



## Процессор геокодирования (Гео процессор)

Номер версии документа: 1.2008-08-21

В настоящем документе содержится описание алгоритмов, используемых в программе «Процессор геокодирования» программного пакета PHOTOMOD Radar.

### УВЕДОМЛЕНИЕ О КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ

Настоящий документ содержит описание алгоритмов и программного обеспечения, относящееся к разряду конфиденциальной информации. По этой причине, ни этот документ, ни любая его часть не могут быть использованы без письменного согласия авторов документа.

### Содержание

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3-3
НАЗНАЧЕНИЕ, СОСТАВ И ЗАДАЧИ ПРОЦЕССОРА ГЕОКОДИРОВАНИЯ	3-5
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ	3-6
ФОРМУЛЫ ПЕРЕХОДА ОТ ОДНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ К ДРУГОЙ	3-7
УРАВНЕНИЯ ГЕОКОДИРОВАНИЯ	3-8
Уравнения, определяющие положение точки, соответствующей элементу снимка (прямое геокодирование)	3-8
Уравнения, определяющие элемент снимка соответствующий точке с заданными пространственными координатами (обратное геокодирование)	3-11
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КА	3-13
КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ	3-14
Уравнения коррекции положения КА вдоль орбиты	3-14
Уравнения коррекции положения искусственного спутника Земли в поперечном и радиальном направлениях	3-15
ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ АЛГОРИТМОВ	3-17
Геореференцирование	3-17
Геокодирование и орторектификация	3-17
Эффекты бокового обзора	3-19
Формирование маски наложений	3-20
Формирование маски затенений	3-21
Примеры построения карт распределения наложения и тени	3-22



## Основные понятия и определения

Радиолокационные снимки поверхности Земли являются одним из типов данных, получаемых датчиками дистанционного зондирования, наряду с инфракрасными и оптическими. Радиолокационное изображение (РЛИ) обычно представлено в одной из следующих систем координат:

- **Путевая система координат (ПСК)** - представляет собой двумерный массив с осями азимута (направление путевой скорости космического аппарата (КА)) и наклонной дальности (направление линии визирования от радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) до точки на поверхности Земли);
- **Наземная система координат (НСК)** - представляет собой двумерный массив с осями азимута (направление путевой скорости космического аппарата (КА)) и наземной дальности (направление линии визирования от подспутниковой до точки на поверхности Земли).

Для повышения дешифрируемости объектов поверхности целесообразно совместно обрабатывать снимки, полученные с различных датчиков, для чего необходимо обеспечить их пространственную совместимость. Для обеспечения пространственной совместимости снимки с различных датчиков должны быть представлены в единой базисной системе координат, в качестве которой может быть выбрана система координат одного из датчиков, геодезическая система или одна из наиболее распространённых картографических проекций.

Технологически пространственная привязка разделяется на два типа:

- геометрическая калибровка снимков;
- геометрическая коррекция снимков.

Геометрическая калибровка подразумевает определение для любого заданного элемента цифрового снимка его координат на земной поверхности в базисной системе. Иначе говоря, при геометрической калибровке каждому отсчёту снимка в антенной системе координат “время – наклонная дальность” ставятся в соответствие наземные координаты, обычно в некоторой картографической проекции. При этом трансформации собственно матрицы изображения не производится, калибровка включает только операцию вычисления координат.

Геометрическая коррекция подразумевает преобразование снимка в базисную систему координат, при котором производится трансформация растра снимка. Геометрическая коррекция включает в себя две основные операции:

- геометрическая калибровка или расчёт наземных координат элементов снимка;
- геометрическая трансформация снимка на новую сетку, соответствующую параметрам выбранной базисной системы, результатам геометрической калибровки и заданному масштабу.

В дальнейшем в качестве базисной системы будет пониматься картографическая проекция.

В современных системах обработки данных РСА реализуются несколько видов геометрической коррекции.

1. **Геореференцирование** – операция обработки, на выходе которой формируется снимок в путевой системе координат “время – наземная дальность”. Растр снимка трансформируется таким образом, чтобы обеспечить заданное межпиксельное расстояние на земной поверхности.
2. **Геокодирование** – преобразование географических координат точек снимка из антенной системы координат РСА в одну из картографических проекций. В геокодированном изображении снимок ориентирован в направлении “север -



юг”. Межпиксельное расстояние определяется в единицах проекции (градусах или метрах), масштаб выбирается пользователем. Геокодирование может проводиться с учётом или без учёта локальных возвышений рельефа над опорным эллипсоидом. Во втором случае необходимо иметь цифровую модель рельефа на обрабатываемый снимок.

3. **Прецизионное геокодирование** - уточнение географических координат снимка по наземным опорным точкам с участием оператора. Наземные контрольные точки должны иметь точность, превосходящую на порядок точность представления баллистических данных.
4. **Орторектификация** – пересчёт картографических координат точек снимка на опорной поверхности с учётом локальных возвышений рельефа. Эта операция проводится с привлечением цифровой модели рельефа поверхности. Цифровая модель рельефа представляет собой двумерную матрицу, каждому элементу которой поставлена в соответствие тройка координат: широта, долгота, высота. Яркость каждого элемента пропорциональна возвышению соответствующей точки на земной поверхности над геоидом (уровнем моря).

Геометрическая калибровка снимков РСА требует решения задачи нахождения для каждого элемента растра в ПСК “время – наклонная дальность” или в НСК “время – наземная дальность” геодезических координат соответствующей ему точки на поверхности геометрической фигуры, аппроксимирующей Землю. Эта искомая точка лежит в общем случае на пересечении так называемого Доплеровского конуса, сферы равных дальностей от платформы – носителя РСА и эллипсоида (или сферы), аппроксимирующей Землю.

Доплеровский конус образуется направлениями от платформы РСА на точки с равными доплеровскими частотами. Ось конуса совпадает с направлением вектора текущей скорости платформы. Положительные доплеровские частоты соответствуют движению платформы по направлению к цели. В большинстве современных систем космических РСА радиолокационные снимки синтезированы на нулевой доплеровской частоте, так что на траверсе цели, когда линия визирования цели и вектор скорости образуют прямой угол, доплеровская частота равна нулю. В этом случае доплеровский конус превращается в плоскость, перпендикулярную вектору скорости.

В процессе геометрической калибровки одновременно участвуют параметры относительного движения носителя РСА и цели и параметры их взаимного положения, включая:

- положение платформы в момент съёмки;
- положение цели или точки на поверхности;
- параметры движения платформы;
- параметры движения цели, обусловленные вращением Земли.



## Назначение, состав и задачи процессора геокодирования

Процессор геокодирования предназначен для решения следующих задач:

- Трансформации исходного радиолокационного изображения из ПСК в НСК - геореференцирование;
- Трансформации исходного радиолокационного изображения из ПСК или НСК в заданную оператором картографическую проекцию без учета цифровой модели рельефа местности (ЦМР) - геокодирование;
- Трансформации исходного радиолокационного изображения из ПСК или НСК в заданную оператором картографическую проекцию с учетом ЦМР\* - орторектификация.

В состав Процессора Геокодирования входят следующие подпрограммы:

- Геореференцирования, геокодирования и орторектификации;
- Расчета параметров движения КА по исходным баллистическим данным;
- Преобразования координат из одной системы в другую;
- Ввода и контроля исходных данных;
- Уточнение исходных баллистических параметров по опорным точкам местности.

При этом решаются следующие частные задачи:

- переход из одной системы координат в другую;
- прогнозирование параметров движения;
- аппроксимация параметров движения;
- коррекция параметров движения по наземным опорным точкам;
- расчет коэффициентов полинома пересчета наклонной дальности в наземную;
- решение уравнений геокодирования.

\* Файл цифровой модели рельефа должен быть представлен во внутреннем формате программного модуля с расширением '.rdp'. Переход во внутренний формат осуществляется при помощи программы "Импорт/Экспорт", входящей в состав пакета PHOTOMOD Radar. В качестве исходных данных цифровой модели рельефа можно использовать файлы формата GeoTiff или USGS.



## Используемые системы координат

### 1. Абсолютная геоцентрическая экваториальная система координат (OXYZ).

Начало – в центре масс Земли;

Ось X – направлена в точку весеннего равноденствия;

Ось Z - совпадает с осью вращения Земли и направлена на северный полюс;

Ось Y- дополняет систему до правой.

Применяется для пересчета исходных данных в гринвичскую СК.

### 2. Гринвичская относительная система координат (Oxyz)

Начало в центре масс Земли, система “вращается” вместе с Землей;

Ось x – совпадает с линией пересечения земного экватора с плоскостью гринвичского меридиана;

Ось z - совпадает с осью вращения Земли и направлена на северный полюс;

Ось y - дополняет систему до правой.

В данной системе координат проводится интегрирование системы дифференциальных уравнений движения КА, проводятся расчеты геодезических координат точек на поверхности Земли.

### 3. Скоростная барицентрическая система координат (OXcYcZc)

Начало в центре масс КА;

Ось Xc – направлена по вектору скорости КА;

Ось Yc - перпендикулярна плоскости орбиты и параллельна вектору кинетического момента C (интегралу площадей).

Ось Zc - дополняет систему до правой.

Применяется для решения уравнений геокодирования.



## Формулы перехода от одной системы координат к другой

От абсолютной геоцентрической экваториальной системы координат (АГЭСК) OXYZ к Гринвичской относительной системе координат (ГОСК) Oxyz:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [\alpha] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} vx \\ vy \\ vz \end{bmatrix} = [\alpha] \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \omega_3 \begin{bmatrix} y \\ -x \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где:

$$\gamma = S_0 + \omega_3 \cdot t;$$

$S_0$  - звездное время в среднюю гринвичскую полночь;

$\omega_3$  - абсолютная угловая скорость вращения Земли;

$t$  - текущие время.

От скоростной барицентрической системы координат (СБСК) OXcYcZc к Гринвичской относительной системе координат (ГОСК) Oxyz:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + [\beta] \begin{bmatrix} Xc \\ Yc \\ Zc \end{bmatrix},$$

$$[\beta] = \begin{bmatrix} vx_0/v_0 & c_x/c & (vy_0c_z - vz_0c_y)/v_0/c \\ vy_0/v_0 & c_y/c & (vz_0c_x - vx_0c_z)/v_0/c \\ vz_0/v_0 & c_z/c & (vx_0c_y - vy_0c_x)/v_0/c \end{bmatrix},$$

где:

$$v_0 = \sqrt{vx_0^2 + vy_0^2 + vz_0^2};$$

$$c_x = y_0vz_0 - z_0vy_0;$$

$$c_y = z_0vx_0 - x_0vz_0;$$

$$c_z = x_0vy_0 - y_0vx_0;$$

$$c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2}.$$



## Уравнения геокодирования

В Процессоре геокодирования реализованы две технологии, получившие условные названия “прямого” и “обратного” геокодирования. “Прямое” геокодирование применяется для расчета угловых точек кадра изображения и геометрической коррекции параметров орбиты. Применение “прямого” геокодирования для всего кадра изображения затруднено, так как в качестве результата получается нерегулярная сетка выбранной системы координат. Для устранения данного недостатка применен метод “обратного” геокодирования. При “обратном” геокодировании для заданных регулярных геодезических координат точки на поверхности Земли находится момент времени  $T$  съемки и наклонная дальность  $R_{sl}$  для данной точки.

По  $R_{sl}$  и  $T$  определяются файловые (антенные) координаты  $(i, j)$  элемента исходного изображения, соответствующего заданной точке на поверхности Земли, где  $j$  – номер линии дальности элемента снимка,  $i$  – номер точки  $j$ -ой линии дальности.

### Уравнения, определяющие положение точки, соответствующей элементу снимка (прямое геокодирование)

Для того, чтобы определить позицию объекта  $\vec{R}_t$ , соответствующую элементу снимка с заданным номером точки и номером линии дальности необходимо найти пересечение доплеровского конуса, сферы дальности и эллипсоида Земли. Геометрия геокодирования представлена на рис. 1.

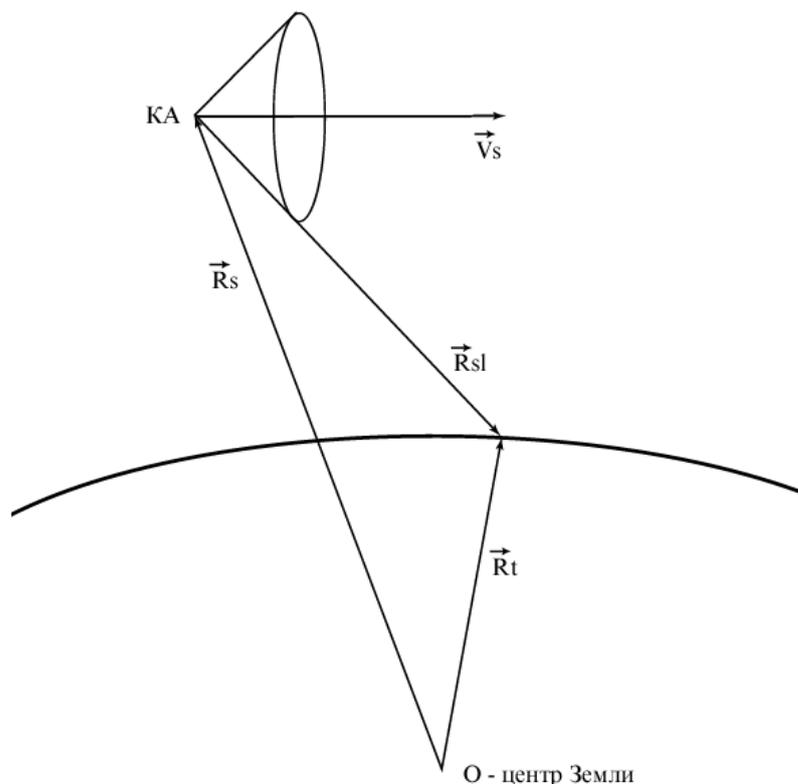


Рис. 1. Геометрия геокодирования.



Для решения задачи геокодирования используется следующая система нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \Delta f = \frac{2(\bar{R}_s - \bar{R}_t)(\bar{V}_s - \bar{V}_t)}{\lambda R_{sl}} \\ R_{sl} = |\bar{R}_s - \bar{R}_t| \\ \frac{x_t^2 + y_t^2}{(a + h_t)^2} + \frac{z_t^2}{(b + h_t)^2} = 1 \end{cases},$$

где:

$\Delta f$  - доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала;

$\lambda$  - длина волны;

$\bar{R}_s$  и  $\bar{V}_s$  - векторы положения и скорости платформы соответственно;

$\bar{R}_t$  и  $\bar{V}_t$  - векторы положения и скорости точки на поверхности Земли соответственно; поскольку используется система координат, связанная с Землей, то скорость  $\bar{V}_t$  точки на поверхности принимается равной нулю.

$x_t, y_t, z_t$  - составляющие вектора положения точки;

$R_{sl}$  - наклонная дальность до точки;

$a, b$  - большая и малая полуоси земного эллипсоида;

$h_t$  - высота рельефа над эллипсоидом, задаваемая пользователем.

Система уравнений решается итерационным методом Ньютона. Положение и скорость платформы  $\bar{R}_s$  и  $\bar{V}_s$  можно найти как функции от времени  $T(j)$ , где  $j$  – номер линии дальности. Математическая модель возмущенного орбитального движения спутника представлена ниже.

Входными параметрами являются:

$j$  – номер линии дальности снимаемого элемента снимка;

$i$  – номер точки  $j$ -ой линии дальности;

$T(j)$  – время съемки  $j$ -й линии дальности;

$\Delta f$  - доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала;

$\lambda$  - длина волны;

$\bar{R}_s = (x_s, y_s, z_s)$  - вектор положения платформы на момент времени  $T(j)$ ;

$\bar{V}_s = (v_{sx}, v_{sy}, v_{sz})$  - вектор скорости платформы на момент времени  $T(j)$ ;

$R_{sl}$  - наклонная дальность до точки;

$a, b$  - большая и малая полуоси земного эллипсоида;

$Hr(i, j)$  – двумерный массив значений высот в узлах географической сетки для обрабатываемой поверхности.

Определяемые параметры:

$\bar{R}_t = (x_t, y_t, z_t)$  - вектор положения точки, соответствующей элементу снимка. По вектору  $\bar{R}_t$  определяют картографические координаты точки  $(B_t, L_t)$ .



Для случая съемки с нулевой доплеровской частотой систему уравнений геокодирования можно записать в следующем виде:

$$\Delta f = 2V_s \cos(\psi) / \lambda ;$$

$$R_{sl} = \sqrt{((x_s - x_t)^2 + (y_s - y_t)^2 + (z_s - z_t)^2)};$$

$$x_t^2 / (a + h_t)^2 + y_t^2 / (a + h_t)^2 + z_t^2 / (b + h_t)^2 = 1;$$

где:

$$\cos(\psi) = ((x_s - x_t)v_{xs} + ((y_s - y_t)v_{ys} + ((z_s - z_t)v_{zs}) / R_{sl} / V_s ;$$

$a$  - большая полуось земного эллипсоида;

$b$  - малая полуось земного эллипсоида;

$h_t$  - высота точки над поверхностью земного эллипсоида;

$x_t, y_t, z_t$  - координаты точки на поверхности земного эллипсоида;

$V_s = \sqrt{(v_{xs}^2 + v_{ys}^2 + v_{zs}^2)}$  - модуль вектора скорости КА.

Для решения данной системы уравнений используется скоростная барицентрическая система координат (СБСК). Координаты точки  $t$  на поверхности Земли, которые подлежат геокодированию, в СБСК запишутся в виде:

$$X_c = R_{sl} \cos(\psi)$$

$$Y_c = R_{sl} \sin(\theta) \sin(\gamma),$$

$$Z_c = -R_{sl} \cos(\gamma)$$

где  $\theta = \arccos\left(\frac{\cos(\psi)}{\sin(\gamma)}\right)$ .

Учитывая тот факт, что  $\Delta f = 0$  и, следовательно,  $\psi = 90^\circ$  координаты в СБСК можно записать в более простом виде:

$$X_c = 0$$

$$Y_c = R_{sl} \sin(\gamma)$$

$$Z_c = -R_{sl} \cos(\gamma)$$

Тогда система уравнений геокодирования в СБСК преобразуется в уравнение:

$$f(\gamma) = (x_s + \beta_{1,2}Y_c + \beta_{1,3}Z_c)^2 / (a + h_t)^2 + (y_s + \beta_{2,2}Y_c + \beta_{2,3}Z_c)^2 / (a + h_t)^2 +$$

$$(z_s + \beta_{3,2}Y_c + \beta_{3,3}Z_c)^2 / (b + h_t)^2 - 1;$$

Это уравнение решается итерационным методом Ньютона с использованием следующей формулы:

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i - f(\gamma_i) / f'(\gamma_i).$$

Нулевое приближение  $\gamma_0$  определяется следующей зависимостью:

$$\gamma_0 = \cos^{-1}((R_s^2 + R_{sl}^2 - R_z^2) / (2R_s \cdot R_{sl})),$$

где:

$R_s = \sqrt{(x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)}$  - расстояние от центра масс Земли до центра масс КА;

$R_z = 6371$  км - средний радиус Земли.

Производная функции  $f(\gamma)$  запишется в виде:

$$f'(\gamma_i) = 2 \cdot ((\beta_{1,2}Y_c' + \beta_{1,3}Z_c') / (a + h_t)^2 + (\beta_{2,2}Y_c' + \beta_{2,3}Z_c') / (a + h_t)^2 +$$

$$+ (\beta_{3,2}Y_c' + \beta_{3,3}Z_c') / (b + h_t)^2)$$

Входящие в последнее уравнение производные координат в СБСК по  $\gamma$ :



$$Y_c' = R_{sl} \cos(\gamma_i)$$

$$Z_c' = R_{sl} \sin(\gamma_i)$$

ПРИМЕЧАНИЕ: Если  $\Delta f \neq 0$ , то вводится дополнительная барицентрическая система, которая развернута на угол  $\psi$  вокруг оси  $Z_c$  СБСК. Формируется матрица  $c = \beta\kappa$ , где  $\kappa$  - матрица перехода от дополнительной СК к СБСК. Следует также отметить, что знак угла  $\gamma$  определяется направлением съемки: слева или справа от маршрута движения КА.

### Уравнения, определяющие элемент снимка соответствующий, точке с заданными пространственными координатами (обратное геокодирование)

При обратном геокодировании для заданных регулярных геодезических координат  $B_t, L_t, h_t$  находится момент времени  $t_s$  и соответствующие гринвичские координаты  $x_s, y_s, z_s, v_{xs}, v_{ys}, v_{zs}$  КА. Для решения этой задачи используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \Delta f = \frac{2(\bar{R}_s - \bar{R}_t)(\bar{V}_s - \bar{V}_t)}{\lambda R_{sl}} \\ R_{sl} = |\bar{R}_s - \bar{R}_t| \\ \bar{R}_s = Q_R(t) \\ \bar{V}_s = Q_V(t) \end{cases},$$

где:

$Q_R(t)$  и  $Q_V(t)$  – преобразования, реализующие моделирование орбиты;

$\Delta f$  - доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала;

$\lambda$  - длина волны;

$\bar{R}_s$  и  $\bar{V}_s$  - векторы положения и скорости платформы соответственно;

$\bar{R}_t$  и  $\bar{V}_t$  - векторы положения и скорости точки на поверхности Земли соответственно; поскольку используется система координат, связанная с Землей, то скорость  $\bar{V}_t$  точки на поверхности принимается равной нулю.

$R_{sl}$  - наклонная дальность до точки;

Компоненты вектора  $\bar{R}_t$  определяются по геодезическим координатам  $(B_t, L_t)$  заданной точки и высоте рельефа  $h_t$ , значение которой берут из файла цифровой модели рельефа.

Система уравнений также решается итерационным методом.

Входные параметры:

$B_t$  - широта;

$H_t$  - долгота;

$h_t$  - высота рельефа в заданной точке;

$a, b$  - большая и малая полуоси земного эллипсоида;

$\lambda$  - длина волны;

Определяемые параметры:

$R_{sl}$  - наклонная дальность до точки;



$t_s$  – время съемки линии дальности;

$\Delta f$  - доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала;

$\vec{R}_s = (x_s, y_s, z_s)$  - вектор положения платформы на момент времени  $t_s$ ;

$\vec{V}_s = (v_{sx}, v_{sy}, v_{sz})$  - вектор скорости платформы на момент времени  $t_s$ ;

В случае съемки с нулевой доплеровской частотой, когда выполнено условие  $\Delta f = 0$  можно использовать следующий алгоритм.

Условие нулевой доплеровской частоты справедливо для угла  $\psi = 90^0$ , т.е. когда:

$$\cos(\psi) = ((x_s - x_t)v_{xs} + ((y_s - y_t)v_{ys} + ((z_s - z_t)v_{zs}) / R_{sl} / V_s = 0,$$

где:

$$x_t = (a / AN + h_t) \cos(B_t) \cos(L_t)$$

$$y_t = (a / AN + h_t) \cos(B_t) \sin(L_t)$$

$$z_t = (a(1 - \alpha)^2 / AN + h_t) \sin(B_t)$$

$$AN = \sqrt{(\cos^2(B_t) + (1 - \alpha)^2 \sin^2(B_t))}$$

Постоянные  $a$  и  $\alpha$  означают соответственно значение большой полуоси и коэффициент сжатия Земли для выбранного земного эллипсоида.

Момент времени  $t_s$  и соответствующие гринвичские координаты КА находится методом Ньютона из системы уравнений:

$$\bar{y}_i(t_0) = \bar{y}_i(t_k) + h \sum_{j=k-n}^k f_{i,j} \psi_j \quad (j = 1, 2, \dots, 6),$$

где:

$\bar{y}_i = (x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$  - вектор положения и скорости КА в Гринвичской СК;

$f_{i,j}$  - правые части дифференциальных уравнений движения КА в j-точке;

$\psi_j(\xi)$  - функции, получаемые при интерполировании правых частей дифференциальных уравнений движения методом Лагранжа с последующим интегрированием по переменной  $\xi = (t_k - t_s) / h$ , где  $h$  - шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений,  $t_k$  - момент времени, на котором закончено численное интегрирование системы дифференциальных уравнений движения.

Зная соответствующие гринвичские координаты  $x_s, y_s, z_s, v_{xs}, v_{ys}, v_{zs}$  КА на момент времени  $t_s$ , определяется наклонная дальность  $R_{sl}$  до заданной точки на поверхности Земли. По  $R_{sl}$  и  $t_s$  определяются файловые (антенные) координаты (i, j) элемента исходного изображения, соответствующего заданной точке на поверхности Земли, где j – номер линии дальности элемента снимка, i – номер точки j-ой линии дальности.



## Моделирование движения КА

Представим потенциал притяжения реальной Земли через сумму:

$$U = W + R_T,$$

где:

$W$  - потенциал нормального гравитационного поля Земли;

$R_T$  - возмущающий потенциал.

Пусть  $R_L, R_S$  - означают возмущающие функции, обусловленные соответственно действием Луны и Солнца, а  $F_x, F_y, F_z$  - составляющие возмущающего ускорения, вызванного сопротивлением атмосферы, световым давлением и другими факторами. Тогда, если ввести промежуточный и возмущающий потенциалы, то уравнения движения спутника можно записать в виде:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial R}{\partial x} + F_x, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial R}{\partial y} + F_y, \\ \frac{d^2 z}{dt^2} - \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial R}{\partial z} + F_z, \end{cases}$$

где:

$$R = R_T + R_L + R_S.$$

Для близких КА функции  $R_L$  и  $R_S$  имеют примерно тот же порядок малости, что и функция  $R_T$ . Что касается  $F_x, F_y, F_z$ , то их величина зависит не только от высоты перигея орбиты, но и от массы и площади поперечного сечения спутника. Однако для большинства КА возмущения, вызываемые сопротивлением атмосферы и световым давлением, можно рассматривать как возмущения второго порядка относительно сжатия Земли.

Прогноз движения КА осуществляется численным интегрированием приведенных выше дифференциальных уравнений.



## Коррекция параметров орбиты

Коррекция параметров орбиты проводится в два этапа:

1. Коррекция вдоль орбиты;
2. Коррекция в радиальном и поперечном направлениях.

Коррекция вдоль орбиты производится итерационным методом. Коррекция в радиальном и поперечном направлении осуществляется методом дифференциального исправления орбит.

Для коррекции используются радиолокационный снимок в орбитальной системе координат и координаты наземных контрольных точек (НКТ), идентифицированных на снимке. Кроме того, для каждой точки снимка известны время съемки, наклонная дальность и положение спутника на момент съемки.

Необходимо скорректировать траекторию спутника таким образом, чтобы после геокодирования координаты идентифицированных на снимке точек были расположены максимально близко к положению НКТ.

### Уравнения коррекции положения КА вдоль орбиты

Коррекция вдоль орбиты состоит в определении оптимального смещения  $\Delta t$  времени съемки начала изображения, то есть фактически координаты спутника изменяются следующим образом (см. рисунок 2):

$$\begin{aligned}\vec{R}_s &= Q_R(t + \Delta t) \\ \vec{V}_s &= Q_V(t + \Delta t)\end{aligned}$$

где  $Q_R(t)$  и  $Q_V(t)$  – преобразования, реализующее моделирование орбиты;

Задача состоит в выборе наилучшего значения  $\Delta t$ , то есть такого, которое минимизирует модуль разности между векторами  $\vec{R}_{predicted\ is}$  (расчетное положение) и  $\vec{R}_{expected\ is}$  (истинное положение) (рис. 1), то есть  $\left| \vec{R}_{predicted\ is} - \vec{R}_{expected\ is} \right| \xrightarrow{\Delta t} \min$ .



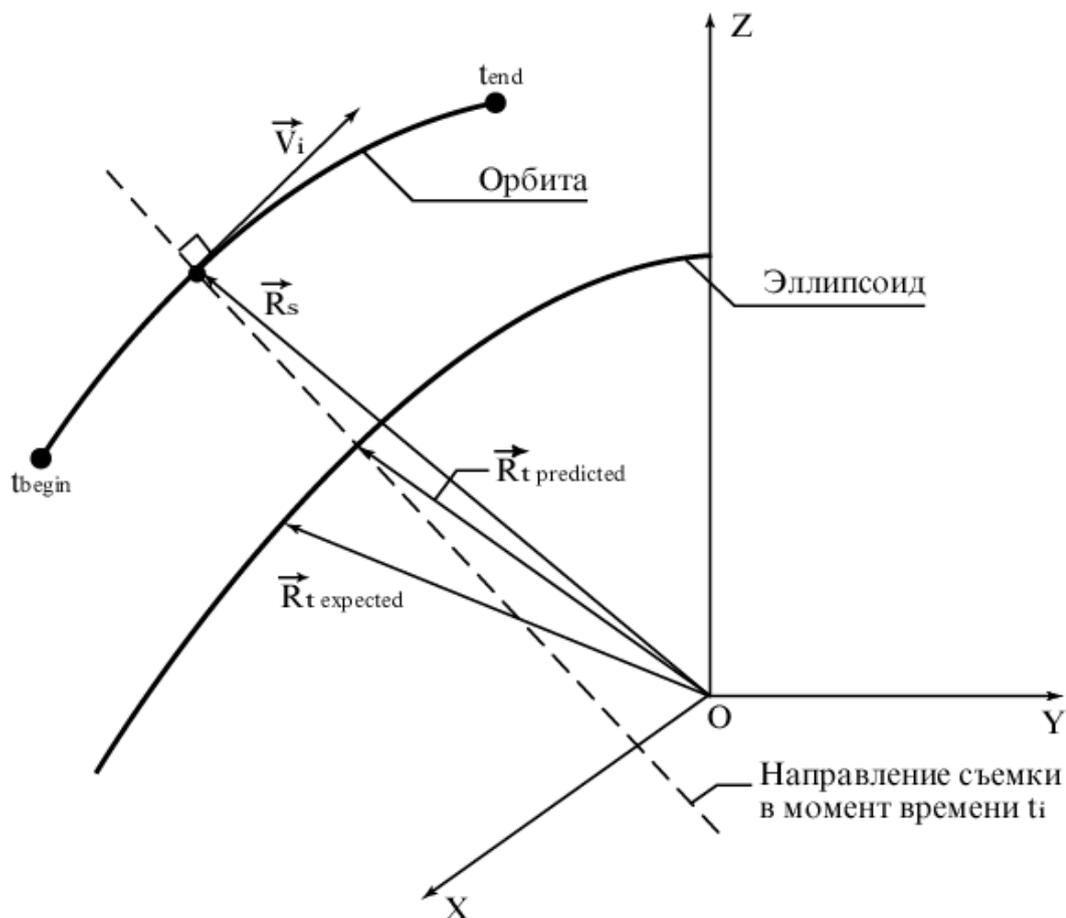


Рис. 2. Схема наблюдения земной поверхности РСА  
(рисунок выполнен в плоскости орбиты).

### Уравнения коррекции положения искусственного спутника Земли в поперечном и радиальном направлениях

Коррекция траектории спутника в поперечном ( $\delta\theta_s$ ) и радиальном ( $\delta R_s$ ) направлениях производится после того, как выполнена коррекция вдоль орбиты. Эта коррекция может производиться, если нам известны координаты и положения на снимке нескольких контрольных точек.

Для решения задачи используется цилиндрическую систему координат, ось  $Z$  которой проходит через центр Земли и в данный момент времени параллельна касательной к траектории. Таким образом, будем оперировать не реальными векторами, а проекциями векторов на плоскость, перпендикулярную касательной к траектории (см. рисунок 3).



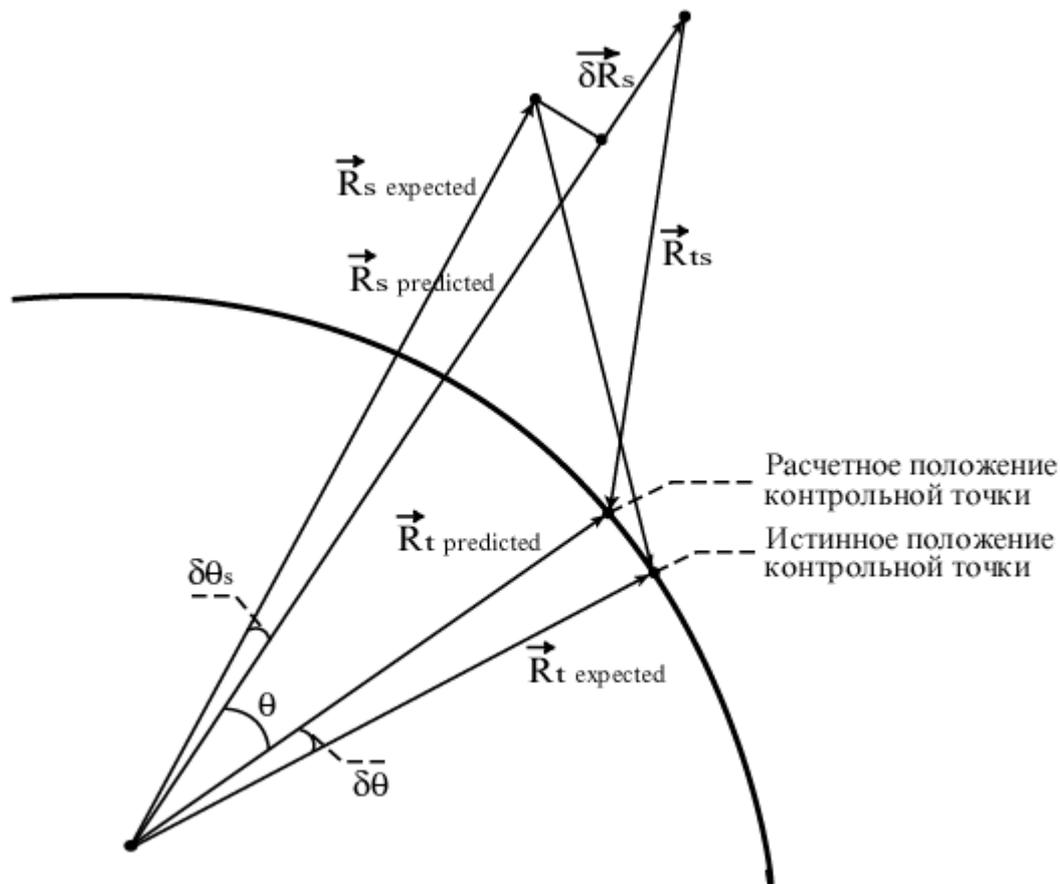


Рис. 3. Взаимное расположение спутника и контрольной точки в плоскости, перпендикулярной направлению движения спутника

Для определения ошибок расчета положения КА в поперечном и радиальном направлениях  $(\delta R_s, \delta\theta_s)$  для фиксированного момента времени используется следующая система уравнений:

$$\delta\theta_i = x_i \delta R_s + \delta\theta_s,$$

где:

$i$  – номер наземной контрольной точки;

$N$  – число наземных контрольных точек;

$$x_i = -\frac{R_s - R_t \cos \theta}{R_t R_s \sin \theta};$$

$R_s$  - модуль расчетного вектора положения КА;

$R_t$  - модуль вектора истинного положения наземной контрольной точки.

Если известно положение двух контрольных точек, то можно решить эту систему линейных уравнений и найти ошибки положения спутника в поперечном и радиальном направлениях. Если же мы знаем координаты более чем двух НКТ, то мы получим переопределенную систему. Решается такая система методом Наименьших квадратов.



## Описание используемых алгоритмов

Как уже было отмечено в разделе «Основные понятия и определения», в Процессоре геокодирования реализованы следующие виды преобразования радиолокационных снимков: геоференцирование, геокодирование и орторектификация. Ниже приведён перечень операций, используемых для реализации этих преобразований, а также операций, используемых при формировании масок для областей наложения и затенения на снимках.

### Геоференцирование

Геоференцирование снимков РСА требует решения задачи нахождения для каждого элемента раstra в антенной системе координат “время – наклонная дальность” координат в системе «время – наземная дальность». Для этого используется следующий алгоритм:

1. Для РЛИ определяется центральная линия съемки;
2. Рассчитываются параметры движения платформы на момент съемки центральной линии (строки дальности);
3. Для каждой точки выбранной линии методом прямого геокодирования вычисляются её геодезические координаты;
4. По известному положению платформы на момент съемки выбранной линии определяется наземная дальность до первой точки линии;
5. Зная наземную дальность до первой точки линии и геодезические координаты остальных точек, вычисляем наземную дальность до каждой точки;
6. Методом наименьших квадратов находим коэффициенты полинома пересчета наземной дальности каждой точки в наклонную.

Геометрическая трансформация снимка на новую сетку производится следующим образом. Сетка, задаваемая оператором, является равномерной и характеризуется межпиксельным расстоянием на земной поверхности по направлениям дальности и полета платформы. Для каждой линии нового кадра известно время съемки, так как трансформаций раstra в этом направлении не производится. Для каждой точки линии, характеризующейся наземной дальностью, производится пересчет наземной дальности в наклонную с использованием полиномиального преобразования. По наклонной дальности и времени определяется файловая координата точки на исходном снимке и рассчитывается яркость в данной точке путем интерполяции по значениям яркостей в соседних точках исходного изображения.

### Геокодирование и орторектификация

Геокодирование и орторектификация снимков требуют решения задачи нахождения для каждого элемента раstra его картографических координат и трансформацию раstra на новую сетку (задача прямого геокодирования). Однако, как уже было отмечено ранее, сетка на земной поверхности, узлы которой соответствуют элементам раstra, получается нерегулярная. Чтобы избежать этой проблемы, совместно с процедурой прямого геокодирования решается задача обратного геокодирования. При решении задачи орторектификации на этапе обратного геокодирования используется цифровая модель рельефа на заданный район. Кроме того, для повышения точности привязки при наличии набора наземных контрольных точек (НКТ) на данный участок местности целесообразно предварительно осуществить



коррекцию параметров орбитального движения. Таким образом, при обработке используется следующая последовательность операций:

1. Коррекция параметров орбитального движения КА в опорных точках орбиты (при наличии НКТ, не менее 2-х);
2. Расчет параметров движения платформы на заданный момент времени, соответствующий выбранной линии изображения;
3. Определение картографических координат углов изображения решением задачи прямого геокодирования;
4. Формирование прямоугольной наземной рамки для выбранной системы координат, лежащей внутри области, ограниченной наземными точками, соответствующими углам изображения;
5. Формирование регулярной наземной сетки в пределах полученной рамки. Шаги дискретизации сетки определяются пользователем. Таким образом, для каждого узла сетки определены картографические координаты.
6. По известным картографическим координатам определяются время съемки и наклонная дальность для каждого узла сетки. При этом в случае решения задачи геокодирования возвышение местности над эллипсоидом принимается равным нулю, при решении задачи орторектификации значение возвышения определяется по цифровой модели рельефа поверхности.
7. Полученные наклонная дальность и время определяют файловые координаты исходного изображения (как правило, не целые). Яркость полученного элемента выходного изображения определяется по значениям яркости соседних точек путем билинейной интерполяции.

### **Эффекты бокового обзора**

Радиолокационное изображение, получаемое по данным съемки космического РСА, формируется в антенной системе координат, в которой положение объекта задается моментом времени прихода отраженного от объекта сигнала и дальностью до него в этот момент времени. В процессе формирования радиолокационного снимка трехмерные объекты подстилающей поверхности преобразуются в их двумерные образы на изображении. Проецирование трехмерной подстилающей поверхности в плоскость геометрии снимка зачастую является неоднозначным, что обусловлено эффектами бокового обзора при наблюдении радиолокатором поверхности Земли.

Если различным точкам подстилающей поверхности соответствует одна и та же точка на радиолокационном снимке, то говорят, что возникает наложение (в англоязычной литературе – термин «layover»). Области рассеивающей поверхности, которые на снимке накладываются поверх других областей, называются областями активного наложения. Области рассеивающей поверхности, скрытые на снимке областями активного наложения, называются областями пассивного наложения. Геометрическое условие возникновения активного наложения в точке имеет следующий вид (рис. 1):

$$\alpha \geq \gamma$$

где  $\alpha$  – угол локального наклона подстилающей поверхности в угломестной плоскости относительно касательной к модели Земли в данной точке,  $\gamma$  – угол наблюдения (угол наклона луча антенны РСА относительно направления на надир).



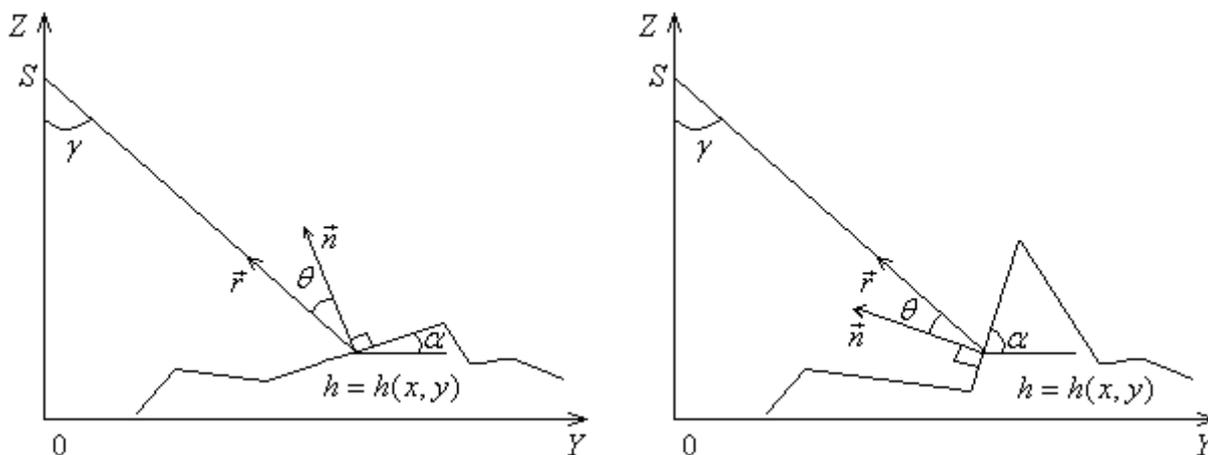


Рис. 1. Параметры, описывающие условие наложения. На рисунке слева наложение не формируется, справа – параметры обуславливают наложение.

На радиолокационном изображении области наложения обладают повышенной яркостью, поскольку представляют собой сигналы от участков поверхности, ориентированных почти перпендикулярно к направлению прихода ЭМ волн. Отклики от областей пассивного и активного наложения на снимке суммируются, а степень их видимости зависит от относительной яркости каждой из областей.

Наложение является принципиально неустранимым дефектом снимка РСА. В некоторых областях тематической обработки (например, интерферометрии) корректная интерпретация результатов является затруднительной без карты распределения наложений. При планировании радиолокационных съемок одним из критериев выбора параметров съемки может являться условие минимизации площади наложения.

При определенных условиях наклон рельефа и геометрию съемки одни участки подстилающей поверхности могут оказаться в радиолокационной тени других (в англоязычной литературе – термин «radar shadow»). Первые называются областями пассивной тени, а вторые – областями активной тени. Нахождение участка подстилающей поверхности в области радиолокационной тени означает, что на него зондирующий ЭМ сигнал не попадает. Геометрическое условие активной тени выглядит следующим образом (рис. 1):

$$\theta \geq \frac{\pi}{2},$$

здесь  $\theta$  – локальный угол падения радиолокационного сигнала в угломестной плоскости.

На радиолокационном изображении области тени характеризуются пониженным уровнем яркости, поскольку содержат не отраженный от поверхности радиолокационный сигнал, а лишь шумы обработки и приёмного тракта.

Радиолокационная тень является принципиально неустранимым дефектом радиолокационного снимка, проявление которого при дальнейшей обработке может служить источником ошибок. При планировании радиолокационных съемок условие минимизации площадей затенения может являться критерием выбора параметров съемки.



### Формирование маски наложений

Ниже описан алгоритм формирования карты наложения в географической системе координат по цифровой модели рельефа и параметрам геометрии съемки.

Пусть цифровая модель рельефа  $h(x, y)$  представлена в географической системе координат  $(X, Y)$ , а  $(R, T)$  – файловая система координат снимка (дальность – время). Тогда алгоритм имеет следующий вид.

В цикле по точкам ЦМР, попадающим в рамку снимка:

1. Для данной точки  $(x, y)$  ЦМР  $h(x, y)$  вычислить положение платформы на момент траверса точки методом обратного геокодирования. Определить файловые координаты точки  $(r_0, t_0)$  и угол наблюдения  $\gamma = \gamma(x, y)$  для точки.

2. Определить файловые координаты  $(r_x, t_x)$  для точки  $(x+1, y)$  и файловые координаты  $(r_y, t_y)$  для точки  $(x, y+1)$ .

3. Сформировать локальную матрицу перехода от системы координат снимка  $(R, T)$  к географической системе координат  $(X, Y)$ :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x - r_0 & r_y - r_0 \\ t_x - t_0 & t_y - t_0 \end{pmatrix}.$$

4. Обратить локальную матрицу перехода  $A$ :

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = A^{-1} = \frac{1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \begin{pmatrix} +a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & +a_{11} \end{pmatrix}.$$

5. Пересчитать орт дальности  $\vec{r}$ , имеющий в файловой системе координат представление  $\vec{r}_{(R,T)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ , в географическую систему координат:

$$\vec{r}_{(X,Y)} = B \cdot \vec{r}_{(R,T)} = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix} = \frac{1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \begin{pmatrix} +a_{22} \\ -a_{21} \end{pmatrix}.$$

6. Нормировать вектор  $\vec{r}_{(X,Y)}$ :

$$\vec{r}_0 = \frac{\vec{r}_{(X,Y)}}{|\vec{r}_{(X,Y)}|}, \quad |\vec{r}_{(X,Y)}| = \frac{\sqrt{a_{22}^2 + a_{21}^2}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}.$$

7. Вычислить градиент высоты  $\nabla h = \left( \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right)^T$  в точке  $(x, y)$  ЦМР  $h(x, y)$ .

8. Вычислить угол наклона  $\alpha$  рельефа  $h(x, y)$  по направлению  $\vec{r}_0$  в точке  $(x, y)$ :

$$\alpha = \arctan(k), \quad k = \frac{\partial h}{\partial \vec{r}_0} = \nabla h \cdot \vec{r}_0 = \frac{a_{22}}{\sqrt{a_{22}^2 + a_{21}^2}} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{a_{21}}{\sqrt{a_{22}^2 + a_{21}^2}} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}.$$



9. Определить угол падения  $\theta$  радиолокационного сигнала в точке  $(x, y)$ :

$$\theta(x, y) = \gamma(x, y) - \alpha(x, y),$$

и проверить условие наличия активного наложения в точке  $(x, y)$ :

$$-\frac{\pi}{2} < \theta \leq 0.$$

### Формирование маски затенений

Ниже описан алгоритм формирования карты радиолокационной тени в географической системе координат по цифровой модели рельефа и параметрам геометрии съемки.

1. На основании цифровой модели рельефа  $h(x, y)$ , параметров орбитального движения РСА и параметров геометрии съемки сформировать карту распределения локального угла наблюдения  $\gamma$ .

2. Сформировать карту распределения локального наклона рельефа  $\alpha$  в направлении обзора.

3. Применяя условие наличия активной радиолокационной тени в каждой точке  $(x, y)$ :

$$\theta \geq \frac{\pi}{2}$$

сформировать карту распределения активной радиолокационной тени.

4. В цикле по найденным источникам активной тени:

4.1. Определить локально направление обзора в окрестности источника.

4.2. Начиная с источника, следуя по направлению обзора, проверять для каждой точки достаточное условие пассивной тени пока это условие не будет нарушено. Достаточное условие наличия пассивной тени имеет следующий вид:

$$h < h_{SHADOW} - \frac{L}{\tan(\gamma)},$$

здесь  $h$  – высота проверяемой точки,  $h_{SHADOW}$  – высота точки-источника тени,  $L$  – расстояние по направлению обзора от источника до проверяемой точки.



### Примеры построения карт распределения наложения и тени

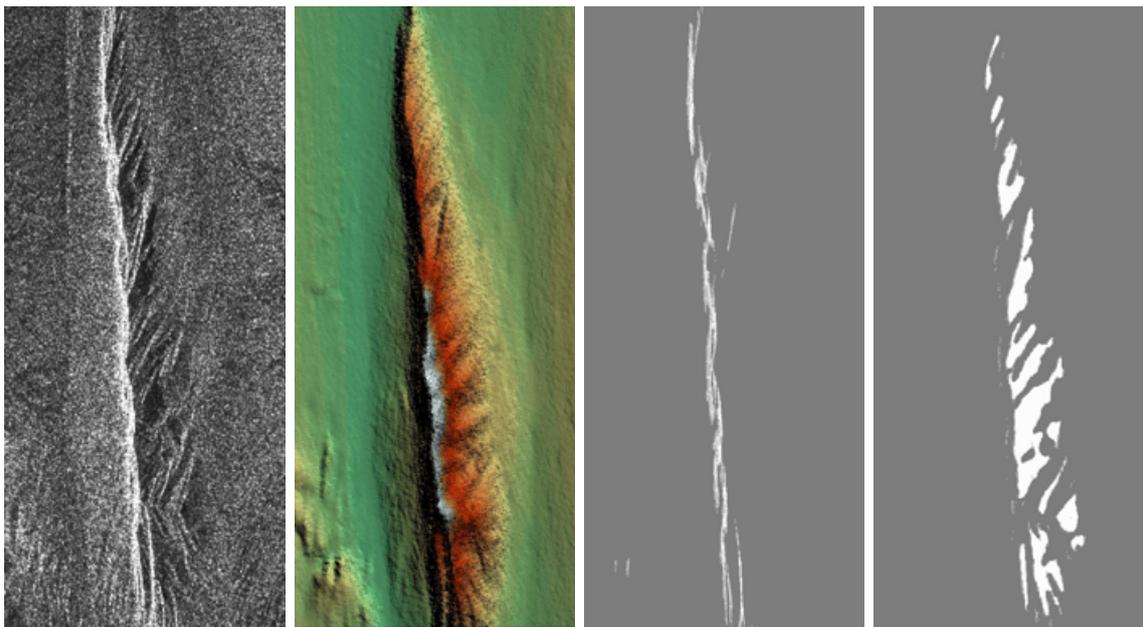


Рис.2. Пример построения карт наложения и тени по цифровой модели рельефа и параметрам геометрии обзора. Фрагмент снимка PCA Radarsat-1, тип продукта SLC, район Долина смерти, США. Слева направо: амплитуда радиолокационного снимка в проекции наклонной дальности, цифровая модель рельефа, карта распределения областей наложения, карта распределения областей радиолокационной тени.

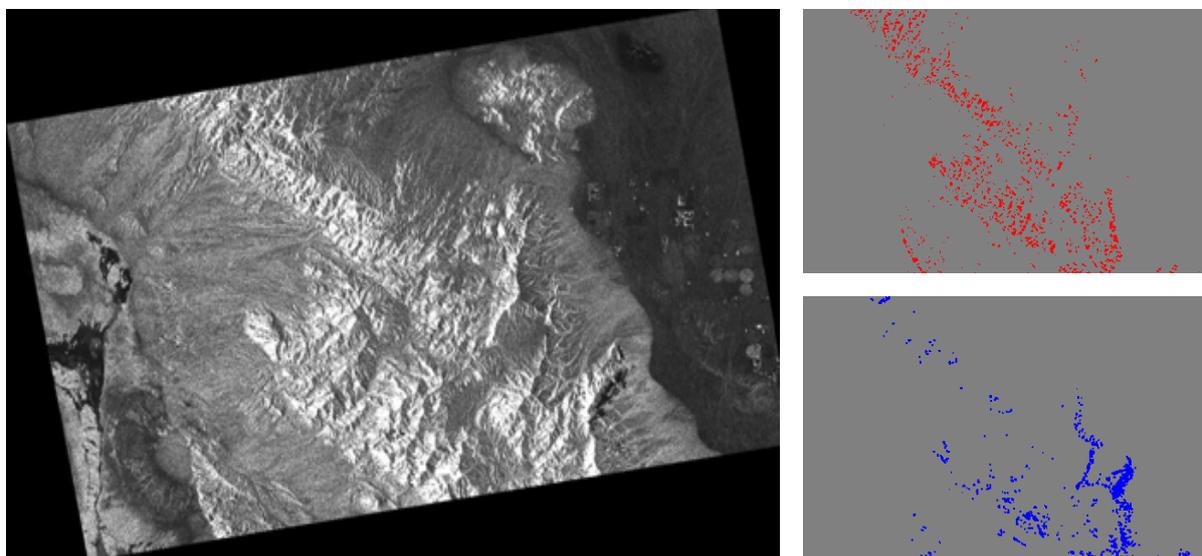


Рис.3. Пример построения карт наложения и тени по цифровой модели рельефа и параметрам геометрии обзора в географической системе координат. Фрагмент снимка PCA Radarsat-1, тип продукта SGF, район Долина смерти, США. Амплитуда орторектифицированного радиолокационного снимка в картографической проекции (слева), карта распределения областей наложения (справа сверху), карта распределения областей радиолокационной тени (справа внизу).

