# Компонент моделирования РЛ карты в составе тренажера самолета МИГ-29.

1. Подготовка исходных данных.
   1. Генерация базы исходных данных в виде структурированного набора тайлов.
2. Моделирование процесса построения РЛ карты в реальном времени.
   1. Построение идеализированного изображения в координатах «азимут – наклонная дальность».
      1. Загрузка тайлов в соответствии с текущими координатами самолета и заданной зоной обзора.
      2. Вычисление рассеянной мощности.
      3. Построение РЛ изображения в полярной системе координат.
   2. Моделирование физических эффектов, искажающих идеальное изображение.
      1. Спекл-эффект.
      2. Корреляция пикселей изображения в соответствии с импульсной характеристикой радара.
      3. Аддитивный гауссовский шум.
   3. Преобразование изображения в декартовы координаты.

# 1 Подготовка исходных данных.

## 1.1 Генерация базы исходных данных в виде структурированного набора тайлов различных уровней детализации.

БРЛС Жук-МЭ имеет режимы низкого, среднего, и высокого разрешений. Для моделирования этих режимов в реальном времени необходимо, чтобы исходных данные, необходимые для построения кадра, успевали загрузиться в оперативную память за отведенное время (3 - 10с). Для этого исходные данные необходимо представляются в виде различных уровней детализации (LODов).

Одним из способов разбиения на уровни детализации является пирамида – каждый следующий уровень детализации (LOD) имеет разрешение в два раза большее, чем предыдущий. Уровень детализации исходных данных определяется в соответствии с требуемым разрешением кадра. Так как разрешение соседних LODов отличается в 2 раза, то при визуализации LODвыбирается, если требуемое разрешение кадра лежит в пределах от 0.75 до 1.5 от разрешения LODа.

Географически исходные данные представляются в виде единиц фиксированного размера– тайлов. Каждый тайл физически состоит из двух файлов:

1. Триангулированная сетка высот в формате OpenFlight mesh.
2. Текстура, содержащая в себе карту распределения отражающей способности земной поверхности и карту нормалей к земной поверхности. Наложение текстуры на полигональную сетку высот производится ортогональным проецированием сверху, при этом географические координаты углов текстуры совпадают с координатами углов файла сетки высот.

Триангулированная сетка высот, разбитая на тайлы, генерируется в программе Presagis TerraVista. В качестве исходных данных используются доступные цифровые модели рельефа (например, SRTM с разрешением ≈ 90м или ASTER cразрешением ≈ 30м).

Карта нормалей генерируется методом конечных разностей из той же цифровой модели рельефа. В качестве карты распределения отражающей способности земной поверхности используются спутниковые радиолокационные снимки Земли. Длина волны и поляризация должны по возможности совпадать с теми, которые используются в моделируемом авиационном радаре (в случае БРЛС Жук-МЭ λ = 3 см, вертикальная поляризация).

# 2 Моделирование процесса построения РЛ карты авиационным радаром в реальном времени.

## 2.1 Построение идеализированного изображения

### 2.1.1 Загрузка тайлов в соответствии с текущими координатами самолета и заданной зоной обзора.

Предположим, что самолет находится в точке O, азимутальный сектор зоны обзора определяется (рис.1). Для того, чтобы тайл находился в этом азимутальном секторе, необходимо, чтобы выполнялось одно из следующих условий:

1. Прямоугольник (вид тайла сверху) содержит в себе точку О.
2. Хотя бы одна из вершин прямоугольника находится по азимуту, меньшем или равном максимальному (луч ОА), хотя бы одна из вершин прямоугольника находится по азимуту, большем или равном минимальному (луч ОВ), и точка C’ –проекция центра прямоугольника на прямую n–лежит на луче ON (биссектрисе ).

Условие 2 проверяется с помощью скалярных произведений векторов. На рис.1 ему удовлетворяет прямоугольник R1R2R3R4;не удовлетворяют прямоугольники P1P2P3P4 (все вершины имеют азимут, меньше минимального), и С1С2С3С4 (проекция C’ центра прямоугольника на прямую nлежит не на луче ON, а на его продолжении.

O

A

B

R1

R4

R3

R2

C

C’

P1

P4

P3

P2

C1

C4

R3

C2

N

n

Рис.1

Для определения того, попадает ли тайл в зону обзора по дальности, тайлы должны быть заранее проиндексированы в соответствии с минимальной и максимальной вертикальной координатой земной поверхности. Тогда минимальное и максимальное расстояния от точки, в которой находится самолет, до тайла (параллелепипед), определяется тривиально.

### 2.1.2 Вычисление рассеянной мощности.

Интенсивность расеянного электромагнитного поля зависит некоторым образом от угла падения луча на рассеивающую поверхность. Если источник и приемник находятся в одной точке (радар), то ее можно смоделировать по формуле

,

Где α – угол между лучом и нормалью к поверхности,n – коэффициент зеркальности поверхности, – интенсивность отраженной волны при нормальном падении. В простейшем случае коэффициент nможно считать постоянным, угол паденияαвычислять исходя из карты нормалей, a в качестве взять значения яркости пикселей спутникового радиолокационного снимка.

Возможна компенсация изменения средней яркости РЛ карты в зависимости от высоты самолета путем деления яркости пикселей на яркость среднестатистической горизонтальной поверхности в центре зоны обзора.

### 2.1.3 Построение РЛ изображения в полярной системе координат.

Изначально радар получает изображение местности в полярных координатах *«азимут – наклонная дальность»*, а затем переводит его в декартовы. Для моделирования этого процесса на видеокарте необходимо каждый треугольник сетки высот визуализировать в полярной системе координат.

Для каждого треугольника сетки высот строится соответствующая ему фигура в системе координат «азимут – наклонная дальность». Форма этой фигуры определяется положением точки исходного треугольника, имеющей минимальную наклонную дальность. Очевидно, точка с минимальной наклонной дальностью – это проекция точки, изображающей самолет, на плоскость треугольника. Можно выделить два случая:

1. Проекция точки, изображающей самолет, на плоскость треугольника не лежит внутри этого треугольника. В этом случае точка исходного треугольника с минимальной наклонной дальностью лежит на одном из его ребер (или совпадает с одной из вершин). Фигуру, получившуюся при проебразовании треугольника в полярную систему координат, можно назвать *«криволинейным треугольником»* (рис.2 a и b).
2. Проекция точки, изображающей самолет, на плоскость треугольника (точка с минимальной наклонной дальностью) лежит внутри этого треугольника. При преобразовании в полярную систему координат треугольник становится фигурой довольно сложного вида (рис.2 c).

P

R

Q

a

b

c

Рис. 2. Треугольник в полярной системе координат.

Для отображения произвольной фигуры на видеокарте необходимо сформировать в геометрическом шейдере многоугольник, описанный вокруг отрисовываемой фигуры. Затем в процессе растеризации надо отбросить точки, не принадлежащие отрисовываемой фигуре. Для достижения наибольшей скорости отрисовки описанный многоугольник должен иметь минимально возможную площадь.

В первом случае вокруг криволинейного треугольника описывается обычный треугольник (рис.2 a, b). Вначале переводим в полярную систему координат вершины треугольника. Соединяем их отрезками прямых (пунктирые линии на рис.2). Если криволинейное ребро выпуклое, то берем точку на его середине (точка P на рис. 2а, точки Q и R на рис. 2b) и проводим прямую, параллельную прямой, соединяющей вершины.

Во втором случае вокруг криволинейного треугольника описывается прямоугольник, стороны которого определяются минимальными и максимальными значениями азимута и дальности (рис.2 с).

Описанный многоугольник разбивается на треугольники. Затем этот многоугольник растеризуется во фрагментном шейдере.

Процесс растеризации можно разбить на два основных этапа:

1. Определяем координату точки пересечения дуги окружности, соответствующей данным азимуту и дальности (рис.3), с плоскостью исходного треугольника, соответствующего растеризуемому.
2. Если точка пересечения лежит внутри исходного треугольника, то, в соответствии с ее x и y - координатами, из текстуры определяем отражающую способность земной поверхности, нормаль к этой поверхности, и вычисляем рассеянную мощность.

Если же точка пересечения не лежит внутри исходного треугольника, то данный фрагмент отбрасывается.

Возможен случай, когда две точки земной поверхности имеют одинаковый азимут и дальность. Сигналы от них суммируются.

-α

R

O

x

y

z

x

P

P1

P2

P3

P4

P5

P6

P7

R1

R2

R3

z

Рис.3 Растеризация в координатах «азимут – дальность».

## 2.2 Моделирование физических эффектов, искажающих идеальное изображение.

## 2.2.1 Спекл – эффект.

Системы с когерентной обработкой сигналов, такие, как радар или сонар, характеризуются спекл – эффектом. ИзображениеРЛ карты можно представить как поле случайных величин, которые распределены по отрицательному экспоненциальному закону:

,

где I – яркость пикселя РЛ изображения. Стандартное отклонение случайной величины равно ее среднему значению σ. Таким образом, чем ярче область изображения, тем сильнее он «шумят» пиксели в этой области. Изображение принимает характерный «пятнистый» вид, что и дало название этому эффекту.

Для подавления спекл – эффекта радар строит несколько изображений одной и той же области, а затем их усредняет. В этом случае яркость пикселей РЛ карты будет случайной величиной с модифицированным гамма–распределением:

,

где I – яркость пикселя РЛ карты, θ – его среднее значение, k - число усреднений, Г(k) – гамма-функция. Стандартное отклонение яркости будет равно .

Очевидно, что . Поэтому спекл-эффект можно смоделировать следующим образом:

1. Генерируем текстуру, содержащую в себе случайные величины с модифицированным гамма – распределением, с заданным параметком k, и параметром θ = 1. Это можно сделать один раз при инициализации программы, а при построении каждого кадра перестанавливать элементы текстуры случайным образом.
2. Построеное идеализированное изображение РЛ карты попиксельно умножаем на текстуру, сгенерированную на шаге 1.

### 2.2.2 Корреляция пикселей изображения в соответствии с импульсной характеристикой радара.

Импульсная характеристика радара – это отклик на точечный излучатель с единичной интенсивностью. В идеале на РЛ карте должна получиться такая же точка, но на практике изображение этой точки «расплывается». Степень этого размытия по азимуту определяется реальной или синтезированной (для режимов синтезирования апертуры) диаграммой направленности антенны. Её угловой размер для различных режимов дан в руководстве по радару.

В частности, для режима низкого разрешения (LRM) угловой размер диаграммы направленности антенны ≈ 3.5, что приводит к сильно выраженному размытию изображения по азимуту.

Размер импульсной характеристики по дальности (степень размытия) подбирается вручную с учетом визуального сходства смоделированных и реальных (СПОИ) РЛ изображений.

Размытие изображение производится путем его свертки с некоторым ядром (например, гауссовским).

Дополнительно на смоделированное изображение может накладываться аддитивный гауссовский шум.

### 2.3 Преобразование изображения к декартовым координатам.

Преобразование изображения к декартовым координатам производится по формулам (рис.3):

,

, где

, - горизонтальная дальность, R– наклонная дальность, h–высота самолета над опорной поверхностью (поверхность, на которую производится проектирование).

h

R

R

Rh

O

M

M’

O

M’

-α

Rh

x

y

рис.3