия – жадный алгоритм.....	18
6	РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	20
6.1.1	Функция распределения	20
6.1.2	Сравнение времени обслуживания при двух положениях станции 21	
6.1.3	Время обслуживания для станций с разными размерами апертуры и разными мощностями	22
6.1.4	Зависимость ПО от ОСШ	22
6.1.5	Зависимость ПО от мощности станции	24
7	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	26
	Приложение А	27
8	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	28

2 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

АФАР – активная фазированная антенная решетка,

БСК – биконическая система координат,

ДН – диаграмма направленности,

ЗО – зона ответственности,

КО – космический объект,

КУ – коэффициент усиления,

ПО – пропускная способность,

РЛК – радиолокационный комплекс,

РЛС – радиолокационная станция,

РЛС МКО – РЛС мониторинга космического пространства,

СЭС – сектор электронного сканирования,

ОСШ – отношение сигнал/шум,

УН – угловое направление,

ФАР – фазированная антенная решетка,

ЦАФАР – цифровая активная фазированная антенная решетка,

ЭС – электронное сканирование.

3 ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает вероятность столкновения космических объектов с космическим мусором, количество которого непрерывно возрастает [12]. С целью предотвращения опасных ситуаций ведутся разработки РЛС МКО, основной целью которых представляется каталогизация космических объектов, таких как спутники, космический мусор и т.д. Для выполнения поставленной задачи станция выполняет поиск и обслуживание космических объектов,



Рис. 1

движущихся со скоростями близкими к первой космической по эллиптическим орбитам. Такие станции используют многолучевые решетки, способные формировать много лучей на прием и передачу и/или расширять ДН, используя при этом как сигналы фиксированной длительности, так и сопряженные с дальностью до цели. Работа станции производится в отведенной ей ЗО, которую можно представить как вырезанный конический сектор шара в центре с РЛС с радиусом R_{max} (Рис. 1).

Проектирование таких станций требует принятия большого количества конструктивных, технических и программных решений для достижения максимальной эффективности работы станции при требуемых характеристиках, т.к. максимальная дальность обнаружения, мощность станции и т.д. Об эффективности работы станции можно судить по количеству целей, которое она способна обслужить за единичный интервал времени, т.е. по пропускной способности станции. В более общем смысле под пропускной способностью понимается максимум функционала, достигаемый на пространстве стратегий работы станции, ставящий в соответствие количество обслуживаемых целей.

4 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Пропускная способность

Понятие пропускной способности можно встретить в работах ряда авторов [1,2,3,4,5]. Результаты, представленные в этих работах, либо малоинформативные с точки зрения разработчика, так как дают мало информации о конструкции станции, либо имеют отношение к станции с однолучевой ФАР. Так в [1] приведена формула (1), дающая оценку пропускной способности станции, связывая между собой количество целей, длительности сигналов и темпы зондирования на разных этапах обслуживания.

$$N_1 = D_c \frac{T_2 N_{2r} Q_{3r} + T_3 N_{3r} Q_{2r}}{\tau_2 N_{2r} + \tau_3 Q_{2r} N_{3r}} \quad (1)$$

где D_c - доля времени на обзор; $T_{2(3)}$ - темп зондирования на этапе обнаружения траектории (сопровождения цели); $\tau_{2(3)}$ - длительность измерения координат на этапе обнаружения траектории (сопровождения цели); $N_{2(3)r}$ - среднее количество точек, в которых осуществляется зондирование при обнаружении истинной траектории (сопровождении цели); $Q_{2(3)r}$ - вероятность получения отметки на этапе обнаружения траектории (сопровождении цели).

В случае же станции с многолучевой ФАР, можно предположить, что пропускная способность увеличится за счет улучшения распределения временных и энергетических ресурсов станции по целям на этапе обслуживания цели.

Дадим формальное определение пропускной способности S используемое в данной работе. Пусть P – множество параметров радиолокационной станции, такие как мощность, размер апертуры и т.д. Пусть $S(P) = \{s_1(P), s_2(P), \dots\}$ множество все возможных алгоритмов управления станцией (стратегий), зависящих от параметров станции. За

$J(s_i(P))$, обозначим функционал на множестве алгоритмов управления РЛС, ставящий параметрам станции в соответствие мат. ожидание количества одновременно обслуживаемых целей. $J(s_i(P))$ назовем частной пропускной способностью на стратегии $s_i(P)$. Тогда под пропускной способностью РЛС будем понимать максимум функционала $J(s_i(P))$, достигаемый на множестве $S(P)$.

$$C = \min_i (J(s_i(P))) \quad (2)$$

4.2 Поиск целей

В пропускной способности основную роль занимает сопровождение целей. Перейти к данному этапу можно либо после получения цели указания, либо после обнаружения целей самой станцией. Рассмотрим второй вариант при наблюдении за объектами на низкой околоземной орбите.

Одна из стратегий заключается в ведении поиска в фиксированном секторе $\Delta\theta = \pi/3$ в плоскости $\theta = 0^\circ$ с максимальной дальностью обнаружения $R_{max} = 3000 \text{ км}$. После обнаружения цели начинается обнаружение траектории и следующее за ним сопровождение цели.

Следует отметить, что поиск производится только после выполнения заявок по обслуживанию целей.

Так же отметим, что как указано выше на пропускную способность оказывает влияние доля времени, отводимая на обслуживание цели. Она связана с долей времени на поиск γ_Σ следующим соотношением:

$$D_c = 1 - \gamma_\Sigma \quad (3)$$

Поэтому еще одним способом увеличения пропускной способности служит уменьшение времени на этап поиска.

Сначала рассмотрим введение поиска по барьеру. Для этого обозначим долю времени обзора как ν_0 :

$$V_0 = \frac{T_s}{T_{rep}} \quad (4)$$

где T_s – время обзора заданной барьерной зоны; T_{rep} – период возвращения к обзору заданной барьерной зоны; T_{rep} – равно минимальному времени существования КО в БЗ.

В качестве БЗ рассматривается область пространства, определяемая по углам сканированием в горизонтальной плоскости в секторе: $\Delta\theta = \Delta\theta_{sc}$, а по дальности областью от R_{min} до R_{max} . Обозначим через τ_0 длительность зондирующего сигнала (ЗС), обеспечивающего в центре СЭС ($\theta=0$) на дальности R_{max} требуемое для обнаружения КО заданное отношение сигнал/шум (ОСШ). Потребуем, чтобы при сканировании длительность ЗС увеличивалась пропорционально $\cos^2(\theta)$, тем самым обеспечивая одинаковое ОСШ во всем СЭС:

$$\tau(\theta) = \tau_0 / \cos^2(\theta) \quad (5)$$

тогда, с учетом расширения луча при сканировании получим следующее выражение для времени обзора БЗ:

$$T_s = N_{so} \chi_\theta \tau_0 \chi_\tau; N_{so} = \Delta\theta_{sc} / \Delta\theta_b \quad (6)$$

где $\Delta\theta_b$ – ширина передающего луча в θ плоскости в центре СЭС; χ_θ – коэффициент среднего расширения луча при обзоре БЗ; χ_τ – коэффициент среднего удлинения ЗС при обзоре БЗ.

T_{rep} определяется выражением:

$$T_{rep} = \Delta\varphi_b R_{min} / V_{so} \quad (7)$$

где V_{so} – линейная скорость КО; $\Delta\varphi_b$ – ширина передающего луча в φ плоскости в центре СЭС, тогда (6) запишется как:

$$V_0 = \frac{\tau_0 \Delta\theta_{sc} \chi_\theta \chi_\tau V_{so}}{\Delta\theta_b \varphi_b R_{min}} \quad (8)$$

Обозначим через $\alpha_0 = R_{\min} / R_{\max}$ минимальной и максимальной дальностей в БЗ, тогда выражение (10) можно записать как:

$$\nu = \gamma_v \alpha_0^{-1} \quad (9)$$

$$\gamma_v = \frac{\tau_0 \Delta \theta_{sc} \chi_\theta \chi_\tau V_{so}}{\Delta \theta_b \varphi_b R_{\max}} \quad (10)$$

Из (11) - (12) видно, в частности, что пропускная способность РЛС определяется площадью передающего луча и, следовательно, не зависит от формы передающей апертуры, а только от ее площади. Форму приемной и передающей апертуры выберем квадрат. Обозначим через D_t длину стороны квадрата передающей апертуры в длинах волн:

$$D_t = D_{tx} / \lambda = D_{ty} / \lambda \quad (11)$$

тогда выражение (12) запишется в виде:

$$\gamma_v = \frac{\tau_0 D_t^2 \Delta \theta_{sc} \chi_\theta \chi_\tau V_{so}}{R_{\max}} \quad (12)$$

Значение величины ν_0 можно значительно уменьшить (а значит значительно увеличить пропускную способность РЛС), если разбить БЗ по дальности на несколько областей. На рисунке 2 показано разбиение БЗ на две зоны по дальности:

Зона-1 $R \in [R_{\min}, R_1]$;

Зона-2 $R \in [R_1, R_{\max}]$.

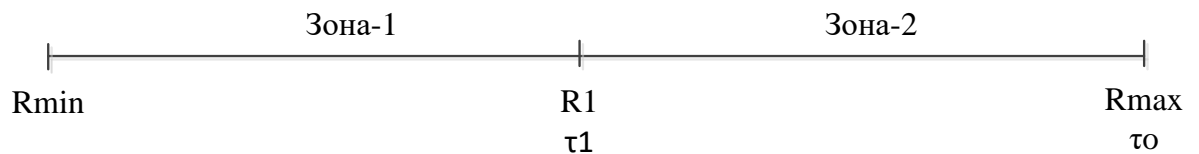


Рис. 2

В этом случае в Зоне-1 длительность ЗС τ_1 определяется дальностью R_1^4 , а период осмотра дальностью R_{\min} . В Зоне-2 длительность ЗС определяется дальностью R_{\max}^4 , а период осмотра дальностью R_1 . Из этого

следует, что период осмотра Зоны-1 тот же, что и для БЗ с одной зоной по дальности, а длительность ЗС τ_1 при осмотре Зоны-1 в α_1^4 раз меньше,

$$\alpha_1 = R_1 / R_{max} \quad (13)$$

$$\tau_1 = \tau_0 \alpha_1^{-4} \quad (14)$$

то есть и время обзора Зоны-1 в α_1^4 раз меньше. Длительность ЗС τ_0 в Зоне-2 (и соответственно время ее осмотра) остается таким же, как и в БЗ с одной зоной по дальности, но период осмотра Зоны-2 уменьшается в α_1^{-1} раз. Таким образом, для БЗ с делением (рис. 2) выражение (8) переписывается следующим образом:

$$\nu_1 = \gamma_v F_1(\alpha_0, \alpha_1) \quad (15)$$

$$F_1(\alpha_0, \alpha_1) = \alpha_1^{-1} + \alpha_1^4 \alpha_0^{-1} \quad (16)$$

Найдя экстремум F_1 и подставив в (14), получим ускорение производительности РЛС при разбиении на две зоны по дальности составляет (в раз):

$$\nu_0 / \nu_1 = 1 / (\alpha_0 * F_1(\alpha_0, \alpha_1)) \quad (17)$$

В случае разбиения по дальности на n зон:

$$F_n = \alpha_n^{-1} + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_{i+1}^4 \alpha_i^{-1} \quad (18)$$

Относительные ускорения для различных α_0 и n представлены на рис. 3

Перейдем к рассмотрению введения поиска в стандартном объеме, для этого сделаем аналогичные барьерной зоне выкладки. В таком случае T_{rep} и T_s :

$$T_{rep} = \Delta R / V_{so} \quad (19)$$

$$T_s = N_{so} \chi \chi_\tau \tau_0; N_{so} = \frac{\Omega}{\Delta \varphi_b \Delta \theta_b} \quad (20)$$

где ΔR - толщина свободного пространства, много меньшая R_{max} , что позволяет считать характеристики приема одинаковыми во всем свободном

пространстве; χ - среднее расширение луча; Ω - телесный угол, в котором введется поиск.

Подставив (19), (20) в (6) и, учитывая квадратную форму апертуры, получим:

$$\nu = \frac{\tau_0 D_t^2 \Omega \chi \chi_\tau V_{so}}{\Delta R} \quad (21)$$

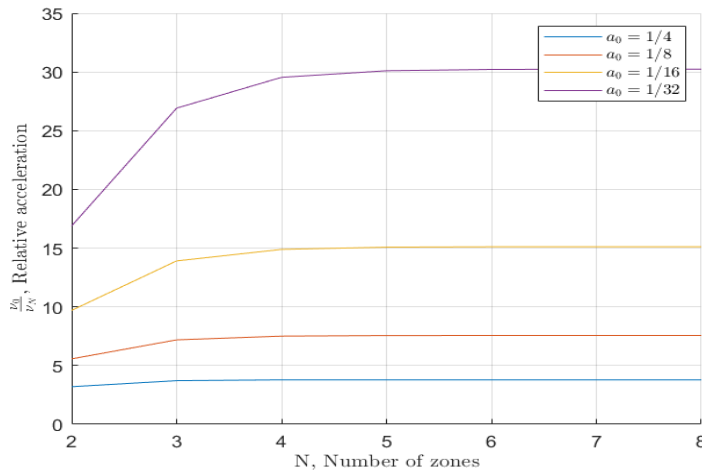


Рис. 3

В результате видно, что время поиска пропорционально площади антенны в длинах волн и длительности зондирующего сигнала. В тоже время длительность зондирования обратно пропорциональна мощности станции. Из чего можно сделать вывод, что при

выборе апертуры с минимальной долей времени обзора нужно выбирать станцию с наименьшим соотношением площади апертуры S к мощности станции P .

4.3 Сопровождение целей

После обнаружения цели она попадает в список целей, подлежащих сопровождению. При обсуждении вопроса сопровождения КО будем считать, что цели движутся по круговой орбите вокруг Земли со скоростями близкими к первой космической скорости на высоте до 500км.

Сопровождение цели представляет из себя процесс, на протяжении которого дискретизируется траектория. При этом после каждого замера координат требуется оценить нахождение цели в следующий момент времени для продолжения ее наблюдения. Возможны два подхода кинематический и динамический. Последний основан на учете действующих на КО сил, тогда экстраполируемая траектория должна подчиняться

уравнению движения под действием этих сил. В то же время КО может изменять свою траекторию, как в результате маневра, так и в результате столкновения с другими КО. В этом случае использовать динамический метод не представляется возможным, поэтому применяется кинематический способ экстраполяции траектории [1], основанный только на знании предыдущих измерений. В этом случае темп зондирования значительно увеличивается по сравнению с динамическим.

Очевидно, что в такой постановке важным вопросом является выбор темпа зондирования. Как указано в [4], темп зондирования должен быть не меньше, чем $1/(2F)$, где F – верхняя частота спектра всех измеряемых координат цели. Наиболее широкий спектр у маневрирующих целей. Для наблюдения за такими целями используется α - β фильтр Калмана. Для его проектирования требуется знать ускорение цели, которое можно получить для целей, движущихся по круговой орбите, из уравнения:

$$\ddot{r} = \frac{V_I^2}{R_{Earth} + h} \approx 10 \text{ м/с}^2 \quad (22)$$

где r – расстояние до цели от центра Земли; R_{Earth} – радиус Земли; h – высота цели над поверхностью Земли.

Тогда согласно [15] для устойчивого сопровождения цели требуемый темп зондирования равен $0,3\text{с}$.

Процесс обслуживания цели может прекратиться по трем причинам: срыв цели, достижение требуемой точности и выход цели из ЗО. Для достижения требуемой точности нужно накопить определенное количество замеров, согласно [4]:

$$\sigma_r^2 = \frac{2(2\Lambda - 1)}{\Lambda(\Lambda + 1)} \sigma^2 \quad (23)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{12}{\Lambda(\Lambda^2 - 1)} \sigma^2 \quad (24)$$

где Λ – количество замеров; σ – точность измерения при единичном замере.

Для случая же выхода цели из ЗО оценим время пребывания цели в ЗО. Для этого требуется решить систему:

$$\begin{cases} T = \frac{2\beta(R_{Earth} + h)}{V} \\ \frac{R_{Earth}}{\sin \gamma} = \frac{R_{Earth} + h}{\sin \alpha} - \text{по теореме синусов} \\ \pi = \alpha + \beta + \gamma \end{cases} \quad (25)$$

где h – высота объекта над поверхностью Земли; α – угол разворота зоны поверхности; β – угол входа объекта в ЗО, отсчитанный от луча, проходящего через центр Земли и центр станция. В результате получим:

$$T = \frac{2(R_{Earth} + h)}{V} \arccos \beta, \quad (26)$$

$$\cos \beta = \frac{R_{Earth} \sin \alpha^2 - \cos \alpha (R_{Earth} + h) \sqrt{R_{Earth}^2 - 2hR_{Earth} + h^2}}{R_{Earth} + h}$$

Получим, что цель находится в ЗО порядка 8 минут при ширине ЗО $\pi/3$.

Теперь имеется все необходимое для оценки пропускной способности по (1) в случае отсутствия срывов и при времени на обнаружение траектории много меньшем времени сопровождения.

$$N = D_c \frac{T}{N_2 \tau_2 + N_3 \tau_3} \approx 10^3 \quad (27)$$

Отметим, что данная формула дает завышенную оценку на 20-30%. Так же заметим, что можно дать интерпретацию формуле как отношение времени наблюдения к времени измерению координат, если принять, что на одно измерение приходится время равное средней длительности сигнала.

Еще одним немало важным выводом является, то что оценка пропускной способности сравнима по порядку с количеством каталогизированного космического мусора на орбите [12], что делает возможным использование РЛС с ЦАФАР для наблюдения этих целей.

5 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Выше упоминалось, что строгой теоретической оценки как таковой нет и для нахождения пропускной способности требуется проводить моделирование, для проведения которого требуется модель. В данной работе предложенная модель имеет ряд ограничений: СЭС имеет форму прямоугольного параллелепипеда в БСК; станция может формировать только дискретный набор ДН; ДН является идеальной столообразной, т.е. она равна 1 внутри луча и 0 вне его; выставить передающие лучи возможно только в дискретное количество положений с шагом равным минимальной ширине луча по данному направлению; используется фиксированный набор длин сигналов; все длины сигналов кратны длительности наименьшего сигнала и максимальная дальность тоже кратна длительности наименьшего сигнала.

Набор из M длительностей сигналов обозначим за $D_{sig} = \{d_i\}_{i=1}^M$.

Отметим, что время и расстояние будем считать в км. Это возможно делать ввиду того, что они связаны между собой соотношением:

$$r = ct \quad (28)$$

5.1 Генерирование целей

Будем считать, что цели описываются моделью Сверлинга 0 или Сверлинга 1. Это позволяет вычислить вероятность обнаружения цели по ОСШ.

Для каждой цели задаются в СЭС в сферических координатах, в которых направление $\theta = 0^\circ$ совпадает с нормалью к поверхности передающего полотна. Координаты и ЭПР каждой цели задается случайными величинами, имеющими равномерное распределение. Далее координаты пересчитываются в БСК, определение БКС можно найти в [16]. Ее использование объясняется сохранением формы ДН при ЭС.

5.2 Представление пространства и луча

СЭС разобьем на ячейки с равным шагом $\Delta A_\varepsilon, \Delta A_\beta$ в БСК, шаг ячейки

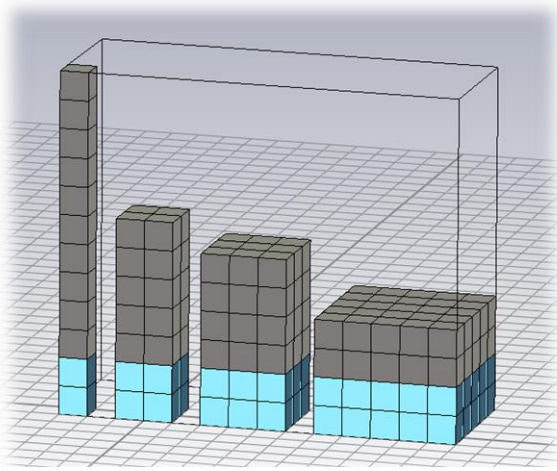


Рис. 4

соответствует наименьшей ширине луча по A_ε, A_β , соответственно, и с равным шагом Δr по расстоянию, шаг соответствует наименьшей длине из набора сигналов. Тогда пространство можно представить псевдотензором S размером $n_r \times n_\varepsilon \times n_\beta$, где n_r - кол-во ячеек по r ; n_ε - количество ячеек по

A_ε ; n_β - количество ячеек по A_β , в котором каждой цели ставится в соответствие определенная ячейка. Отметим, что S_{ijk} равен количеству целей в ijk -ом УН.

Из заданных выше ограничений очевидно, что форму j -ого из N лучей можно задать булевой матрицей B_j размером $n_{\varepsilon_j} \times n_{\beta_j}$, где n_ε - максимальная ширина ДН в ширинах наименьшего луча по A_ε ; n_β - максимальная ширина ДН в ширинах наименьшего луча по A_β .

Набор все возможных пар форм луча и длительностей сигнала назовем *коллекцией лучей* $\mathbb{L} = \{d_i, B_j\}_{i=1, j=1}^{M, N}$. Пару $L_{ij} = \{d_i, B_j\}$ назовем *элементом коллекции*.

Для каждого элемента коллекции L_{ij} можно вычислить максимальную ячейку $S_{max}^{(ij)}$ пространства S по дальности, в которой ОСШ одинаковое для всех элементов коллекции, вычисленное для теоретической средней цели с выбранным до начала моделирования ЭПР, будет превышать пороговое значение (про выбор порога см. ниже). Тогда цели находящиеся между и в ячейках $S_{min}^{ij} = \max(R_{min}, d_i)$ и $S_{max}^{(ij)}$ считаются целями, которые могут быть обнаруженными при использовании такого элемента коллекции.

Используя выше сказано дадим интерпретацию элементу коллекции L_{ij} псевдотензором размером $n_r \times n_{\varepsilon_j} \times n_{\beta_j}$, в котором элементы слоев по дальности между $S_{\max}^{(ij)} - S_{\min}^{(ij)}$ равны единицы, а остальные элементы равно нулю. Для обозначения данного псевдотензора будем использовать тоже обозначение, что и для соответствующего тензору элемента коллекции. На рис. 4 приведены 4 элемента коллекции для одной длительности сигнала, где каждая ячейка соответствует одному элементу разрешения. Серые ячейки соответствуют пространству, которое может просмотреть луч. Правые три соответствуют случаю, когда расширили луч, которому соответствует левый элемент коллекции, получены полученные в результате расширения луча.

При условии, что максимальные потери от расширения луча при ЭС в разы меньше, чем минимальное изменение ОСШ в центрах соседних по дальности ячейкам пространства $S(8)$, форма тензора L_{ij} не будет изменяться при ЭС.

$$\min_{\forall i,j,k} \left(\frac{SNR(S_{i,j,k}) - SNR(S_{i-1,j,k})}{SNR(S_{i,j,k})} \right) \gg \max_{\forall i,j} (A_{\varepsilon_{ij}}^2 + A_{\beta_{ij}}^2) \quad (29)$$

5.3 Обнаружение цели

При облучение каждой цели вычисляется ОСШ по основному уравнению радиолокации на стороне приемной антенны. Далее по ОСШ вычисляется вероятность обнаружения цели. Для целей, описываемых моделью Сверлинга 0 и Сверлинга 1, для каждой из них вероятность обнаружения определяется следующими формулами соответственно [14]:

$$P(SNR) = \frac{1}{2} \operatorname{erf}(\operatorname{erf}^{-1}(2F) - \sqrt{SNR}) \quad (30)$$

$$P(SNR) = \exp\left(-\frac{H}{1 + SNR}\right) \quad (31)$$

где SNR – ОСШ; $F = 10^{-6}$ – вероятность ложной тревоги; $\operatorname{erf}, \operatorname{erf}^{-1}$ – прямая и обратная функции ошибок; H – порог принятия решения об

обнаружении сигнала, определяемый формулой (32) при $SNR = 13$ дБ и вероятность обнаружения $P = 0.95$

$$F = \Gamma\left(\sqrt{n}-1, \frac{H}{\sqrt{n}}\right) \quad (32)$$

где n – количество когерентных импульсов, по которому принимается решение об обнаружении; $\Gamma(n, x)$ – верхняя неполная гамма функция, по определению равная

$$\Gamma(n, x) = \int_x^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt \quad (33)$$

После вычисления вероятности обнаружения для облученных целей, вероятности записываются в вектор и генерируются случайные вектор такой же размерности с равномерно распределенным на интервале от $[0,1]$ числами. Затем производится поэлементное сравнение двух векторов. В случае если случайное число меньше или равно вероятности, то цель считается обнаруженной, иначе цель считается необнаруженной.

5.4 Процесс моделирования

Важным элементом поиска пропускной способности является оптимальный алгоритм планирования работы РЛС. В рамках нашей модели оптимальным является нахождение такой последовательности последовательно примененных элементов коллекций, направленных в нужные направления, которая обеспечивала бы максимальное количество обслуженных целей за отведенный интервал времени. Однако, найти такую последовательность на текущий момент представляется возможным только полным перебором, в ходе которого надо перебрать порядка $(n_{\varepsilon} * n_{\beta} * \{Q_{beams}\})!$ вариантов, где Q_{beams} - количество элементов коллекции. Легко видеть, что решить задачу таким способом за разумное время не представляется возможным, поэтому требуется более простой алгоритм. Таким является жадный алгоритм.

5.4.1 Простейшая стратегия – жадный алгоритм

Простейшая стратегия заключается в следующем, работа станции разделена на этапы. В начальный момент каждого из них происходит излучение сигнала, после чего станция начинает принимать сигнал, до тех пор пока не пройдет время равное сумме двух дальностей до самой дальней цели плюс длительности самого сигнала. После чего происходит излучение следующего сигнала и все повторяется.

$$t = 2R_{\max} + signal_duration \quad (34)$$

На каждом этапе требуется принимать решение куда излучать сигнал. Как сказано ранее для это будет применяться жадный алгоритм. Суть жадного алгоритма заключается в выборе самого дорогого решения на каждом этапе. Для выбора элемента коллекции и УН на каждом этапе производится свертка коллекции с пространством, в результате чего каждому элементу коллекции ставится в соответствие матрица. Таких матриц будет MN штук. Находим в этих матрицах элемент с максимальным значение, если есть несколько одинаковых значений, то предпочтение отдается элементу, которому соответствует минимальная длительность сигнала. Тогда на этом этапе будет выбран тот элемент коллекции, которому принадлежит максимальный значение, а УН соответствует положению максимального элемента в матрице. После чего находятся цели, попавшие в этот луч. Согласно 5.3 определяем какие цели обнаружены и вычитаем из каждой ячейки пространства столько сколько было обнаружено целей в этой ячейке. На этом этап завершен и начинается следующий, если не превышен период работы станции или если еще остались необслуженные цели. В противном случае запоминается количество обнаруженных целей и начинается моделирование на новом наборе целей.

По завершению моделирование на K наборах целей, производится усреднение по количеству обслуженных целей – это и будет частной

пропускной способностью на данной стратегии при данных параметрах РЛС.
Более детально можно ознакомиться в [Приложении А](#).

6 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

6.1.1 Функция распределения

Основными результатами моделирования стали полученные зависимости времени одного периода обслуживания целей от ОСШ, от ширины луча и от положения целей в пространстве.

Первостепенной задачей являлось установление применимости модели. Для этого модель должна однозначно ставить в соответствие параметры РЛС и среднее время обслуживания целей. Для этого функция распределения среднего времени обслуживания должна иметь только один максимум. С целью исследовать это, было проведено многократное моделирование с одинаковыми параметрами РЛС и с одинаковым количеством целей в ЗО, но с разным их расположением. В результате были получены гистограммы,

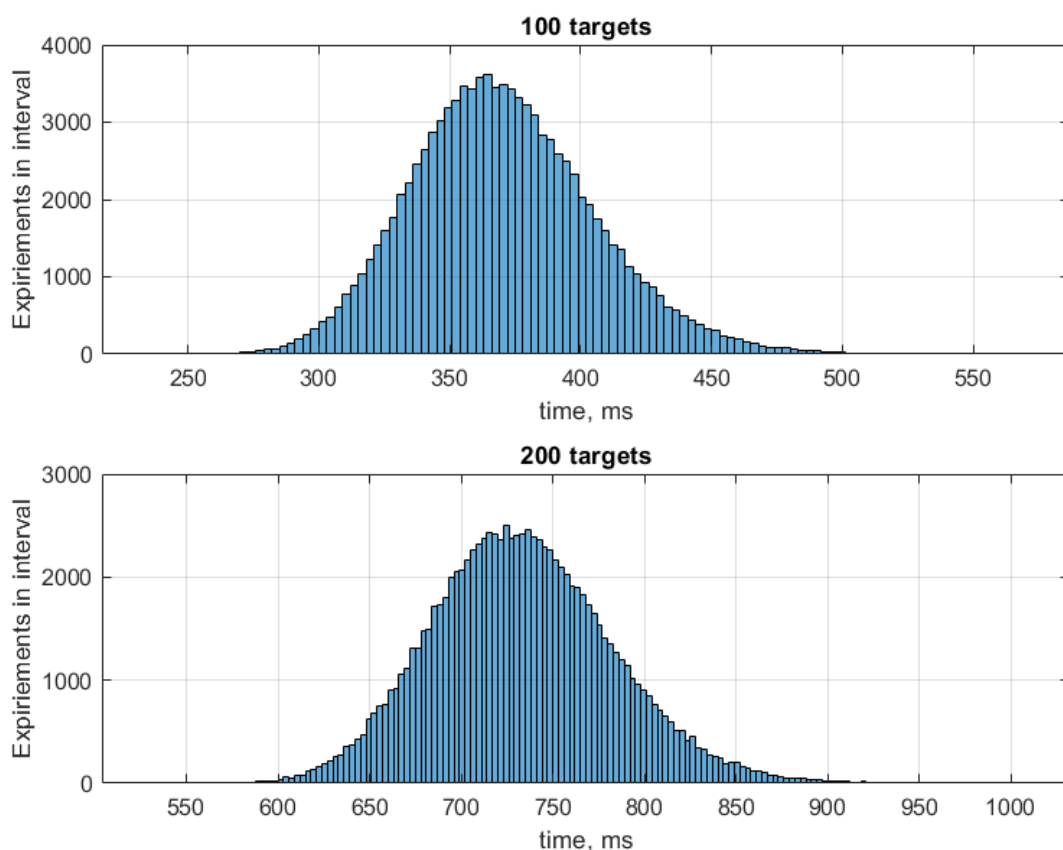


Рис. 5

приблизенно описывающие функцию распределения с точностью до нормирующего множителя.

6.1.2 Сравнение времени обслуживания при двух положениях станции

На следующем этапе были получены кривые (Рис. 6), описывающие зависимость среднего времени одного периода обслуживания от количества целей в ЗО при двух положениях антенны: вертикально вверх (above) и по горизонту (horizontal). В данном моделировании было принято, что ширина нерасширенного луча 1 градус и сигнал, сопряженный с максимальной дальностью, обеспечивает для цели на максимальной дальности с ЭПР = 1 отн. ед. при нерасширенном луче ОСШ = 20 раз.

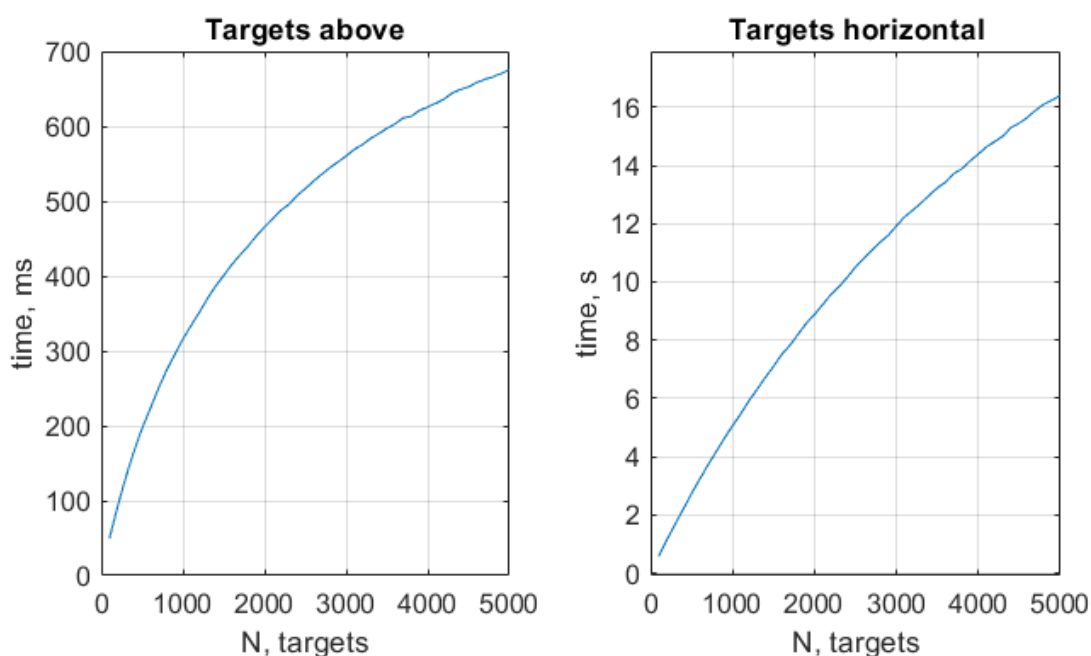


Рис. 6

Уже на одном примере видно, что чем ближе в среднем цели находятся к станции, тем выше будет частная пропускная способность. Из чего можно сделать вывод, что для нахождения пропускной способности РЛС МКО нормаль передающего полотна нужно направить вертикально вверх. Таким образом всё следующее моделирование будет проводится именно для такого положения станции.

6.1.3 Время обслуживания для станций с разными размерами апертуры и разными мощностями

Определившись с положением прямо-передающей антенны в пространстве, получим зависимости среднего времени обслуживания от ширины луча и от ОСШ, обеспечиваемого станцией на максимальной дальности нерасширенным лучем.

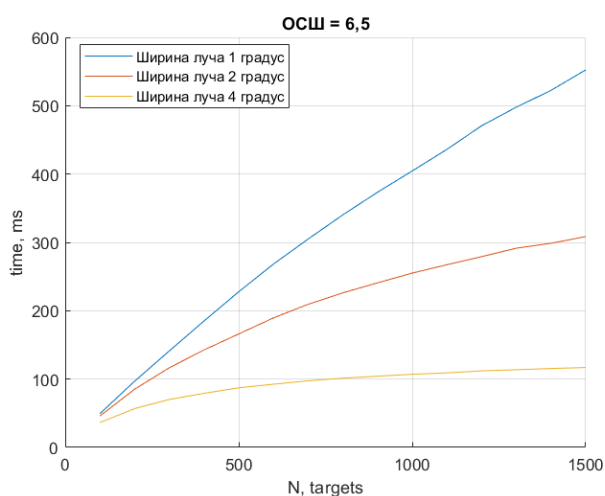


Рис. 7

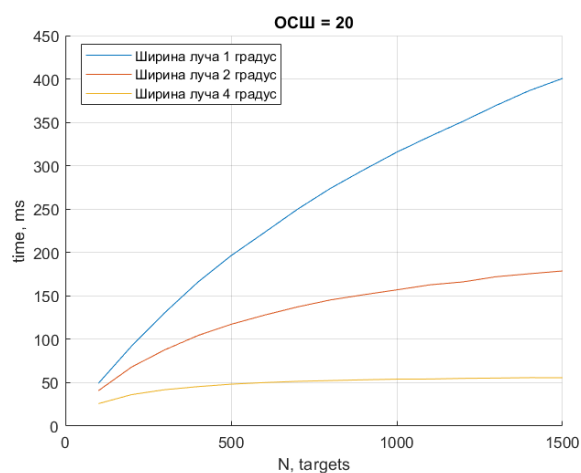


Рис. 8

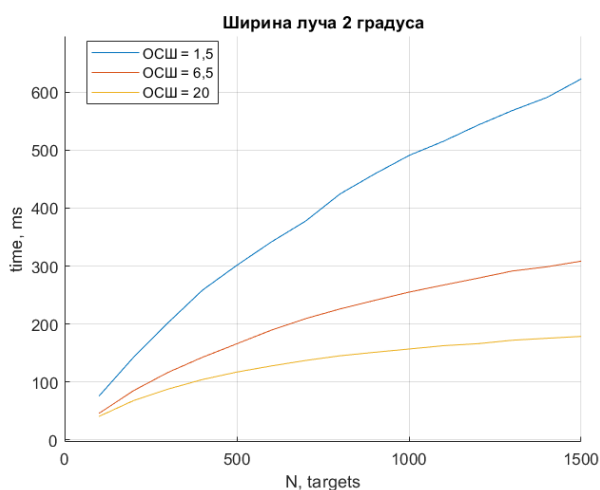


Рис. 9

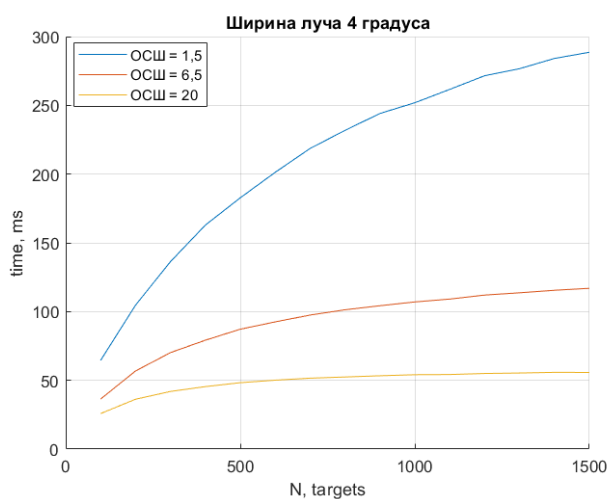


Рис. 10

6.1.4 Зависимость ПО от ОСШ

Такие зависимости безусловно полезны для общего представления. Однако в реальных условиях цели требуется обслуживать с определенным периодом. Так в случае целей, движущихся с ускорением около $10\text{-}15\text{ м/с}^2$, нужно обеспечить период повторного зондирования около $0,3\text{ с}$. Поэтому

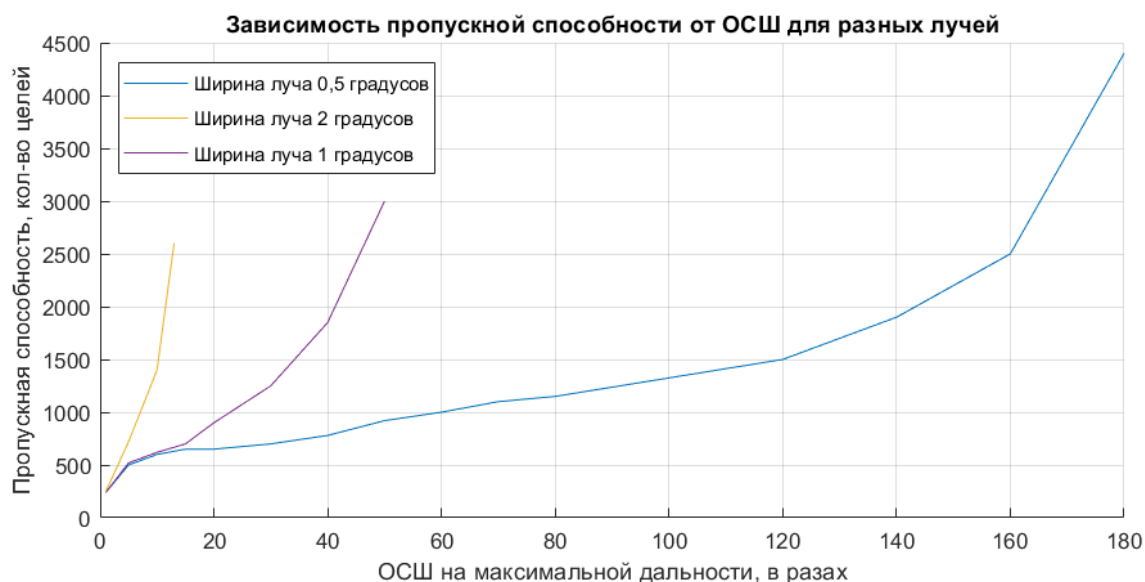


Рис. 11

куда более интересным случае представляется получение зависимости не времени обслуживания целей от количества целей в ЗО, а получение максимального количества обслуживаемых целей от различных параметров РЛС. Ниже приведен график (Рис. 11) такой зависимости. Из него видно, что до определенного значения ОСШ наблюдается участок медленного роста пропускной способности, после чего идет резкий рост с уходом на бесконечность. Быстрый рост пропускной способности начинается приблизительно в тот момент, когда за отведенный период времени РЛС успевает “просмотреть” все ячейки ЗО.

Однако надо отметить, что не существует такого значения ОСШ, при устремлении которому предел ПО был бы равен бесконечности. Это связано с тем, что всегда присутствует вероятность не обнаружить цели даже после n -ого ее зондирования.

На практике же может применяться критерий k из n , если после n зондирований получено менее k отметок от цели, то цель считается не существующей. Поэтому если это принять во внимание, то существует ОСШ, при котором ПО в пределе равно бесконечности. Иными словами, при значениях ОСШ выше предельного РЛС успеет обслужить любое кол-во целей в ЗО, при условии, что нет ограничений при приеме сигнала от целей.

6.1.5 Зависимость ПО от мощности станции

В предыдущем разделе часто фигурировало понятие ОСШ, но эта характеристика формируется в первую очередь произведением мощности на КУ, последний прямопропорционален эффективной площади апертуры. Таким образом, если отнормировать ОСШ на эффективную площадь апертуры при которой производилось измерение, то с точностью до множителя будут получены зависимости ПО от мощности.

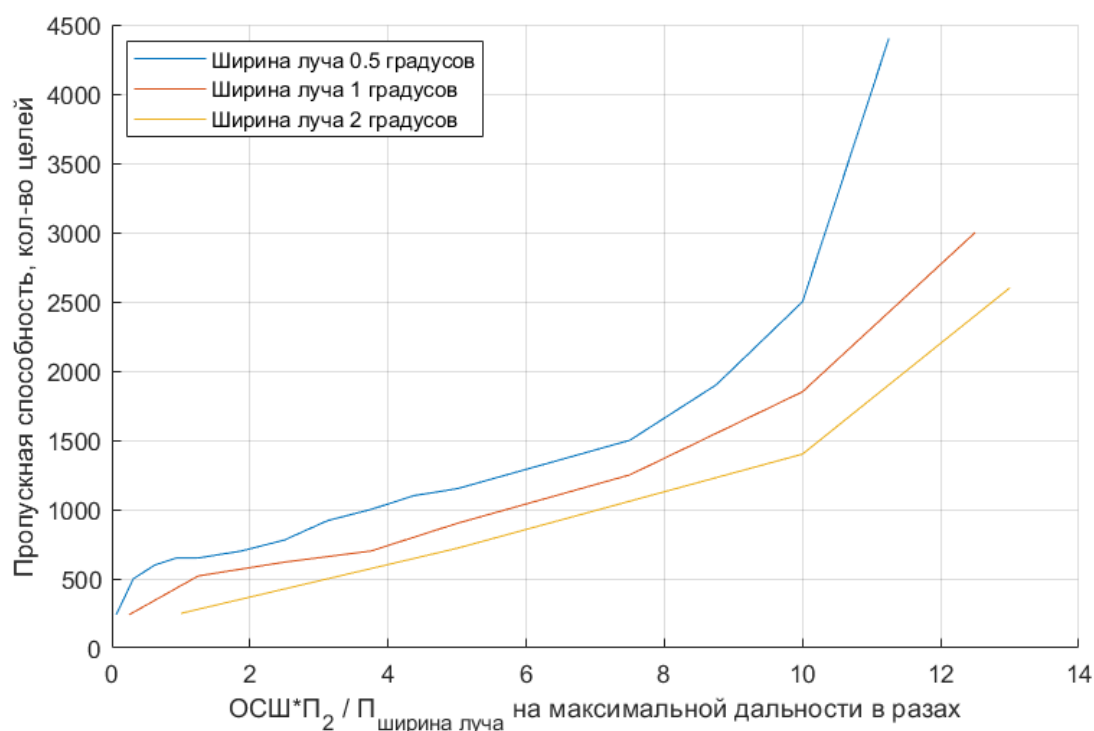


Рис. 12

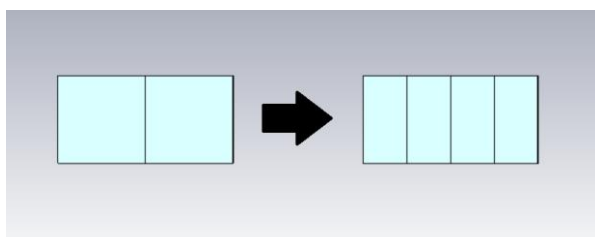


Рис. 13

Из графика выше видно, что при одинаковой мощности требуется отдавать предпочтение антенне с наибольшей апертурой, что довольно очевидно в рамках данной модели, потому что меньшая ширина луча

позволяет точнее направить луч в направление с наибольшим количеством целей.

Поясним это следующим примером. Для начала представим, что ЗО состоит всего лишь из одного элемента разрешения по дальности и двух по углу, назовем их “левой” и “правой” ячейками. Теперь мысленно разделим каждую по углу пополам, проведя плоскости деления параллельно плоскости соприкосновения этих ячеек (см. рисунок ниже). Такое разделение соответствует случаю, когда ту же ЗО “просматривала” бы станция с шириной луча в двое меньше. Предположим, что цели находятся в правой половине “левой” ячейки и в левой половине “правой” ячейки. Тогда станции с широким лучем пришлось бы совершить два зондирования для облучения каждой цели, в то время как станция с узким лучем может сделать тоже за один раз.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлено, что наиболее эффективно наблюдать низкоорбитальные цели при положении приемо-передающей антенны вертикально вверх; получены зависимости пропускной способности РЛС МКО, при наблюдении целей над станцией в СЭС, от ширины луча, от мощности излучения.

Было обнаружено, что при малом количестве целей ($N_{cells} \gg N_{targets}$) время обслуживания целей в ЗО линейно зависит от их количества, а при $N_{cells} \ll N_{targets}$ время обслуживания стремится к постоянной.

В случае, если станция может выставить передающий луч аналогично тому, как это описано в 5., то предпочтение следует отдавать станции с наибольшей апертурой, так как при равной энергетике, она позволяет более гибко обслуживать цели.

Приложение А

Реализация одного цикла сопровождения на псевдоязыке.

S – space with targets

N – number of resolution element by U

M – number of resolution element by V

capacity = 0

t = 0

while(t < t₀)

 if ~isZeros(S)

 foreach i=1:N, j=1:M

 M{i,j} = convolution(S, L_{ij})

 end

 [maxValue, PosInUV, L] = max(M{:, :}, 'for all')

 tar = FindTargetsInBeam(S, PosInUV, L.beam)

 prob = GetProbability(tar)

 rand = GetRand(numel(tar))

 index = GetIndex(tar(prob >= rand))

 S = S – GetSpace(tar(index))

 capacity = capacity + numel(tar(index))

 tar(index) = ∅

 t = t + MaxDistance(tar(index)) + L.duration

 end

end

8 СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишов Ю. А., Ворошилов В. А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов // Радио и связь. 1987. с. 85–116.
2. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю. С. Введение в радиолокационную системотехнику // Москва. Советское радио. 1971. с. 134–154.
3. Великанов В. Д. и др. Радиотехнические системы в ракетной технике // Москва. Воениздат. 1974. с. 118–121.
4. Фарбер В. Е. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС // МФТИ. 2005.
5. Леонов С. А. Радиолокационные средства противовоздушной обороны // Москва. Военное издательство. 1988. с. 26.
6. Ступин Д. Д. Возможность повышения пропускной способности РЛС на основе оптимизации ее энергетических характеристик // Вестник Мордовского университета. 2007. Т. 17. №3. с. 99.
7. Геращенко С. В., Прядко А. Н., Шевчук В. И. Метод оптимизации распределения энергетического ресурса РЛС с ФАР при поиске и обнаружении // Радиотехника. 2008. №7. с. 81.
8. Геращенко С. В., Емельянова Е. А. Оптимизация управления распределением энергетических ресурсов двух однотипных РЛС с ФАР в частично перекрывающихся зонах обзора // Радиотехника. 2009. №9 с. 134.
9. Shapiro, R. D. Scheduling coupled tasks // Naval Research Logistics Quarterly. 1980. V. 27. p. 489–498.
10. Orman, A. J., & Potts, C. N. On the complexity of coupled-task scheduling // Discrete Applied Mathematics. 1997. V. 72. p. 141–154.

11. F.J. Hwang, Bertrand M.T. Lin Coupled-task scheduling on a single machine subject to a fixed-job-sequence // Computers & Industrial Engineering. V. 60. Issue 4. 2011. p. 690-698. ISSN 0360-8352
12. С. С. Вениаминов, А. М. Червонов, Космический мусор — угроза человечеству // М: ИКИ РАН, 2012, ISSN 2075-6836, с. 149.
13. Прусаков А.В. Один из методов формирования временной диаграммы работы многоканальной РЛС в условиях медленно меняющейся радиолокационной обстановки // XLIV научная конференция МФТИ. 2001.
14. Merrill I. Skolnik RADAR HANDBOOK // 2008 by The McGraw-Hill Companies. ISBN 978-0-07-148547-0
15. Navarro A. M. Procedure for Tracking Manoeuvring Targets with a Multi-purpose Phased-array System // Int. Conf. Radar-77. 1977. London. p. 150-154.
16. Фарбер В. Е. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС // МФТИ. 2005. стр. 17-18.