

# Компьютерное моделирование в задаче определения координат постановщиков ретрансляционных помех

А. С. Мазин, email: mazinant@rambler.ru

ВУНЦ ВВС ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

***Аннотация.** Описана методика использования пакета прикладных программ MATLAB в задаче определения координат постановщиков ретрансляционных помех, обеспечивающих скрытие наземных объектов от воздушного радиолокационного мониторинга.*

***Ключевые слова:** ретранслятор, ретрансляционные помехи, радиолокация, радиолокационная станция, радиолокационный мониторинг, скрытие наземных объектов, определение координат, матрица, моделирование.*

## Введение

Радиолокационный мониторинг земной поверхности, имеющий ряд преимуществ перед оптическими системами, в последние годы получил широкое распространение [1]. Потребителями результатов мониторинга информации являются гражданские и силовые ведомства. Из анализа военных конфликтов последних десятилетий [2-4] следует, что информация, полученная техническими средствами разведки, может использоваться не только для анализа состояния боевой готовности противостоящих вооруженных сил, но и для обеспечения эффективного применения по ним высокоточного оружия. С учетом миниатюризации радиолокационных станций, использующих непрерывные ЛЧМ сигналы, и расширения спектра их возможных носителей (в том числе малые беспилотные летательные аппараты [5]) очевидно, что скрытие наземных объектов от подобных средств разведки является актуальной задачей. Одним из способов противодействия радиолокационному мониторингу является применение малогабаритных ретрансляторов.

Процесс формирования в радиолокационной станции с синтезированием апертуры антенны (РСА) шумовых изображений под воздействием ретрансляционных помех раскрыт в [6]. Методика расчета координат постановщика ретрансляционных помех и основных параметров помехового сигнала описана в [7]. Однако, в [7] задача определения координат ретранслятора ограничена расчетом расстояния его выноса от объекта прикрытия (ОП) с учетом неопределенности положения носителя РСА по углу места. Методика расчета координат

размещения ретранслятора с учетом неопределенности положения носителя РСА по азимуту в [6,7] не приводилась.

Цель статьи – продемонстрировать методику определения координат ретрансляторов на местности, обеспечивающих скрытие наземных объектов от средств воздушного радиолокационного мониторинга, с использованием средств компьютерного моделирования.

### 1. Принимаемые условия и допущения

В настоящей методике в расчетах применяется способ создания ретрансляционной помехи, описанный в [7] (рис. 1).

Суть способа [7] заключается в определении таких координат размещения ретранслятора на местности, при которых на радиолокационном изображении (РЛИ) в РСА под воздействием помех обеспечивается формирование шумового изображения в виде полосы (шумовой полосы), скрывающего отметку от ОП.

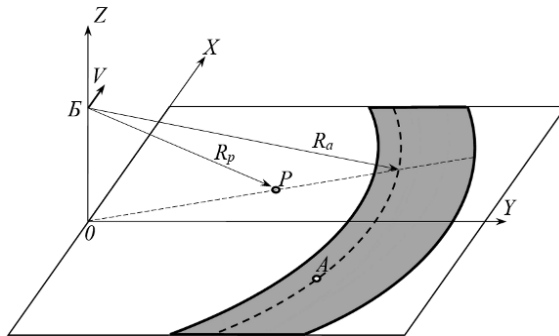
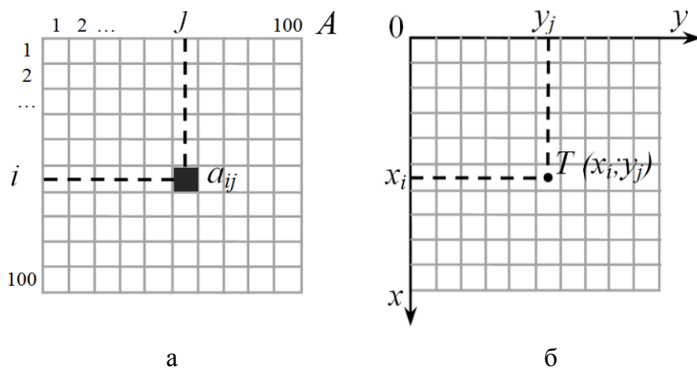


Рис. 1. Взаимное расположение носителя РСА (Б), ретранслятора (Р), прикрываемого объекта (А) и шумовой полосы

В качестве аналога РЛИ земной поверхности, в пределах которого будет проводиться поиск координат ретрансляторов, примем матрицу  $A$  с размерностью  $100 \times 100$ , в которой каждый элемент  $a_{ij}$  эквивалентен точке  $T(x_i; y_j)$  прямоугольной системы координат, повернутой по часовой стрелке на  $\pi / 2$  (рис. 2). Таким образом, номер строки  $i$  матрицы  $A$  соответствует абсциссе  $x$ , а номер столбца  $j$  – ординате  $y$ . Данная взаимосвязь необходима для переноса результатов моделирования в плоские прямоугольные координаты. Расстояние между точками прямоугольной системы координат принято условным и может быть эквивалентно любой единице измерения расстояния.

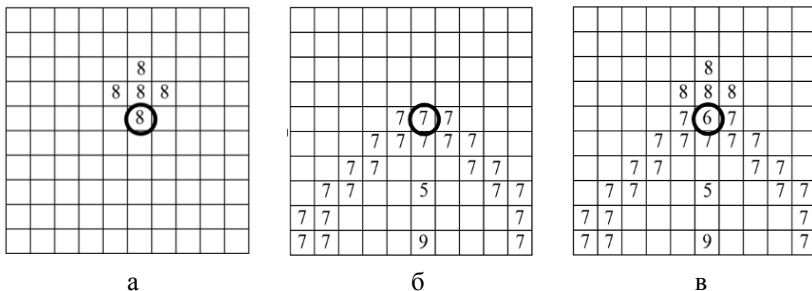


*a* – матрица-аналог РЛИ; *б* – прямоугольная система координат

Рис. 2. Взаимосвязь матрицы-аналога РЛИ земной поверхности и прямоугольной системы координат

Каждый элемент матрицы  $a_{ij}$  после проведения над ним математических операций принимает соответствующее численное значение. Благодаря взаимосвязи матрицы-аналога и прямоугольной системы координат образуется рабочая плоскость пространства, элементы которой обладают не только индивидуальным адресом, но и численным значением, что позволяет наглядно отображать взаимное расположение объектов и определять расстояния между ними.

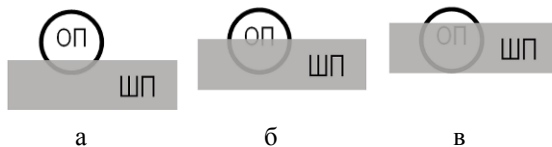
Дополнительно, существует возможность отображения областей наложения (элементов матрицы, являющихся составной частью различных объектов). Например, на матрице  $10 \times 10$  пространственное положение ОП обозначено пятью элементами с численным значением 8 (рис. 3,а). При размещении ретранслятора (элемент со значением 5) относительно носителя РСА (элемент со значением 9) в результате математических операций согласно [7] на матрице-аналоге формируется шумовая полоса, обозначенная элементами с численным значением 7 (рис. 3,б). При совместном размещении ОП, ретранслятора и носителя РСА (совмещении первых двух изображений) образуется общий для шумовой полосы и ОП элемент матрицы (элемент наложения). Данному элементу присваивается новое значение 6, отличное от ранее использованных (рис. 3,в). Подсчет таких элементов дает возможность определить степень пересечения объектов (долю скрытия ОП шумовой полосой). В рассматриваемом случае, при наложении шумовой полосы на один из пяти элементов ОП, доля скрытия составляет 20%.



*а – положение ОП (8); б – положение ретранслятора (5), шумовой полосы (7), и носителя РСА (9); в – отображение элемента наложения шумовой полосы и ОП (6)*

**Рис. 3.** Пример формирования элемента наложения шумовой полосы и ОП

Под «качеством скрытия ОП» подразумевается значение коэффициента  $k$ , характеризующего долю скрытия ОП шумовой полосой, формируемой на РЛИ в РСА под воздействием помех. В настоящей методике пороговое значение  $k$  принимается равным 20%, 50% и 80% (рис. 4).



*а –  $k = 20\%$ ; б –  $k = 50\%$ ; в –  $k = 80\%$*

**Рис. 4.** Качество скрытия объекта прикрытия (ОП) шумовой полосой (ШП)

«Успешными координатами ретрансляторов» (УКР) считаются такие элементы матрицы  $A$ , в которых размещение ретрансляторов обеспечивает скрытие ОП от воздушного радиолокационного мониторинга с заданным качеством  $k$ .

Возможна ситуация, когда элементы УКР, полученные в результате нескольких итераций, будут совпадать.

Для отображения таких случаев код программы предполагает:

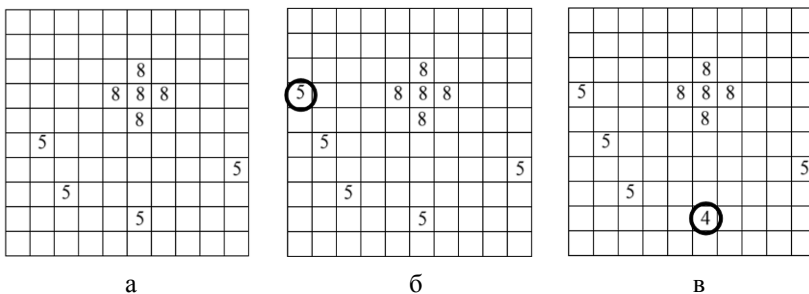
1. поочередное внесение в матрицу всех УКР, полученных в результате расчетов, путем присвоения соответствующему элементу значения  $n$ ;

2. присвоение элементу матрицы со значением  $n$  значения  $n - 1$  в случае совпадения с ним элемента очередной УКР.

Например, в матрицу  $10 \times 10$  в ходе  $s$  итераций последовательно вносятся УКР (рис. 5,а). Если УКР совпадает с «пустым» элементом матрицы ему присваивается исходное значение УКР  $n_0 = 5$  (рис. 5,б). Если в результате  $p = 1 \dots s$  итераций элемент очередной УКР совпадает с «занятым» элементом, значение которого  $n_p \leq n_0$  – элементу присваивается значение  $n_p - 1 = 4$  (рис. 5,в). По завершению цикла элементы матрицы отражают количество выпавших на них случаев расположения УКР («накапливают» случаи совпадения элементов УКР в  $s$  итерациях). Очевидно, что количество совпадений УКР  $N$  в отдельном элементе матрицы, при  $n_s \leq n_0$ , определяется по формуле

$$|N| = n_s - n_0, \quad (1)$$

где  $n_s$  – значение элемента матрицы в результате  $s$  итераций,  $n_0$  – исходное значение элемента матрицы, соответствующего УКР, присвоенное «пустому» элементу.



*a* –  $p = 4$  (четыре УКР (5) и ОП (8));  
*б* –  $p = 5$  (+1 УКР); *в* –  $p = 6$  (+1 УКР)

Рис. 5. Пример «накопления» элементами матрицы случаев совпадения координат УКР

Моделирование в среде MATLAB при использовании команды `imagesc` позволяет сформировать изображение, положение и цвет пикселей которого соответствует положению и численному значению элементов матрицы. При использовании палитры цветов `colormap(gray)` окрашивание пикселей осуществляется с градацией серого цвета [8]. Например, за присвоением элементам матрицы  $3 \times 3$  значений от 1 до 9

следует окрашивание соответствующих пикселей изображения в цвета от черного до белого (рис. 6).

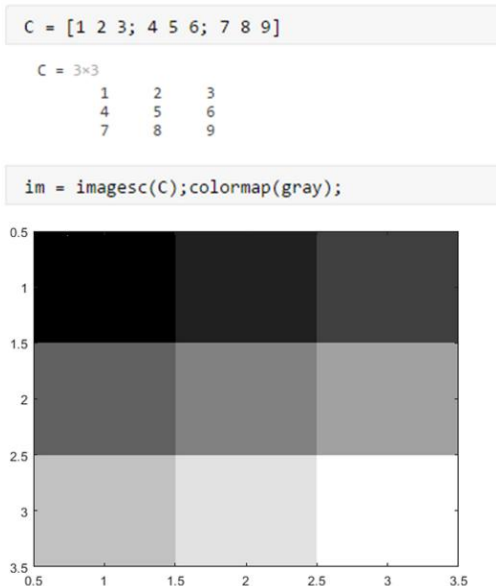


Рис. 6. Демонстрация использования команды `imagesc`

Формирование изображений с белым фоном осуществляется путем присвоения элементам матрицы численного значения, равного 10, являющимся максимальным из используемых в матрице.

Действие вычитания  $n_p - 1$  для повторяющихся элементов УКР определено для обеспечения наглядности изображения, так как при использовании палитры цветов `colormap(gray)` его пиксели, которым соответствуют элементы матрицы с меньшим числовым значением, окрашиваются в темные оттенки (рис. 6), отчетливо наблюдаемые на белом фоне. Чем темнее пиксель – тем чаще в соответствующем элементе матрицы совпадали элементы УКР в течение процесса моделирования.

В результате формируется изображение, на котором в прямоугольной системе координат отображаются положение ОП, область УКР, область «пустых» элементов (белый фон) и цветовая шкала, отражающая численное значение пикселей (элементов матрицы) (рис. 7).

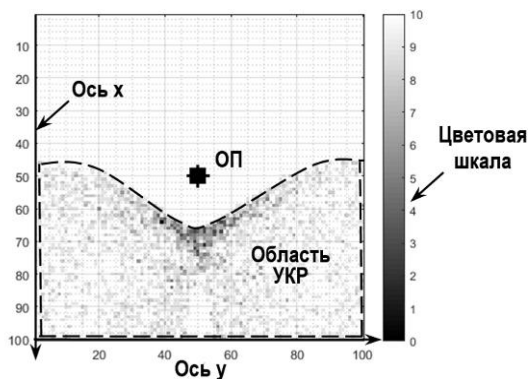


Рис. 7. Пример изображения, полученного с использованием команды `imagesc`

Таким образом, принимаемые условия и допущения обеспечивают решение задачи определения координат ретрансляторов на местности с использованием компьютерного моделирования.

## 2. Анализ возможных алгоритмов решения задачи определения координат ретрансляторов

Одним из возможных способов решения задачи определения УКР с использованием электронных вычислительных средств является применение алгоритма полного перебора с использованием цикла, заключающегося в проверке выполнения условия скрытия ОП поочередно для каждого элемента матрицы. В матрице  $A$  содержится  $10^4$  таких элементов. Следовательно, для установления закономерности распределения УКР во всей матрице необходимо совершить  $10^4$  математических операций.

Но, как известно, реальный воздушный носитель РСА не находится неподвижно в одной точке, а перемещается в пространстве. Изменение положения носителя РСА ведет к изменению его удаления от наземных объектов (ОП и Р) и, как следствие, к смещению формируемой шумовой полосы и уменьшению качества скрытия ОП [7]. Данное обстоятельство требует проведения новых расчетов координат ретранслятора, обеспечивающих прежнее качество скрытия ОП  $k$ . Очевидно, что количество математических операций над элементами матрицы возрастает с увеличением количества рассматриваемых точек возможного нахождения носителя РСА в пространстве

$$O_{mo} = l_{эм} \times r_{pca}, \quad (2)$$

где  $O_{mo}$  – количество математических операций,  $l_{эм}$  – количество элементов в матрице,  $r_{pca}$  – количество рассматриваемых точек положения носителя РСА в пространстве.

Например, предположим, что известно о десяти точках пространства, в которых может находиться носитель РСА. В таком случае, требуемое количество математических операций для определения закона распределения УКР в пределах матрицы  $A$  увеличится на порядок с  $10^4$  до  $10^5$ .

Задача более усложняется, если положение носителя РСА в пространстве является неизвестным. Таким образом, наличие области неопределенности положения носителя РСА в пространстве многократно увеличивает объем вычислений.

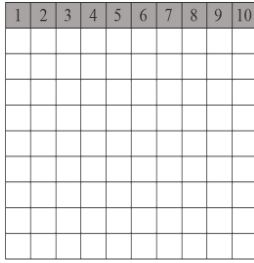
Вторым возможным способом решения задачи определения УКР является использование алгоритма случайного перебора, при котором в каждой новой итерации положение ретранслятора задается случайно во всем диапазоне возможных положений элементов матрицы.

Так, например, в матрице размерностью  $10 \times 10$  результатом десяти опытов при использовании первого алгоритма будут обработаны элементы только первой строки матрицы (рис. 8,а). Состояние элементов оставшейся матрицы останется неизвестным. Для исследования закономерности распределения УКР необходимо провести математические операции над всеми элементами. В результате использования второго алгоритма при равном количестве опытов становится известно состояние элементов, случайно распределенных по всей матрице (рис. 8,б).

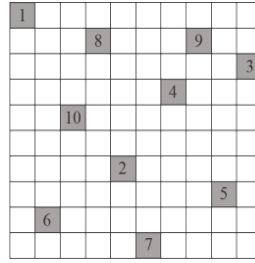
Как уже было рассмотрено выше, при использовании первого алгоритма в результате проведения  $10^5$  итераций становится известно расположение в матрице УКР для десяти возможных положений носителя РСА в пространстве. Дополним исходное условие второго алгоритма тем, что при каждой новой итерации случайное положение будет принимать не только ретранслятор, но и носитель РСА. В таком случае, при проведении такого же числа итераций при использовании второго алгоритма по истечении менее двух минут становится известно о расположении УКР для  $10^5$  случайных комбинаций координат носителя РСА и ретранслятора (табл. 1).

Сформированные изображения, полученные в результате моделирования по второму алгоритму при различных количествах итераций  $s$ , имеют существенные отличия (рис. 9).





а



б

а – алгоритм с полным перебором элементов матрицы;  
 б – алгоритм с перебором случайных элементов матрицы

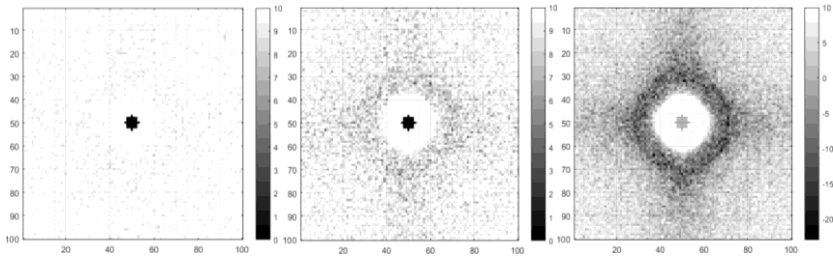
Рис. 8. Сравнение алгоритмов решения задачи определения «успешных координат ретрансляторов»

Таблица 1

Время проведения расчетов при различном количестве итераций

№ п/п	Количество итераций, шт.	Время
1	$10^4$	5 сек.
2	$10^5$	1 мин. 41 сек.
3	$10^6$	1 ч. 46 мин. 33 сек

Примечание: расчеты проводились на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i5-4460 (CPU @ 3.20GHz 3.20GHz) и оперативной памятью 8 Гб



а

б

в

а –  $s=10^4$  ( $t=5$  сек.); б –  $s=10^5$  ( $t=1$  мин. 41 сек.); в –  $s=10^6$  ( $t=1$  ч. 46 мин.)

Рис. 9. Зависимость вида изображения от количества итераций

Так, при  $s = 10^4$  (рис. 9,а) немногочисленные элементы УКР распределены практически равномерно, а малые числовые значения повторяющихся элементов УКР отражены в светлой окраске пикселей. Установление закономерности распределения УКР затруднено. Недостаточная информативность изображения при минимальном времени расчетов.

При  $s = 10^5$  (рис. 9,б) многочисленные элементы УКР распределены с заметным выделением области компактного размещения повторяющихся элементов УКР. Числовые значения повторяющихся элементов УКР обеспечивают окраску пикселей в темные тона, хорошо заметные на белом фоне. Закономерность распределения УКР хорошо прослеживается. Достаточная информативность изображения при малом времени расчетов.

При  $s = 10^6$  (рис. 9,в) большое количество элементов УКР распределены с существенным выделением области компактного размещения повторяющихся элементов УКР. Числовые значения повторяющихся элементов УКР отражены в темной окраске пикселей. Закономерность распределения УКР отчетливо прослеживается. Лучшая информативность изображения при максимальном времени расчетов.

Из анализа следует, что оптимальное изображение (с точки зрения информативности и временных затрат) формируется при  $s = 10^5$ .

Таким образом, второй алгоритм характеризуется отсутствием жестких требований к количеству опытов, необходимого для достижения цели исследования. Оно может быть выбрано таким, при котором количество обработанных элементов матрицы будет приемлемым для установления закономерности распределения УКР. Очевидно, что второй алгоритм является более информативным по сравнению с первым при меньших вычислительных затратах.

В методике, описанной далее, используется второй алгоритм, формирование изображения в котором осуществляется в результате  $10^5$  итераций.

### **3. Методика определения координат ретрансляторов**

Для определения УКР с помощью пакета прикладных программ MATLAB использовались команда `for`, с помощью которой задавались параметры начала и окончания циклов, команды `if`, `elseif`, `else`, определяющие соответствие числовых значений заданным требованиям, и команда `imagesc`, описанная ранее.

Для определения координат ретрансляторов составлен программный код, структура которого представлена на рис. 10.

Методика определения координат ретрансляторов включает:

1. ввод исходных данных (размерность матрицы; аппаратное время задержки; скорость света в свободном пространстве; диапазон случайного изменения координат ретранслятора и носителя РСА; координата ОП и его протяженность; ширина шумовой полосы; пороговое значение качества скрытия ОП  $k$  ; количество итераций в цикле  $s$  );
2. формирование «нулевой» матрицы с заданной размерностью (подготовка рабочей плоскости пространства);
3. цикл №1 – расчет качества скрытия ОП для случайных комбинаций координат ретранслятора и носителя РСА. В каждой итерации осуществляется: внесение в матрицу координат ОП, случайных координат ретранслятора и РСА, расчет наклонных дальностей между ними; расчет положения формируемой шумовой полосы; подсчет количества повторяющихся элементов УКР и качества скрытия ОП  $k$  ;  
заполнение массива данных  $M \{ p, x_p, y_p, k_p \}$  , где  $p = 1 \dots s$  – номер итерации (номер строки массива),  $x_p$  – значение координаты ретранслятора по оси  $x$  в данной итерации (значение первого столбца массива),  $y_p$  – значение координаты ретранслятора по оси  $y$  в данной итерации (значение второго столбца массива),  $k_p$  – значение качества скрытия ОП в данной итерации (значение третьего столбца массива); «очистка» рабочей плоскости пространства путем присвоения элементам матрицы «нулевых» значений;
4. внесение в матрицу координат ОП;
5. цикл № 2 – формирование матрицы расположения УКР. В ходе итераций осуществляется поочередное внесение в матрицу координат ретранслятора из массива данных  $M \{ p, x_p, y_p, k_p \}$  при выполнении условия  $k_p \geq k$  ;
6. формирование изображения с использованием команды imagesc. Для анализа закономерности распределения УКР рассматривались четыре случая, при которых носитель РСА при каждой новой итерации:
  1. был неподвижен;
  2. принимал случайные положения по оси  $y$  (горизонтальной) при фиксированном значении по оси  $x$  ;

3. принимал случайные положения по оси  $x$  (вертикальной) при фиксированном значении по оси  $y$  ;
4. принимал случайные положения во всей области пространства.

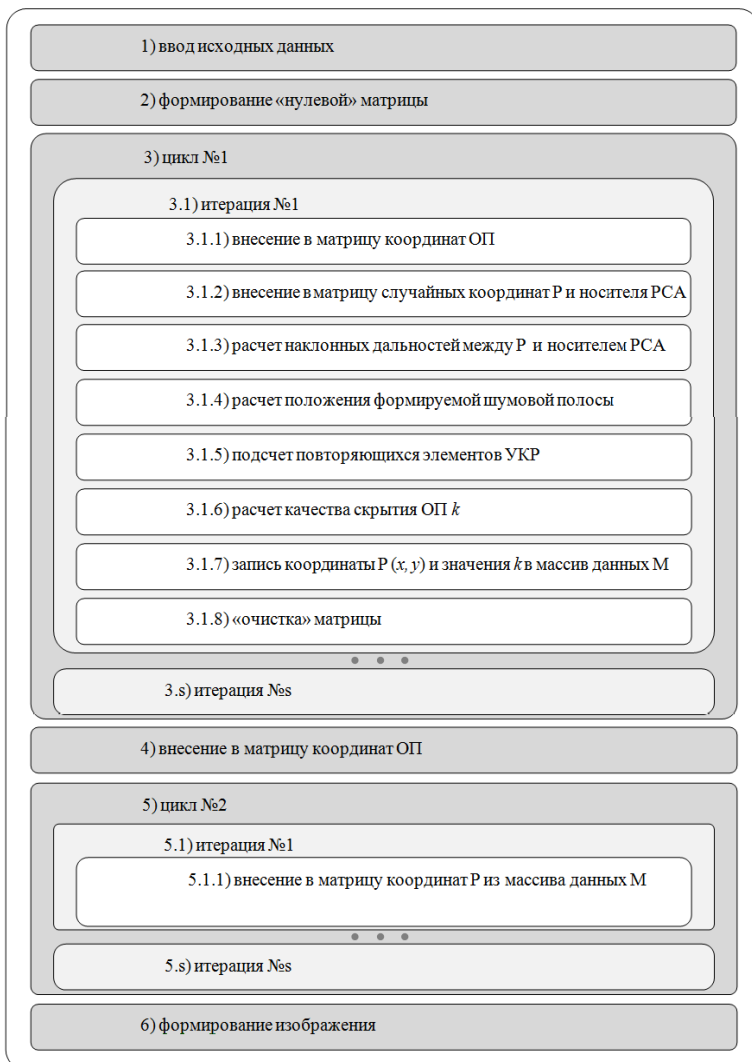


Рис. 10. Структура программного кода методики определения координат ретрансляторов на местности

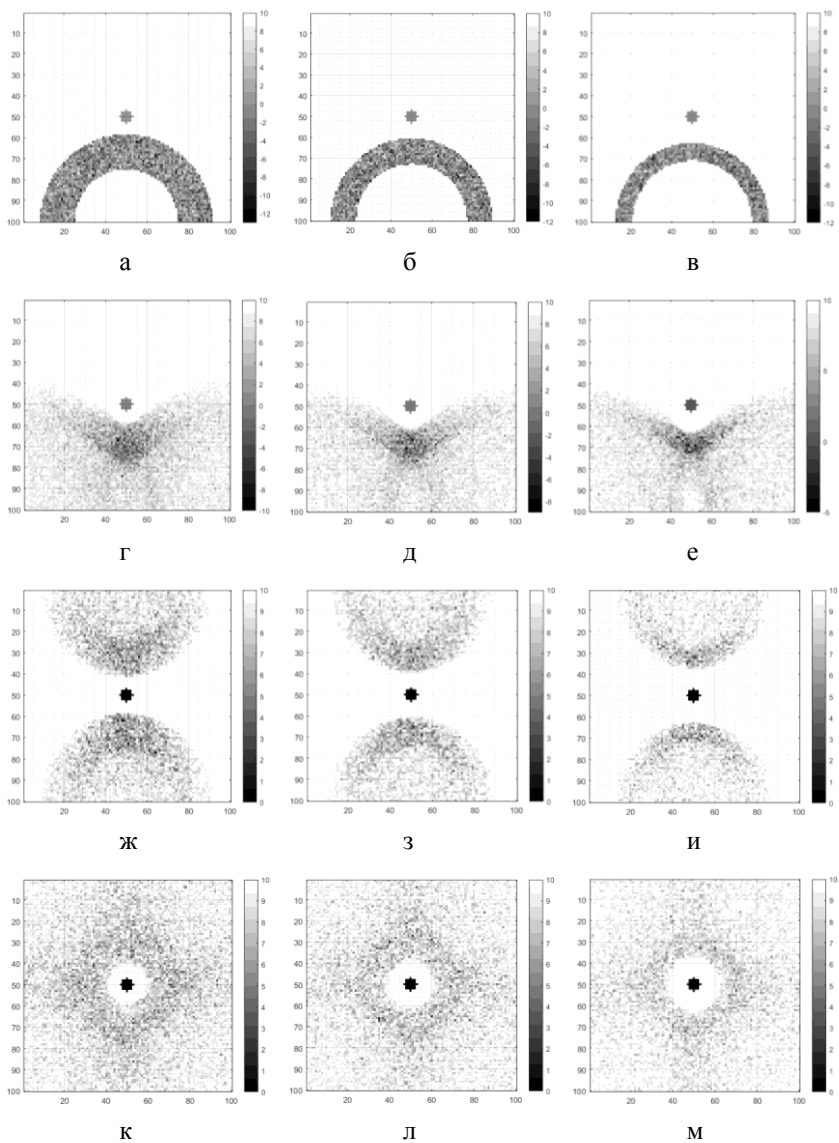
Положение ОП в ходе моделирования задано неподвижным в центре матрицы, положение ретранслятора – случайным.

В первом случае положения РСА (в центре нижней строки матрицы (100;50)) при низком качестве скрытия ОП  $k$ , когда координата ретранслятора обеспечивает скрытие не менее 20% поверхности ОП, на изображении область УКР имеет вид широкой дуги с центром в точке расположения РСА (рис. 11,а). Повышение качества скрытия до 80% сопровождается уменьшением толщины дуги, что свидетельствует об ужесточении требований к размещению ретранслятора (рис. 11,б,в). Отсутствие УКР между дугой и ОП характеризуется особенностью обработки сигнала РСА в процессе ретрансляции (аппаратным временем задержки) [6], шириной шумовой полосы и требуемым качеством скрытия ОП  $k$ . Так как УКР практически равномерно распределены по всей дуге, то и размещение Р в любом месте данной области будет одинаково эффективно.

В результате моделирования второго случая, когда область случайных положений РСА совпадает с нижней строкой матрицы ( $x=100$ ), области с наиболее плотным затенением соответствуют областям, в которых чаще встречаются повторяющиеся элементы УКР, при размещении в которых ретрансляторы обеспечивают скрытие ОП при неопределенности положения РСА с большей вероятностью с заданным качеством  $k$  (рис. 11,г). При повышении требования к качеству скрытия наблюдается уменьшение размеров области плотного расположения УКР, а следовательно и области эффективного размещения ретрансляторов для данных условий (рис. 11,д,е).

В третьем случае, когда ось возможных положений РСА проходит вертикально через центр ОП ( $y=50$ ), области затенения при неоднозначности положения РСА по оси  $x$ , соответствуют областям, где размещение ретранслятора наиболее целесообразно для эффективного скрытия ОП (рис. 11,ж). При повышении требования к качеству скрытия наблюдается уменьшение размеров областей плотного расположения УКР (рис. 13,з,и).

В четвертом случае, при неоднозначности положения РСА во всей области, наибольшая плотность УКР наблюдается вокруг ОП (рис. 11,к,л,м). С увеличением требуемого качества скрытия ОП  $k$  размер области плотного расположения УКР уменьшается. Наибольшая плотность УКР наблюдается вблизи ОП, образуя область в виде «кольца». Очевидно, что при размещении в пределах «кольца» ретрансляторы с большей вероятностью обеспечат скрытие ОП от средств радиолокационного мониторинга с требуемым качеством  $k$ .



*а, г, ж, к –  $k > 20\%$ ; б, д, з, л –  $k > 50\%$ ; в, е, и, м –  $k > 80\%$*

*Рис. 11. Закономерность распределения УКР при различных положениях носителя РСА и качестве скрытия ОП  $k$*

## **Заключение**

С помощью средств компьютерного моделирования MATLAB продемонстрирована методика расчета координат, при размещении на которых ретрансляторы обеспечивают скрытие наземного объекта от средств воздушного радиолокационного мониторинга с заданным качеством.

В результате проведенного анализа закономерности распределения УКР установлено:

1. при увеличении требований к качеству скрытия прикрываемого объекта уменьшается область, в которой размещение ретрансляторов наиболее эффективно;
2. вокруг прикрываемого объекта наблюдается область, в пределах которой УКР отсутствуют по причине наличия аппаратного времени задержки сигнала РСА в процессе ретрансляции.

Направлением дальнейших исследований может быть определение минимально необходимого количества ретрансляторов для скрытия наземного объекта в заданном секторе или вкруговую с учетом диаграмм направленности антенн РСА и постановщика помех.

Прикладное значение полученных результатов заключается в возможности перевода адреса отдельного элемента матрицы в плоские прямоугольные координаты. Размещение реального ретранслятора на такой позиции обеспечит скрытие прикрываемого объекта с требуемым качеством при заданной области неопределенности положения носителя РСА в пространстве.

## **Список литературы**

1. Купряшкин, И.Ф. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением : монография / И.Ф. Купряшкин, В.П. Лихачев, Л.Б. Рязанцев – М.: Радиотехника, 2020. 280 с. + 8 с цв. ил.
2. Киселев, В.А. К каким войнам необходимо готовить Вооруженные Силы России / В.А. Киселев // Военная мысль. – 2017. – № 3. – С. 37-47.
3. Матвеевский, М.М. Организация и ведение разведки в интересах боевого применения ракетных войск и артиллерии в современных операциях / М.М. Матвеевский, М.А. Сафронов // Военная мысль. – 2017. – № 10. – С. 5-10.
4. Фадеев, А.С. Военные конфликты современности, перспективы развития способов их ведения. Прямые и не прямые действия в вооруженных конфликтах XXI века / А.С. Фадеев, В.И. Ничипор // Военная мысль. – 2019. – № 9. – С. 33-42.

5. Богомолов, А.В. Малогабаритная двухдиапазонная РСА для беспилотного авиационного комплекса / А.В. Богомолов, И.Ф. Купряшкин, В.П. Лихачев, Л.Б. Рязанцев // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». СПб., 2015. – Вып. 11. – С. 235-240.

6. Купряшкин, И.Ф. Способ противодействия бортовым радиолокационным системам с непрерывным частотно-модулированным сигналом / И.Ф. Купряшкин, А.С. Мазин, В.П. Лихачев // Сборник научных статей по материалам I Всероссийской научно-практической конференции «Радиоэлектронная борьба в современном мире». – Воронеж, 2019. – С. 151-156.

7. Купряшкин, И.Ф. Применение ретрансляционных помех для скрытия наземных объектов от средств видовой радиолокационной разведки, размещенных на беспилотных летательных аппаратах / И.Ф. Купряшкин, А.С. Мазин, В.П. Лихачев // Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования. Сборник научных статей по материалам VII Международной НПК «Академические Жуковские чтения» – Воронеж, 2019. – С. 127-132.

8. MATLAB for Artificial Intelligence [Электронный ресурс] : база данных. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/imagesc.html>