

УДК 621.396.96

В.К. ВОЛОСЮК, А.В. ЕРЕМЕЕВ, М.В. ТОКАРЕВ

Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Україна

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАТОРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ С ФАЗОВЫМ ПЕЛЕНГОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ЕЁ РЕЛЬЕФА

Решена задача оптимальной обработки сигналов в интерферометрических радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА) для функционально-детерминированной модели сигнала (сигнала с полностью известными параметрами) в рамках метода максимального правдоподобия. Рассматриваемая задача относится к классу задач оптимизации. В результате решения задачи был получен алгоритм, предполагающий формирование суммарного и разностного сигналов. Произведён расчёт предельной погрешности оценки фазы, определяющей потенциальную точность пеленгации элементов рельефа. Получены алгоритмы оптимальной оценки фаз и пеленгов элементов рельефа, взаимодействующих с импульсным объёмом зондирующих импульсов. Определены потенциальные точности погрешности оценок.

**Ключевые слова:** интерферометрические РСА, восстановление высоты рельефа, оптимальные оценки.

### Введение

Снимки высокого разрешения, получаемые с космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) заняли свою нишу, и уже существует целый ряд приложений, использующих в качестве данных дистанционного зондирования (ДЗ) радиолокационные снимки. Космическая радиолокационная информация может быть использована для геологических исследований (составление геологических карт районов, перспективных для добычи полезных ископаемых), изучения процессов в приповерхностном слое океанов, в целях картографирования. Последнее приложение весьма интенсивно развивается в настоящее время.

Основные методы радиолокационного картографирования рельефа поверхности базируются либо на классических принципах стереоскопической съёмки, такой же, как и в фотограмметрии [1, 2], либо на реализации формулы [3, 4]

$$h(\vec{r}) = H - D(\vec{r}) \cdot \cos \theta(\vec{r}), \quad \vec{r} = \|x, y\|, \quad (1)$$

где  $H$  – средняя высота полёта летательного аппарата (ЛА), определённая или барометрическим высоотомером, или радиолокационным, с последующим усреднением;  $D(\vec{r})$  – дальность до элемента поверхности с координатами  $\vec{r}$ , расположенного на высоте  $h(\vec{r})$ ;  $\theta(\vec{r})$  – угол, характеризующий направление на этот элемент рельефа (пеленг).

Возможны два метода реализации этой формулы: 1) измерение дальности до элементов рельефа на заданном множестве направлений  $\theta_i = \text{const}$

(рис. 1); 2) пеленгация (определение углов  $\theta$ ) до элементов рельефа, расположенных на множестве заданных дальностей (рис. 2).

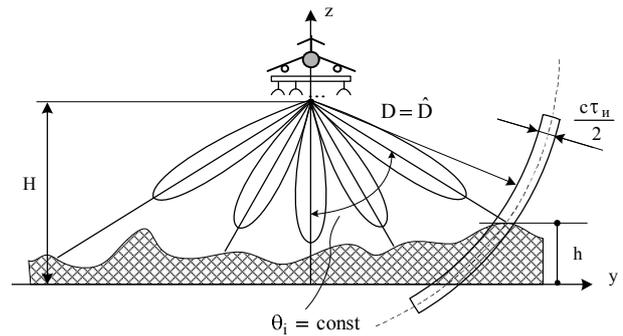


Рис. 1. Картографирование высоты с оценкой дальности  $\hat{D}$  при заданном угле  $\theta_i$

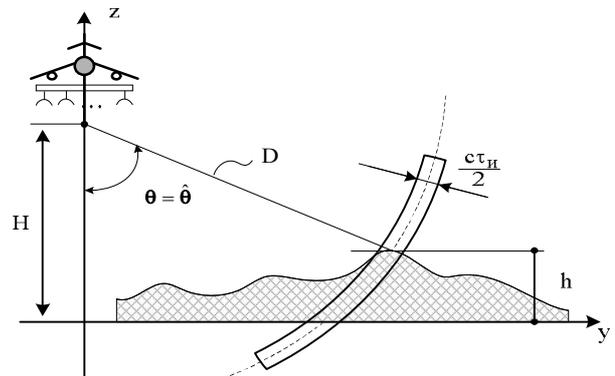


Рис. 2. Картографирование высоты с оценкой угла  $\hat{\theta}$  при заданной дальности  $D$

Для реализации первого метода необходимо формирование некоторого множества отдельных

(парциальных) диаграмм направленностей лучей в направлениях, покрывающих заданный сектор обзора, с последующим измерением дальности  $D = \hat{D}$  ( $\hat{D}$  – оценка (результат измерения) дальности  $D$ ) до поверхности вдоль каждого луча. При реализации второго метода задаются дальности до элементов рельефа путём фиксации времен задержки  $t_{\zeta} = 2D/c$  сигналов (задаются простой фиксацией временных промежутков, отсчитываемых от моментов измерения зондирующих импульсов) с последующей пеленгацией (определением углов  $\theta$ ) участков рельефа, длиной  $\tau_{и}c/2$ , где  $\tau_{и}$  – длительность импульса, взаимодействующих с зондирующим импульсом, движущимся вдоль поверхности со скоростью распространения электромагнитных волн (скоростью света  $c$ ).

Недостатком первого метода является то, что каждый луч имеет определённую ширину и отражённые сигналы приходят не от одного элемента рельефа, а от множества элементов, расположенных в пределах ширины луча на различных дальностях.

Второй метод более предпочтителен с точки зрения обеспечения более высокой точности оценок высоты  $h(\vec{r})$ .

Для реализации обоих методов желательно использование антенных решёток. Для реализации второго метода в пространственном случае достаточно наличия двух антенн, разнесённых на некотором расстоянии  $d$  либо в вертикальной, либо в горизонтальной плоскости. Совокупность таких двух антенн образует интерферометр.

Для повышения разрешающей способности картографирования, применяют интерферометры, состоящие из двух вдольфюзеляжных антенн, разнесённых по вертикали (рис. 3), или по горизонтали с последующим применением операции когерентного накопления сигналов в радарх с синтезированной апертурой (РСА).

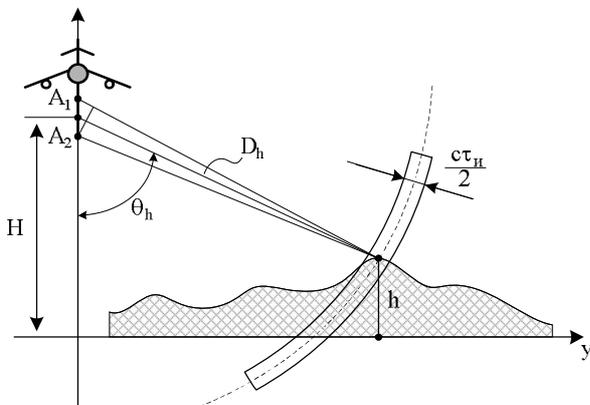


Рис. 3. Случай использования интерферометра, состоящего из двух вертикально-разнесённых вдольфюзеляжных антенн

Картографирование рельефа поверхности с помощью интерферометрических РСА является одним из наиболее бурно развивающихся направлений в области исследования Земли и других планет аэрокосмическими средствами дистанционного зондирования. Следует отметить, что интерферометр РСА может быть расположен как на одном носителе, так и на нескольких, например, на спутниках, имеющих параллельные орбиты [5].

В интерферометрических системах обычно применяют фазовый метод пеленгации элементов рельефа. Однако диапазон изменения углов  $\theta$  при перемещении вдоль поверхности участка взаимодействия с зондирующим импульсом является достаточно большим, что приводит к неоднозначности измерения фазы и необходимости дальнейшего использования её развёртки. Применяемые методы обработки в таких системах в значительной мере являются эвристическими и требуют их совершенствования. Одним из путей такого совершенствования является постановка задачи поиска оптимальных решений и их исследование, что и является целью состоящей работы.

### Постановка задачи

Считаем, что вдольфюзеляжные антенны интерферометрической РСА расположены в вертикальной плоскости и обе работают на передачу (излучение) и на приём, рис. 3. Излучаемый сигнал запишем в виде:

$$s_{\text{изл}} = \text{Re}(\dot{B}) \cdot e^{j\omega_0 t}, \quad (2)$$

где  $\text{Re}(\dot{B})$  – действительная часть комплексной огибающей  $\dot{B}$ , моделирующей в общем виде широкий класс сигналов, как непрерывных, так и импульсных. Полагаем в дальнейшем, что это импульсные сигналы, которые могут быть как простыми, так и иметь сложную внутриимпульсную структуру.

Ширина зондирующих импульсов или их функция неопределённости (Вудворта) по дальности полагается достаточно малой, чтобы обеспечить высокую разрешающую способность. С точностью до неизвестного комплексного множителя  $\dot{\alpha}$ , учитывающего затухание на трассе распространения, неизвестный коэффициент рассеяния  $\dot{\epsilon}$  элемента рельефа и фазовый набег до фазового центра интерферометра  $2kR_0$ , расположенного посередине между антеннами, принятый сигнал на выходах антенн 1 и 2 можно записать так:

$$s_{1,2}(t, t_{31,2}) = \text{Re} \dot{\epsilon} \frac{B(t - t_{31,2})}{R_0^2} e^{j\omega_0(t - t_{31,2})}, \quad (3)$$

где  $t_{31,2} = 2(R_0 \pm d \cdot \cos \theta / 2) / c$ ;

$$\text{или } s_{1,2}(t, \dot{\alpha}, \varphi) = \text{Re } \dot{\alpha} \cdot \dot{S}(t) \cdot e^{j\omega_0(t \pm \varphi)}, \quad (4)$$

$$\text{где } \dot{\alpha} = \left( \dot{\epsilon} / R_0^2 \right) \cdot e^{-2kR_0}, \quad \varphi = k \cdot d \cdot \cos \theta, \quad k = \frac{\omega_0}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Речь идёт о сигнале, сформированном отражениями от элемента рельефа в пределах импульсного объёма длиной  $\tau_{\epsilon} c / 2$ . В огибающей  $B(t - t_{3,2})$  учтено лишь запаздывание  $t_{\epsilon 0} = 2R_0 / c$ . Запаздыванием огибающей на краях базы интерферометрической антенны здесь пренебрегаем.

Простейшее уравнение наблюдения, называемое в литературе [6] уравнением наблюдения для сигнала с полностью известными параметрами, будет иметь такой вид:

$$\vec{u}(t) = \vec{s}(t, \vec{\lambda}) + \vec{n}(t), \quad \vec{n} = \|\mathbf{n}_1(t), \mathbf{n}_2(t)\|. \quad (5)$$

$$\vec{s}(t, \vec{\lambda}) = \|\mathbf{s}_1(t, \vec{\lambda}), \mathbf{s}_2(t, \vec{\lambda})\|, \quad \vec{\lambda} = \|\dot{\alpha}, \varphi\|,$$

Помеха  $\mathbf{n}_1(t)$  и  $\mathbf{n}_2(t)$  в каждом канале приёма на выходе антенны независимы между собой. Полагаем их белыми гауссовскими шумами с корреляционными функциями

$$R_{\mathbf{n}_1}(t_1, t_2) = R_{\mathbf{n}_2}(t_1, t_2) = N_0 \cdot \delta(t_1 - t_2) / 2.$$

В данной постановке задачи имеют место три неизвестных параметра  $\alpha_1, \alpha_2$  ( $\dot{\alpha} = \alpha_1 + j\alpha_2$ ) и  $\varphi$ . Оценив параметр  $\varphi$  затем можно найти и пеленг  $\theta$  в соответствии с выражениями (4). Параметры  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  здесь не представляют интереса и участвуют лишь как неизвестные в системе уравнений наблюдений.

Оптимальное решение находим в рамках метода максимума функции правдоподобия:

$$\begin{aligned} P(\vec{u}(t) | \vec{\lambda}) &= P(\vec{u}_1(t) | \vec{\lambda}) \cdot P(\vec{u}_2(t) | \vec{\lambda}) = \\ &= k \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \sum_{k=1}^2 \int [u_k(t) - s_k(t, \vec{\lambda})]^2 dt \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$t \in (0, T), \quad \vec{\lambda}^T = \|\alpha_1, \alpha_2, \varphi\|, \quad N_{01} = N_{02} = N_0, \quad k = 1, 2.$$

### Решение оптимизационной задачи

Представим сигналы (4) в таком виде

$$\begin{aligned} \dot{s}_{1,2}(t, \vec{\lambda}) &= \dot{s}_{1,2}(t, \dot{\alpha}, \varphi) = \text{Re } \dot{\alpha} \cdot e^{\pm j\varphi} \cdot \dot{S}_0(t) = \\ &= \text{Re } \dot{A}_{1,2}(\vec{\lambda}) \cdot \dot{S}_0(t), \quad (7) \end{aligned}$$

$$\text{где } \dot{S}_0(t) = \dot{S}(t) \cdot e^{j\omega_0 t}. \quad (8)$$

Тогда функционал правдоподобия (6) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} P(\vec{u}(t) | \vec{\lambda}) &= k \cdot \exp \left\{ \sum_{k=1}^2 \left[ \text{Re } \dot{Q}_k(\vec{\lambda}) - \mu_k(\vec{\lambda}) \right] \right\} = \\ &= k \cdot \exp \left\{ \sum_{k=1}^2 \text{Re} \left[ \dot{A}_k(\vec{\lambda}) \cdot Q_{0k} - \left| \dot{A}_k(\vec{\lambda}) \right|^2 \cdot \mu_0 \right] \right\}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\text{где } \dot{Q}_k(\vec{\lambda}) = \frac{2}{N_0} \int_0^T u_k(t) \cdot \dot{S}_k(t, \vec{\lambda}) dt = \dot{A}_k(\vec{\lambda}) \cdot Q_{0k}, \quad (10)$$

$$\mu_k(\vec{\lambda}) = \frac{1}{N_0} \int_0^T \text{Re } \dot{S}_k(t, \vec{\lambda}) dt = \left| \dot{A}_k(\vec{\lambda}) \right|^2 \mu_0,$$

$$\dot{Q}_{0k}(\vec{\lambda}) = \frac{2}{N_0} \int_0^T u_k(t) \cdot \dot{s}_0(t, \vec{\lambda}) dt, \quad (11)$$

$$\mu_0 = \frac{1}{N_0} \int_0^T [\text{Re } \dot{s}_0(t)]^2 dt \approx \frac{1}{2N_0} \int_0^T |\dot{s}_0(t)|^2 dt,$$

$$A_1(\vec{\lambda}) = \dot{\alpha} \cdot e^{j\varphi}, \quad A_2(\vec{\lambda}) = \dot{\alpha} \cdot e^{-j\varphi}. \quad (12)$$

Для нахождения оптимального решения, продифференцируем логарифм функционала правдоподобия по параметрам  $\vec{\lambda} = \|\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\| = \|\alpha_1, \alpha_2, \varphi\|$  с приравнением производной к нулю.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \lambda_i} \left\{ \text{Re} \sum_{k=1}^2 \left[ \dot{A}_k(\vec{\lambda}) \cdot \dot{Q}_{0k} - \left| \dot{A}_k(\vec{\lambda}) \right|^2 \cdot \mu_0 \right] \right\} &= \\ = \text{Re} \sum_{k=1}^2 \left[ \frac{\partial \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \cdot \dot{Q}_{0k} - 2 \frac{\partial \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \dot{A}_k^* \cdot \mu_0 \right] &= \\ = \text{Re} \sum_{k=1}^2 \frac{\partial \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \cdot \left[ \dot{Q}_{0k} - 2 \dot{A}_k^*(\vec{\lambda}) \cdot \mu_0 \right] &= 0. \quad (13) \end{aligned}$$

Так как  $\frac{\partial \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \neq 0$  (в общем случае), то оценки параметров  $(\vec{\lambda})$  находим из решения системы уравнений

$$\dot{A}_k(\hat{\vec{\lambda}}) = \frac{\dot{Q}_{0k}}{2\mu_0}, \quad (14)$$

$$\text{или } \dot{A}_1(\hat{\alpha}, \varphi) = \hat{\alpha} \cdot e^{j\varphi} = \frac{\dot{Q}_{01}}{2\mu_0},$$

$$\dot{A}_2(\hat{\alpha}, \varphi) = \hat{\alpha} \cdot e^{-j\varphi} = \frac{\dot{Q}_{02}}{2\mu_0}. \quad (15)$$

Решение этой системы уравнений можно представить такими формулами:

1. Разделим первое уравнение (15) на второе. Тогда получим:

$$e^{j2\varphi} = \cos(2\varphi) + j\sin(2\varphi) = \dot{Q}_{01} / \dot{Q}_{02},$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos \left( \text{Re} \frac{\dot{Q}_{01}}{\dot{Q}_{02}} \right) = \frac{1}{2} \arcsin \left( \text{Im} \frac{\dot{Q}_{01}}{\dot{Q}_{02}} \right). \quad (16)$$

2. Умножим (15) на комплексно-сопряжённый знаменатель. Тогда:

$$e^{j2\varphi} = \cos(2\varphi) + j\sin(2\varphi) = \dot{Q}_{01} \cdot \dot{Q}_{02}^* / \left| \dot{Q}_{02} \right|^2,$$

$$\varphi = 0,5 \cdot \arctg \left( \left( \text{Im} \dot{Q}_{01} \cdot \dot{Q}_{02}^* \right) / \left( \text{Re} \dot{Q}_{02} \cdot \dot{Q}_{02}^* \right) \right). \quad (17)$$

3. Составим из (14) такое отношение разности и суммы их левых и правых частей

$$\frac{\dot{\alpha}e^{j\varphi} - \dot{\alpha}e^{-j\varphi}}{\dot{\alpha}e^{j\varphi} + \dot{\alpha}e^{-j\varphi}} = \frac{-j \cdot \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} = \frac{\dot{Q}_{01} - \dot{Q}_{02}}{\dot{Q}_{01} + \dot{Q}_{02}}$$

или  $\operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{Im} \left\{ \frac{\dot{Q}_{01} - \dot{Q}_{02}}{\dot{Q}_{01} + \dot{Q}_{02}} \right\} = \frac{\operatorname{Im} \dot{Q}_{01} - \operatorname{Im} \dot{Q}_{02}}{\operatorname{Re} \dot{Q}_{01} + \operatorname{Re} \dot{Q}_{02}}.$  (18)

Пусть, например в (8)

$$\dot{s}_0(t) = \dot{S}_0 \cdot e^{j\omega_0 t}.$$

Тогда

$$\operatorname{Re} Q_{0i} = \operatorname{Re} \int_0^T u_i(t) \cdot \dot{s}_0(t) dt = S_0 \int_0^T u_i(t) \cos(\omega_0 t) dt,$$

$$\operatorname{Im} Q_{0i} = \operatorname{Im} \int_0^T u_i(t) \cdot \dot{s}_0(t) dt = S_0 \int_0^T u_i(t) \sin(\omega_0 t) dt.$$

Тогда

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\int_0^T u_2(t) \sin(\omega_0 t) dt - \int_0^T u_1(t) \sin(\omega_0 t) dt}{\int_0^T u_2(t) \cos(\omega_0 t) dt + \int_0^T u_1(t) \cos(\omega_0 t) dt} =$$

$$= \frac{\int_0^T [u_2(t) - u_1(t)] \sin(\omega_0 t) dt}{\int_0^T [u_2(t) + u_1(t)] \cos(\omega_0 t) dt} \quad (19)$$

Данный алгоритм предполагает формирование суммарного и разностного сигналов, т.е.  $u_2(t) - u_1(t)$  и  $u_2(t) + u_1(t)$ . Эти суммарный и разностные сигналы формируют в процессе оптимальной обработки. Однако можно показать, что суммарный и разностный сигналы целесообразно формировать в системном блоке, до входа этих сигналов в каналы обработки. Следует отметить, что оптимальные выходные эффекты  $\dot{Q}_{01}$  и  $\dot{Q}_{02}$  каждого из каналов антенн интерферометра содержат не только операции внутриимпульсной и внутрипериодной обработки сигналов, но и их межпериодное накопление, обеспечивающее синтез апертуры.

### Расчёт предельной погрешности оценки фазы $\varphi$ , определяющей потенциальную точность пеленгации элементов рельефа

Предельные погрешности оценок параметров  $\vec{\lambda}$  находим, обращая матрицу Фишера:

$$\|B_{i,j}\| = \left\langle \frac{\ln P(\vec{u}(t) | \vec{\lambda})}{\lambda_i \lambda_j} \right\rangle_{\vec{\lambda} = \hat{\lambda}} \quad (20)$$

На главной диагонали обратной матрицы  $\|B_{i,j}\|^{-1}$ , называемой ковариационной матрицей ошибок, будут находиться дисперсии предельных погрешностей оценок параметров  $\vec{\lambda}$ . В соответ-

вии с теорией Рао-Крамера эти погрешности определяют потенциальные точности измерений и их меньшие значения не могут быть достигнуты в рамках рассматриваемого метода оптимизации – метода максимального правдоподобия. Вычисляя вторую производную от выражения (13), получим

$$\frac{\partial^2 \ln P(\vec{u}(t) | \vec{\lambda})}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j} = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left\{ \frac{\partial^2 \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j} [\dot{Q}_{0k} - 2\dot{A}_k(\vec{\lambda}) \cdot \mu_{0k}] - 2 \frac{\partial \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \cdot \frac{\partial \dot{A}_k^*(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_j} \cdot \mu_{0k} \right\}_{\vec{\lambda} = \hat{\lambda}}.$$

При значениях  $\vec{\lambda} = \hat{\lambda}$  в соответствии с (13), (14) первое слагаемое здесь обращается в ноль. Тогда

$$\|B_{ij}\| = \left\| -2\mu_0 \sum_{k=1}^2 \frac{\partial \dot{A}_k(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_i} \cdot \frac{\partial \dot{A}_k^*(\vec{\lambda})}{\partial \lambda_j} \right\|. \quad (21)$$

Пусть, для простоты коэффициент  $\dot{\alpha} = \alpha$  является вещественным. Тогда неизвестными являются два параметра  $\vec{\lambda} = \|\alpha, \varphi\|$ . Матрица Фишера в этом случае имеет вид

$$\|B_{ij}\| = -2\mu_0 \times \left\| \begin{array}{cc} \left| \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_1} \right|^2 + \left| \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_1} \right|^2 & \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_1} \cdot \frac{\partial \dot{A}_1^*}{\partial \lambda_2} + \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_1} \cdot \frac{\partial \dot{A}_2^*}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_2} \cdot \frac{\partial \dot{A}_1^*}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_2} \cdot \frac{\partial \dot{A}_2^*}{\partial \lambda_1} & \left| \frac{\partial \dot{A}_1}{\partial \lambda_2} \right|^2 + \left| \frac{\partial \dot{A}_2}{\partial \lambda_2} \right|^2 \end{array} \right\| =$$

$$= -2\mu_0 \left\| \begin{array}{cc} 2 & 0 \\ 0 & 2\alpha^2 \end{array} \right\|.$$

Обратная матрица

$$\|B_{ij}\|^{-1} = \left\| \begin{array}{cc} \sigma_\alpha^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\varphi^2 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} (4\mu_0)^{-1} & 0 \\ 0 & (4\mu_0\alpha^2)^{-1} \end{array} \right\|. \quad (22)$$

Таким образом

$$\sigma_\varphi^2 = 1 / (4\mu), \quad (23)$$

где  $\mu_0 = \alpha^2 \cdot \mu$  – полное отношение сигнал/шум. Так как  $\varphi = k \cdot d \cdot \cos \theta$ , то

$$\sigma_\theta^2 = \sigma_\varphi^2 / \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right)^2 = \frac{\sigma_\varphi^2}{k^2 \cdot d^2 \cdot \cos^2 \theta} = 1 / (4\mu \cdot k^2 \cdot d^2 \cdot \cos^2 \theta).$$

Погрешность оценки высоты рельефа можно найти следующим образом. На основании (1) имеем

$$h + \Delta h = H + \Delta H - D \cdot \cos(\theta + \Delta \theta) \approx \approx H + \Delta H - D \cdot \cos(\theta) + D \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta.$$

Если ошибки оценки средней высоты  $H$  и угла  $\theta$  независимы, то  $\sigma_h^2 = \sigma_H^2 + D^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \sigma_\theta^2$ .

## Выводы

Таким образом, в данной работе решена задача оптимальной обработки сигналов в интерферометрических РСА для функционально-детерминированной модели сигнала (сигнала с полностью известными параметрами) в рамках метода максимального правдоподобия. Получены алгоритмы оптимальной оценки фаз и пеленгов элементов рельефа, взаимодействующих с импульсным объёмом зондирующих импульсов. Определены потенциальные точности погрешности оценок.

## Литература

1. Куштин И.Ф. Фотограмметрия снимка и стереоскопических моделей / И.Ф. Куштин, Г.А. Лысаков. – М.: Недра, 1984. – 169 с.

2. Аковецкий В.И. Радиолокационная фотограмметрия / В.И. Аковецкий, Г.Н. Донсков, Ю.Н. Корнеев. – М.: Недра, 1979. – 239 с.

3. Кондратенков Г.С. Радиовидение (Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли) / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

4. Волосяк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 704 с.

5. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation / Alessandro Ferretti, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, Fabio Rocca // ESA Publications ESTEC, February, 2007. – P. A-17 - A-18.

6. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала / С.Е. Фалькович. – М.: Сов. радио, 1970. – 335 с.

Поступила в редакцию 2.12.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. приёма, передачи и обработки сигналов, В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В РАДІОЛОКАТОРАХ З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ З ФАЗОВИМ ПЕЛЕНГУВАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ПОВЕРХНІ ПРИ КАРТОГРАФУВАННІ ЇЇ РЕЛЬЄФУ

*В.К. Волосяк, О.В. Єремєєв, М.В. Токарєв*

Розв'язано задачу оптимальної обробки сигналів у інтерферометричних радіолокаторах з синтезованою апертурою (РСА) для функціонально-детермінованої моделі сигналу (сигнал з повністю відомими параметрами) в рамках методу максимальної правдоподібності. Розглянута задача відноситься до класу задач оптимізації. В результаті вирішення задачі був отриманий алгоритм, який передбачає формування сумарного і різницевого сигналів. Проведено розрахунок граничної похибки оцінки фази, що визначає потенціальну точність пеленгації елементів рельєфу. Отримано алгоритми оптимальної оцінки фаз і пеленгів елементів рельєфу, що взаємодіють з імпульсним об'ємом зондувальних імпульсів. Визначені потенційні точності похибки оцінок.

**Ключові слова:** інтерферометричні РСА, відновлення висоти рельєфу, оптимальна оцінка фази.

## OPTIMIZATION OF SIGNAL PROCESSING IN SYNTHETIC APERTURE RADAR WITH PHASE DIRECTION FINDING OF SURFACE ELEMENTS FOR RELIEF MAPPING

*V.K. Volosyuk, A.V. Yeremyeyev, M.V. Tokarev*

The problem of optimal signal processing of interferometric synthetic aperture radars (SAR) for the functionally-deterministic signal model (signal with all known parameters) within the maximum likelihood method is solved. The considered problem belongs to a class of optimization problems. The problem solution was obtained by an algorithm that assumes the generation of summarized and differential signals. The calculation of phase estimation limiting error, which determines the potentially accuracy of relief direction-finding is produced. The algorithms for optimal estimation of phase and bearing of relief elements that interact with pulse volume of the probe pulses are produced. The potential accuracy of error estimates are determined.

**Key words:** interferometric SAR, height reconstruction, optimum phase estimate.

**Волосяк Валерій Константинович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектування радіоелектронних систем летальних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, e-mail: valeriy\_volosyuk@mail.ru.

**Єремєєв Александр Викторович** – аспірант каф. проектування радіоелектронних систем летальних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, e-mail: a.yeremeev@gmail.com.

**Токарєв Максим Владимирович** – студент каф. проектування радіоелектронних систем летальних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, e-mail: marks.tokarev@gmail.com.