

УДК: 629.783

## **Разработка модели основных параметров космического радиолокационного бистатического интерферометра**

**Занин К.А.**

*Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина,  
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия  
e-mail: ps4a@laspace.ru*

### **Аннотация**

В статье рассматриваются математическая модель базовых параметров бистатического космического интерферометра с двумя радиолокаторами синтезированной апертуры. Анализируется выбор основных параметров интерферометра с учетом требований к точности определения высоты рельефа. Оценивается влияние ошибок определения положения космических аппаратов в пространстве на ошибки измерения. В качестве примера проведен анализ требований к навигационно-баллистическому обеспечению на примере интерферометрического тандема космических аппаратов "Terrasar-X" и "Tandem-X".

**Ключевые слова:** космический радиолокатор синтезированной апертуры, цифровая модель рельефа местности, бистатический интерферометр, точность определения координат.

## Введение

Целью космической интерферометрической съемки является получение цифровой модели рельефа местности. В настоящее время в мире существует несколько коммерческих цифровых моделей рельефа местности (ЦМР). Наиболее полной по охвату и лучшей по точности является модель DLR полученная при помощи КА “Terrasar-X” - “Tandem-X” в бистатическом режиме работы радиолокатора [1]. Цифровая модель DLR имеет среднеквадратическое отклонение рельефа по абсолютной точности 5 м и относительной точности лучше 2 м.

Под бистатической (тандемной) интерферометрической съемкой понимается одновременная работа двух космических аппаратов. В этом режиме два радиолокатора с синтезированием апертуры образуют интерферометр, определяющий разность фаз сигналов, приходящих от земной поверхности. Совместная обработка двух радиолокационных изображений позволяет определить высоту рельефа местности. Диапазон углов ориентации базы интерферометра определяется исходя из наилучшей чувствительности к изменению высоты рельефа.

Определения высоты рельефа в бистатическом интерферометрическом режиме требует минимального количества априорной информации.

# 1. Анализ возможностей определения высоты рельефа местности радиолокатором синтезированной апертуры

Известно, что в сжатой по дальности цифровой радиолокационной информации содержится фаза, пропорциональная времени двойного прохождения электромагнитного сигнала и обратно. Таким образом, одиночный радиолокатор с синтезированием апертуры определяет модуль наклонной дальности  $R_H$  до каждого элемента разрешения (рисунок 1).

Измеренная наклонная дальность лежит в плоскости определяемой вектором путевой скорости и определяется уравнением:

$$\frac{2\mathbf{V}_{\text{ка}}\mathbf{R}_H(t_{\text{ц}})}{\lambda R_H(t_{\text{ц}})} = 0, \quad (1)$$

где  $t_{\text{ц}}$  - момент времени, когда радиальная проекция относительной скорости КА и элемента разрешения равна нулю,

$\lambda$  - длина волны сигнала,

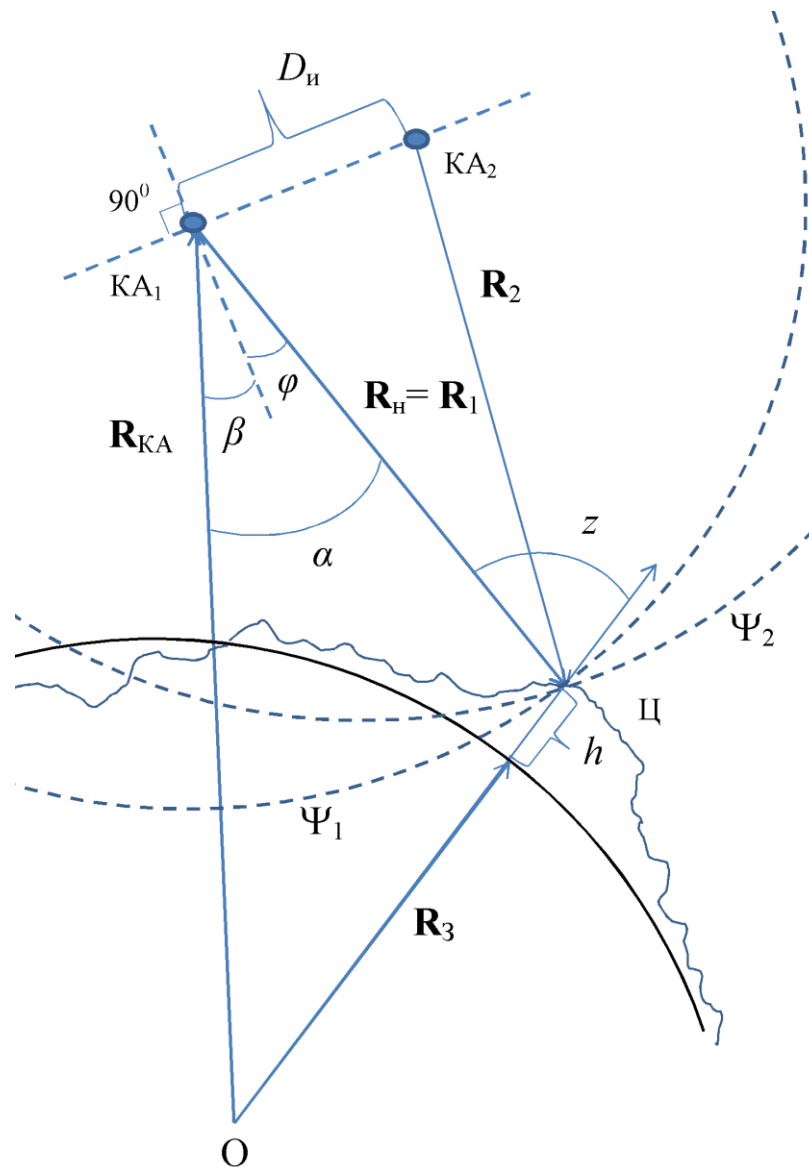
$\mathbf{V}_{\text{ка}}$  - вектор путевой скорости фазового центра РСА;

$\mathbf{R}_H$  - радиус вектор элемента изображения.

На первый взгляд, зная координаты фазового центра и полученную относительную дальность, удастся построить модель рельефа по данным одного РСА [3]. Однако, одному значению наклонной дальности соответствует множество точек на сферической поверхности волнового фронта  $S_1$ , образующую при пересечении с плоскостью (1) окружность  $\Psi_1$  с радиусом  $R_H$ :

$$R_H = |\mathbf{R}_{\text{ка}} - \mathbf{R}_{\text{ц}}|, \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_\Pi = (x_\Pi, y_\Pi, z_\Pi)^T$  - радиус вектор элемента разрешения.



- $\alpha$  – угол визирования объекта;
- $\beta$  – угол ориентации базы интерферометра;
- $\varphi$  – измеряемый интерферометром угол наклона волнового фронта;
- $z$  – зенитный угол КА;
- $\Psi_1, \Psi_2$  – волновой фронт сигнала КА №1, 2;

Рисунок 1 – Схема определения рельефа радиолокатором синтезированной апертуры.

Для решения задачи координатной привязки элементов разрешения РСА с известной наклонной дальностью зависимости (1) и (2) необходимо дополнить априорной информацией о форме наблюдаемой поверхности [4].

Система уравнений с учетом уравнения Земного эллипсоида и местной высоты позволяет определить геодезические координаты элемента разрешения:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_H = |\mathbf{R}_{Ka} - \mathbf{R}_Ц|, \\ \frac{2\mathbf{V}_{Ka} \mathbf{R}_H(t_Ц)}{\lambda R_H(t_Ц)} = 0, \\ \frac{x_Ц^2 + y_Ц^2}{(a_e + h)^2} + \frac{z_Ц^2}{(b_e + h)^2} = 1. \end{array} \right. , \quad (3)$$

где  $a_e = 6378,147$  м – большая полуось Земного эллипсоида,

$b_e = 6356,752$  м – малая полуось Земного эллипсоида,  $h$  – высота элемента разрешения над эллипсоидом.

На первый взгляд, определить высоту рельефа можно по наклонной дальности, измеренной в одном сеансе съемки одного КА. Однако, согласно (3), для этого необходимо знать геодезические координаты элемента разрешения, а для их вычисления по радиолокационному изображению (РЛИ) необходимы данные о рельефе. Ошибки знания высоты рельефа приводят к ошибкам координатной привязки элементов изображения.

В случае, если на РЛИ имеются опорные точки с известными, геодезическими координатами, например полученные оптико-электронной съемкой [5], измерения наклонной дальности РСА позволяют уточнить высоту. Однако решение задачи

привязки опорных точек к геодезической системе координат так же требует знания опорного рельефа местности. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Пусть известен вектор направления на элемент РЛИ из центра Земли:

$$\mathbf{r}_{\text{Ц}} = (\sin \lambda_{\text{Ц}}, \cos \lambda_{\text{Ц}}, \sin \varphi_{\text{Ц}}),$$

где  $\lambda_{\text{Ц}}$  – геодезическая широта,  $\varphi_{\text{Ц}}$  – геодезическая долгота.

Высота опорной точки вычисляется по измеренной радиолокационной дальности из уравнения:

$$|\mathbf{R}_{\text{ка}} - \mathbf{r}_{\text{Ц}} R_{\text{Ц}}| = R_{\text{н}},$$

где  $R_{\text{Ц}} = R_3 + h$  – радиус-вектор опорной точки,

$R_3$  – известный радиус от центра Земли до поверхности эллипсоида,

$h$  – превышение высоты опорной точки над земным эллипсоидом.

Таким образом, измерение высоты рельефа при помощи РСА в моностатическом режиме превращается в сложную итерационную задачу требующую знание априорной информации о рельефе с точностью соизмеримой с предполагаемым результатом.

Наиболее надежным способом получения информации о высоте рельефа является бистатический интерферометрический режим работы радиолокатора синтезированной апертуры (РСА), позволяющий сразу определить рельеф по разность фазы и дальностей из двух известных точек разнесенных в пространстве. Задача определения высоты рельефа заключается в измерении углов и сторон треугольника КА1-О-Ц (рисунок 1).

## 2. Математическая модель основных параметров космического интерферометра

Рассмотрим основные параметры бистатического интерферометрического режима [6]. Для лучшего понимания введем основные термины и определения:

### База интерферометра

Базой интерферометра (базовой линией) называется вектор определяемый разностью радиусов-векторов фазовых центров двух КА в инерциальной системе координат:

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}_{КА2} - \mathbf{R}_{КА1}.$$

Размер базы – модуль вектора  $\mathbf{B}$ :

$$D_{и} = |\mathbf{B}|.$$

### Угломерная плоскость

Угломерная плоскость образована векторами наклонной дальности  $\mathbf{R}_2$  и  $\mathbf{R}_1$  или тремя точками наблюдаемый объект-КА1- КА2 (рисунок 1).

Направление максимальной чувствительности интерферометра определяет вектор, лежащий в угломерной плоскости и ортогональный базе  $\mathbf{B}$ .

Разность фаз регистрируемых интерферометром образуемых двумя КА определяется разностью хода лучей (наклонной дальности) и длиной волны:

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda}(l_2 - l_1) = \frac{2\pi}{\lambda}(R_2 - R_1).$$

При условии, что первый КА активный излучает сигнал, а второй КА только принимает сигнал:

$$l_1 = 2R_1,$$

$$l_2 = R_1 + R_2,$$

где  $R_1, R_2$  - наклонные дальности.

Особенностью работы в бистатическом режиме со вторым КА работающим только на прием является зависимость фазы РЛИ от рельефа только для активного КА №1. Для КА №2 значение фазы принятого сигнала практически не зависит от высоты рельефа.

При увеличении рельефа увеличивается  $R_1$ , а  $R_2$  наоборот сокращается (4,5), так что при малых углах выполняется условие:

$$R_1 + R_2 \approx const,$$

$$2R_1 = f(h).$$

Этот факт объясняется тем, что в случае если за время съемки величина базы между КА изменяется незначительно, то путь сигнала КА №1- объект наблюдения- КА №2 так же не изменяется.

Таким образом, траекторный сигнал КА №2 содержит постоянную фазу. Ее величина изменяется в основном только от размера и наклона базы интерферометра. Фаза траекторного сигнала активного КА №1 содержит основную информацию о рельефе. Использование этого свойства позволяет проводить интерферометрические измерения с базой изменяющей свой наклон и размеры за время синтезирования изображения.

Космический интерферометр непосредственно измеряет разность фаз  $\Delta\psi$ , которой можно сопоставить некоторый угол  $\varphi$  наклона волнового фронта.



Предположим, что  $R_1 = R_H$  - наклонная дальность, тогда по теореме косинусов:

$$R_2 = \sqrt{R_H^2 + D_{И}^2 + 2R_H D_{И} \sin \varphi}. \quad (4)$$

Разность фазы сигналов определяется следующим выражением:

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{R_H^2 + D_{И}^2 + 2R_H D_{И} \sin \varphi} - R_H \right),$$

где  $\varphi$  – угол наклона волнового фронта.

Угол  $\varphi$  вычисляется при помощи следующего выражения:

$$\varphi = \arcsin \left( \frac{\lambda^2 \Delta\psi^2}{8\pi^2 R_H D_{И}} + \frac{\lambda \Delta\psi}{2\pi D_{И}} - \frac{D_{И}}{2R_H} \right) \approx \arcsin \frac{\lambda \Delta\psi}{2\pi D_{И}}.$$

Наклонная дальность определяется как задержка сигнала. Вычислив угол  $\varphi$  и зная угол ориентации базы интерферометра  $\beta$ , учитывая, что  $\alpha = \varphi + \beta$  можно определить высоту рельефа по теореме косинусов (рисунок 1):

$$h = \sqrt{R_H^2 + R_{ка}^2 - 2R_H R_{ка} \cos(\beta + \varphi)} - R_3.$$

Рассмотрим более подробно оценку ошибки измерения высоты рельефа.

В линейном приближении погрешность определения рельефа  $\sigma_h$  можно определить через коэффициенты чувствительности, при помощи частных производных:

$$\sigma_h \approx \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial \varphi}\right)^2 \sigma_\varphi^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial R_H}\right)^2 \sigma_{R_H}^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial R_{ка}}\right)^2 \sigma_{R_{ка}}^2}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что ошибка измерения рельефа не может быть намного лучше (с учетом статистической обработки), чем ошибка измерения наклонной дальности. Поэтому ошибка измерения угла места и радиуса-вектора КА должны быть выбраны исходя из требований к точности построения модели рельефа и ограничения на ошибку измерения наклонной дальности. Параметры, входящие в выражение (5) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные ошибки при измерении высоты рельефа

Параметр	Наименование
$\sigma_\varphi$	ошибка измерения угла волнового фронта, радианы
$\sigma_\beta$	ошибка знания угла ориентации базы, радианы
$\sigma_{R_H}$	ошибка измерения наклонной дальности, м
$\sigma_{R_{ка}}$	ошибка знания радиуса вектора КА в инерциальной системе координат, м
$\sigma_{D_{и}}$	ошибка знания базы интерферометра, м

Воспользовавшись выражением (4) и учитывая, что  $h \ll R_3$ ,  $\frac{R_3 + h}{R_3} \approx 1$  и

$\alpha = \beta + \varphi$ , найдем выражения для частных производных:

$$\frac{\partial h}{\partial \varphi} \approx \frac{\partial h}{\partial \beta} \approx \frac{R_H R_{\text{ка}}}{R_3} \sin \alpha,$$

$$\frac{\partial h}{\partial R_{\text{ка}}} \approx \frac{\partial h}{\partial R_H} \approx \frac{R_{\text{ка}} - R_H}{R_3} \cos \alpha.$$

Ошибка измерения  $\sigma_{R_H}$  определяется основной характеристикой РСА – разрешающей способностью по наклонной дальности:

$$\sigma_{R_H} = \frac{c}{2\Delta F},$$

где  $\Delta F$  – ширина полосы зондирующего сигнала МГц,  $c$  – скорость света.

Ошибка измерения угла  $\sigma_\varphi$  зависит от размера базы, ошибки измерения фазы  $\sigma_\psi$ , ошибки знания длины волны излучения  $\sigma_\lambda$  и точности знания размера базы  $\sigma_{D_{\text{и}}}$ :

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \psi}\right)^2 \sigma_\psi^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}\right)^2 \sigma_\lambda^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial D_{\text{и}}}\right)^2 \sigma_{D_{\text{и}}}^2}.$$

Ошибка знания длины волны можно пренебречь и исходя из равенства вкладов двух оставшихся составляющих ошибок:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \psi}\right)^2 \sigma_\psi^2 = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial D_{\text{и}}}\right)^2 \sigma_{D_{\text{и}}}^2,$$

получим, что:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial \psi} \sigma_{\psi} = \frac{\sqrt{2}\lambda}{2\pi D_{\text{и}} \cos \varphi} \sigma_{\psi} . \quad (6)$$

Таблица 2 – Оценка основных параметров измерения высоты рельефа для КА типа ”TerraSAR-X” и ”TanDEM-X”

Параметр	Наименование	Значение
$H_{\text{ка}}$	Высота полета КА, км	500
$R_{\text{н}}$	Наклонная дальность, км	от 500 до 1000
$\Delta F$	Ширина полосы зондирующего сигнала, МГц	300
$\sigma_{R_{\text{н}}}$	Ошибка измерения наклонной дальности, м	0,5
$\sigma_{R_{\text{ка}}}$	Ошибка знания радиуса вектора КА в инерциальной системе координат, м	2,0
$\sigma_{\varphi}$	Ошибка измерения угла волнового фронта, угловые секунды	0,3
$\sigma_{\beta}$	Ошибка знания угла ориентации базы, угловые секунды	0,3
$\sigma_h$	Ошибка измерения высоты для $\alpha = 20^{\circ} \dots 60^{\circ}$ , м	2,0

В результате требование к минимальному размеру базы определяются выражением:

$$D_{\text{и}} \geq \sqrt{2} \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sigma_{\psi}}{\sigma_{\varphi} \cos \varphi},$$

где  $\sigma_\psi$  - ошибка измерения фазы.

Заметим, что ошибка измерения фазы является проектным параметром РСА. Она определяется конструктивными особенностями и стабильностью сверхвысокочастотного тракта РСА [7,8].

Связь размера базы  $D_{\text{и}}$  с интервалом фазовой неоднозначности рассмотрена в работе [6]. Однако, в связи с тем, что точность измерения фазы можно считать конструктивным параметром РСА [8], требования к точности определения высоты заданы, размер базы и интервал фазовой неоднозначности становится инвариантными параметрами:

$$\Delta H = \sigma_h \frac{2\pi}{\sigma_\psi}, \quad (7)$$

$\sigma_h$  - ошибка измерения высоты в ЦМР ,

$\sigma_\psi$  - ошибка измерения фаз в тракте РСА.

На первый взгляд точность измерения фазы может быть не очень высокой, что компенсируется пропорциональным увеличением базы интерферометра. Увеличение базы приводит к уменьшению диапазона однозначности по фазе, что усложняет требования к обработке интерферограммы или делает ее невозможной.

То есть, что бы не меняя точность измерения высоты увеличить интервал  $\Delta H$  необходимо улучшить точность измерения фазы в РСА. Одновременно, согласно (7) уменьшится и размер требуемой базы интерферометра.

На первом этапе были определены требуемые точности измерения углов при помощи интерферометра и абсолютные требования к знанию положения КА. На

втором этапе, исходя из этих требований, необходимо оценить параметры интерферометра – размер базы, требования к точности определения фазы [9] и размера базы для различных дальностей.

При наблюдении с КА типа "Terrasar-X"- "TanDEM-X" [10-15] величина базы, выбирается в районе от 300 до 1000 м, а наклонная дальность наблюдения до 1000000 м. В связи с тем, что КА<sub>2</sub> движется относительно КА<sub>1</sub>, размер базы и угол визирования объекта и наклон падающего волнового фронта постоянно меняется. Предположим, что интерферометр должен обеспечивать требуемую точность измерения рельефа в диапазоне углов  $\varphi = \pm 60^0$ .

Оценка длины базы интерферометра для углов  $\varphi = \pm 60^0$  приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка длины базы интерферометра "TerraSAR-X" и "Tandem-X" для различных углов наклона волнового фронта

Параметр	Наименование		Значение
$\lambda$	Длина волны, м		0,03
$\sigma_\varphi$	Ошибка измерения угла наклона волнового фронта, угловые секунды (на дальности 1000 км)		0,3
$\sigma_\psi$	Ошибка измерения фазы, градусы		3
$D_{и}$	Длина базы интерферометра, м	$\varphi = 0^0$	250
		$\varphi = 60^0$	500

$\Delta H$	Интервал фазовой однозначности, м	290
------------	-----------------------------------	-----

### 3. Оценка требований к ошибке измерения размера базы интерферометра

В случае наличия фазовой синхронизации двух детекторов при помощи межспутниковой радиолинии [10,11], высокой точности знания абсолютного размера базы не требуется. Ошибку измерения рельефа в основном определяет ошибка измерения ориентации базы в пространстве (6).

Воспользовавшись выражением (5) и (6) , получим выражение для ошибки измерения длины базы интерферометра:

$$\sigma_{D_{\text{и}}} = \frac{\partial D_{\text{и}}}{\partial \varphi} \sigma_{\varphi} = \sqrt{2} R_{\text{н}} \sigma_{\varphi} \cos \varphi.$$

Результаты оценки требований к ошибке измерения длинны базы для высоты орбиты 500 км и углов наблюдения  $\alpha = 20^0 \dots 60^0$  приведены в таблице 4.



Таблица 4 – Оценка требований к ошибкам измерения длинны базы интерферометра типа ”TerraSAR-X” и ”Tandem-X”

Параметр	Наименование	Значение	
$\sigma_{\varphi}$	Ошибка измерения угла волнового фронта, угловые секунды	0,3	
$\sigma_{\psi}$	Ошибка измерения фазы в тракте РСА, угловые градусы	3	
$\alpha$	Угол визирования, градусы	$\alpha = 20^0$	$\alpha = 60^0$
$R_H$	Наклонная дальность, км	250	500
$\sigma_{D_{и}}$	Ошибка измерения длинны базы интерферометра, м	1,1	1,0

### Заключение

Функционирование двух РСА позволяет создать интерферометр с требуемой точностью измерения фазы. Знанием положения КА и наличие измерений фазы в каналах дальностей РСА позволяет решить задачу определения высоты рельефа. Решение этой задачи предъявляет высокие требования к навигационному обеспечению КА. Предлагается методика определения базовых параметров интерферометра и ограничений навигационных ошибок исходя из требований к ошибкам измерения рельефа.

Приведен пример оценки требований к точности на примере КА типа ”TerraSAR-X” и ”Tandem-X” [13], наклонная дальность наблюдения указанных КА

[15-20] меняется в пределах от 500 до 1000 км. Для обеспечения ошибки измерения высоты рельефа с СКО 2 м на максимальной дальности 1000 км требуется измерять угол прихода волнового фронта на интерферометр с точностью не хуже 0,3 угловой секунды. Знать положение КА в инерциальном пространстве требуется с точностью не хуже 2 м. Эти требования соответствуют значению ошибки измерения фазы в РСА с точностью не более 6 градусов и размеру базы интерферометра от 500 до 1000 м (в зависимости от угла наблюдения  $\alpha = 20^0 \dots 60^0$ ).

Наиболее трудновыполнимым требованием является обеспечение ошибки знания ориентации интерферометрической базы с точностью не хуже 0,3 угловых секунды. В линейной мере это составляет ошибку знания взаимного относительного положения КА не хуже 1 мм на дальности 1000 м.

Абсолютные значения точности определения координат реализуются при помощи имеющихся средств ГЛОНАСС или GPS. Например, для КА "TerraSAR-X" и "Tandem-X" реализованная точность измерения взаимного положения составляет от 3 мм до 1 мм, в зависимости от качества наземной обработки сигналов GPS.

### **Библиографический список**

1. Frey O., Meier E., Nüesch D., Roth A. Geometric Error Budget Analysis for TerraSAR-X // Processing of the EUSAR 2004 Conference, Ulm, 2004, Germany, available at:

<https://pdfs.semanticscholar.org/940e/0bf72a48c14632a331e02d901a60bb56a344.pdf>

2. Занин К.А., Митькин А.С., Москатиньев И.В. Методические основы моделирования информационного тракта космического радиолокатора синтезированной апертуры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2 (32), С. 61 - 68.
3. Евграфов А.Е., Поль В.Г., Шостак С.В. К вопросу определения высот рельефа по технологии РСА в моностатическом некогерентном режиме // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2018. № 1. С. 19 - 26.
4. Бачманов М.М., Исков Д.А. Решение задачи оценивания детальности радиолокационного изображения объектов расположенных на земной поверхности // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 2 (95). С. 117 - 125.
5. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Геча В.Я., Жилинев М.Ю., Казанцев С.Г. Основные источники снижения качества изображения Земли, получаемых при орбитальной оптической съемке с борта МКА // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 160. № 5 С. 3 - 19.
6. Keydel W. Normal and Differential SAR Interferometry. In Radar Polarimetry and Interferometry // Educational Notes RTO-EN-SET-081bis, 2007 Paper 2. Neuilly-sur-Seine, France, RTO, available at: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>
7. Евграфов А.Е., Поль В.Г. К вопросу космической интерферометрической съемки рельефа земной поверхности радиолокатором синтезированной апертуры// Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 4. С. 44 - 49.
8. Булыгин М.Л. Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических радиолокаторах синтезирования

- апертуры на базе активных фазированных решеток // Труды МАИ. 2018. №100.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93428>
9. Оводенко В.Б., Трёкин В.В. Исследование эффективности компенсации влияния среды на работу радиолокационной станции // Труды МАИ. 2016. № 88.  
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70690>
10. Younis M., Metzsig R., Krieger G. Performance prediction of a phase synchronization link for bistatic SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, vol. 3, no. 3, pp. 429 - 433.
11. Jia Tu, Defeng Gu, Yi Wu, and Dongyun Yi. Error Modeling and Analysis for InSAR Spatial Baseline Determination of Satellite Formation Flying. Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2012, Article ID 140301, 23 p.
12. Pettinato S., Santi E., Paloscia S., Pampaloni P., Fontanelli G. The Intercomparison of X-Band SAR Images from COSMO-SkyMed and TerraSAR-X Satellites: Case Studies // Remote Sensing, 2013, vol. 5 no. 6, pp. 2928 - 2942, available at: <https://doi.org/10.3390/rs5062928>
13. Fritz T., Eineder M. TerraSAR-X Ground Segment. Basic Product Specification Document, DLR, 2010, available at: [http://www.infoterra.de/asset/cms/file/tx-gs-dd-3302\\_basic-product-specification-document\\_v1.7.pdf](http://www.infoterra.de/asset/cms/file/tx-gs-dd-3302_basic-product-specification-document_v1.7.pdf)
14. Krieger G., Fiedler H., Mittermayer J., Papathanassiou K., Moreira A. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry // IEE Proc.-Radar Sonar Navigation, June 2003, vol. 150, no. 3, doi: 10.1049/ip-rsn:20030441

15. Carlos L.M. Speckle noise characterization and filtering in polarimetric SAR data// ESA Advanced Course on Radar Polarimetry, 2011, available at: [https://earth.esa.int/documents/10174/669756/Speckle\\_Noise\\_Characterisation.pdf](https://earth.esa.int/documents/10174/669756/Speckle_Noise_Characterisation.pdf)
16. Luo H.B., He X.F., He M. Analyzing on pixel positioning accuracy of SAR imaging based on R-D location model // BEIJING ISPRS, 2008, available at: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/43.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/43.pdf)
17. Carrara W.G, Goodman R.S., Majewski R.M. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Signal Processing Algorithms. Artech House, Norwood, MA, 1995, 554 p.
18. Cumming I.G., Wong F.H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation. Artech House, Norwood, MA, 2005, 625 p.
19. Curlander J., McDonough R. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. John Wiley & Sons, New York, 1991, 333 p.
20. D'Aria D., Guarnieri A.M., Rocca F. Focusing Bistatic Synthetic Aperture Radar using Dip Move Out // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, vol. 42, no. 7, pp. 1362 - 1376.