

УДК 621.396.96

А.В. ЕРЕМЕЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДАРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА

Рассмотрена задача повышения точности определения высоты рельефа в интерферометрических радарах с синтезированной апертурой антенны (РСА). Для решения поставленной задачи предложено применить оптимальную обработку сигналов на этапе первичной обработки радиолокационной информации. Для решения задачи синтеза оптимального алгоритма предложено использовать метод максимального правдоподобия. В качестве модели интерферометрического РСА рассмотрен однопроходный вертикальный интерферометр с двумя приемными каналами. Для выбранной модели интерферометра получен алгоритм нахождения оптимальной оценки высоты рельефа.

Ключевые слова: *интерферометрические РСА, восстановление высоты рельефа, цифровая модель рельефа.*

Введение

Технологии современного дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) неразрывно связаны с авиационно-космическими технологиями. Основными платформами для современных систем ДЗЗ в подавляющем большинстве случаев являются именно авиационные или космические платформы. Что дает право считать авиационно-космическую технику основой базирования систем ДЗЗ. Актуальной технической проблемой современного дистанционного зондирования является получение цифровой модели рельефа (ЦМР), модели, описывающей высотные характеристики исследуемой поверхности. ЦМР применяется при проектировании сетей связи для прогнозирования прохождения радиоволн, при проектировании строительства различного рода путепроводов. Существуют различные методы получения ЦМР [1]. В основе их различия лежит разнообразный характер данных используемых для построения модели. Источниками данных для построения ЦМР могут служить: существующие топографические карты; данные воздушного лазерного сканирования; космические (авиационные) снимки, как в оптическом, так и в радиодиапазонах. Основными преимуществами радиолокационных данных являются: всепогодность радиолокационной съемки (отсутствует зависимость от времени суток и облачности в отличие от оптической съемки); широкая полоса захвата; доступность данных и их относительно низкая стоимость [2]. Такие преимущества обуславливают широкое применение радиолокационных данных для получения ЦМР.

Для построения ЦМР по данным радиолокационных снимков, сделанных при помощи радара с

синтезированной апертурой (РСА), основным является интерферометрический метод. Интерферометрическая обработка данных РСА состоит в выделении фазовой информации из радиолокационного сигнала и совместной обработки фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка зондируемой поверхности под различными углами обзора [3]. При таком когерентном объединении сигналов для каждой точки изображения может быть определена интерферометрическая разность фаз, разность фаз между принятыми сигналами. Зная геометрию интерферометрического РСА и параметры траектории полета, полученная интерферометрическая разность фаз может быть пересчитана в значение высоты для каждой точки зондируемой поверхности. Таким образом, разность фаз добавляет третье измерение, в дополнение к двум уже имеющимся координатам точки, давая возможность восстановить трехмерное положение точки, что позволяет создать ЦМР поверхности.

Чтобы получить ЦМР необходимо пройти четыре этапа обработки радиолокационных данных.

1. Первичная обработка сигналов. Этап получения оценки пространственно распределенной интерферометрической разности фаз.

2. Фильтрация полученной оценки разности фаз. Этап устранения помех и искажений полученной оценки разности фаз.

3. Развертка фазы. Этап устранения неоднозначности оценки разности фаз для получения однозначной оценки высоты.

4. Посторенные карты высот зондируемой поверхности. Этап устранения геометрических искажений, привязки, геокодирования и построения ЦМР.

Успешное решение задач первого этапа обработки сигналов интерферометрической РСА (первичной обработки), дает возможность заложить потенциальную точность определения высоты рельефа, достичь которую возможно при условии успешного решения задач последующих этапов обработки.

Поэтому актуальной научной проблемой является оптимизация обработки сигналов на этапе первичной обработки радиолокационных данных.

В данной работе предлагается применить метод максимального правдоподобия на этапе первичной обработки радиолокационных данных для достижения потенциальной точности определения высоты зондируемой поверхности.

Постановка задачи исследования

Одним из примеров интерферометрического РСА может служить вертикальный интерферометр [4], схема которого изображена на рис. 1.

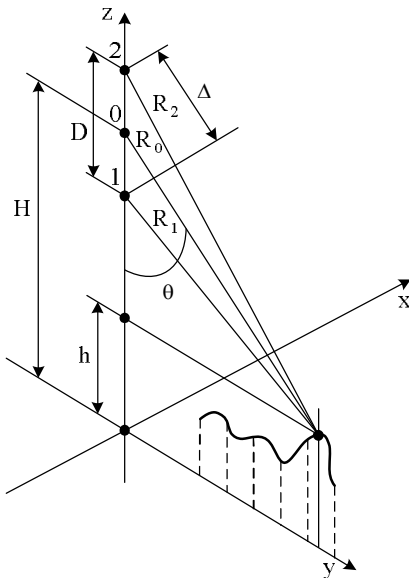


Рис. 1. Вертикальный интерферометрический РСА

Вертикальный интерферометр состоит из двух антенн разнесенных по вертикальной оси. Одна из антенн приемо-передающая 1 (рис. 1), другая приемная 2 (рис. 1). Точка 0 (рис. 1) делит антенную базу D пополам и является средней точкой интерферометра.

Сигнал, излученный антенной 1 и отраженный от зондируемой поверхности, принимаются обеими антеннами, после чего происходит совместная обработка отраженного сигнала для выделения информации о высоте. Будем полагать, что зондирование проводится в дальней зоне, следовательно, отраженные лучи, приходящие в антенну 1 и 2, будем считать параллельными.

Из геометрии системы следует, что высота поверхности h может быть определена как

$$h(y) = H - R_0 \cos[\theta(y)], \tag{1}$$

где H – барометрическая высота полета зондирующей платформы (относительно средней точки интерферометра 0), R₀ – наклонная дальность от средней точки интерферометра 0 до зондируемого участка поверхности, θ(y) – угол визирования.

Излучаемый зондирующий сигнал представляет собой периодический радиоимпульс

$$s(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), & 0 \leq t \leq \tau_{и}; \\ 0, & t > \tau_{и}, \end{cases} \tag{2}$$

где A(t), ω₀ и φ₀ - амплитуда, несущая частота и начальная фаза сигнала соответственно, τ_и - длительность зондирующего импульса.

Начальную фазу излучаемого сигнала примем равной нулю φ₀ = 0. Амплитуды принятых колебаний в антеннах 1 и 2 будем считать одинаковыми и независимыми от времени A₁(t) = A₂(t) = A. Барометрическую высоту полета H считаем известной величиной. Наклонная дальность является функцией времени задержки зондирующего сигнала R₀(t₃)

$$R_0(t_3) = \frac{t_3 c}{2},$$

где c – скорость света.

Время задержки делится на два, потому что сигнал за время t₃ проходит двойное расстояние от антенны до поверхности и обратно. Поскольку наклонная дальность напрямую зависит от времени задержки, задаваясь определенным значением времени задержки, мы всегда сможем получить значение наклонной дальности.

Таким образом, для однозначного определения высоты зондируемой поверхности необходимо определить значение угла визирования θ(y), так как H и R₀ мы считаем известными величинами.

Решение задачи

Задачу определения высоты рельефа рассмотрим в статистической постановке, при которой обработку сигналов и нахождение оценки угла визирования θ выполним в рамках метода максимального правдоподобия.

Целью работы является синтез оптимального алгоритма определения высоты рельефа зондируемой поверхности для случая вертикального интерферометра.

Поскольку величину наклонной дальности мы считаем известной, выразим через R₀ время задержки зондирующего импульса в антеннах 1 и 2:

$$t_{31} = \frac{2R_1}{c} = \frac{2R_0 - D \cos \theta}{c},$$

$$t_{32} = \frac{2R_2}{c} = \frac{2R_0 + D \cos \theta}{c}. \quad (3)$$

Тогда принятый сигнал антенной 1 можем записать в виде

$$s_1(t, \cos \theta) = A(t - t_{31}) \cos[\omega_0(t - t_{31})] =$$

$$= A \cos\left[\omega_0 t - 2R_0 \frac{\omega_0}{c} + \frac{\omega_0}{c} D \cos \theta\right] =$$

$$= A \cos[\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta],$$

где $\frac{\omega_0}{c} = k$ - волновое число.

$$s_1(t, \cos \theta) = \begin{cases} 0, & t < t_{31}; \\ A \cos[\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta], & t_{31} \leq t \leq t_{31} + \tau_{и}; \\ 0, & t > t_{31} + \tau_{и}. \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично принятый сигнал антенной 2

$$s_2(t, \cos \theta) = \begin{cases} 0, & t < t_{32}; \\ A \cos[\omega_0 t - 2R_0 k - kD \cos \theta], & t_{32} \leq t \leq t_{32} + \tau_{и}; \\ 0, & t > t_{32} + \tau_{и}. \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения наблюдения для антенн 1 и 2

$$u_1(t, \cos \theta) = s_1(t, \cos \theta) + n(t),$$

$$u_2(t, \cos \theta) = s_2(t, \cos \theta) + n(t). \quad (6)$$

Основным неизвестным параметром является угол визирования θ . Далее мы будем находить оценку не самого угла θ , а его косинуса - $\cos \theta$. $n(t)$ - внутренние шумы приемника. Шум имеет спектральную плотность мощности $\frac{N_0}{2}$ и корреля-

ционную функцию $R_n(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau)$.

Функция правдоподобия представляет собой произведение двух условных плотностей вероятностей

$$P(\bar{u} | \cos \theta) = k \cdot \exp\{y_1(\cos \theta) + y_2(\cos \theta)\}, \quad (7)$$

где y_1 и y_2 - корреляционные интегралы для канала антенны 1 и 2 соответственно.

Корреляционный интеграл для антенны 1 запишем как

$$y_1(\cos \theta) = \frac{2}{N_0} \int_{t_{31}}^{t_{31} + \tau_{и}} u_1(t) s_1(t, \cos \theta) dt,$$

$$y_1(\cos \theta) =$$

$$= \frac{2}{N_0} \int_{t_{31}}^{t_{31} + \tau_{и}} u_1(t) A \cos[\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta] dt =$$

$$= \frac{2A}{N_0} \times$$

$$\int_{t_{31}}^{t_{31} + \tau_{и}} u_1(t) \cos[\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta] dt. \quad (8)$$

Аналогично, корреляционный интеграл для антенны 2

$$y_2(\cos \theta) = \frac{2}{N_0} \int_{t_{32}}^{t_{32} + \tau_{и}} u_2(t) s_2(t, \cos \theta) dt,$$

$$y_2(\cos \theta) =$$

$$= \frac{2}{N_0} \int_{t_{32}}^{t_{32} + \tau_{и}} u_2(t) A \cos[\omega_0 t - 2R_0 k - kD \cos \theta] dt =$$

$$= \frac{2A}{N_0} \int_{t_{32}}^{t_{32} + \tau_{и}} u_2(t) \cos[\omega_0 t - 2R_0 k - kD \cos \theta] dt. \quad (9)$$

Найдем максимум функции правдоподобия, для чего продифференцируем логарифм функции правдоподобия по искомому параметру $\cos \theta$

$$\frac{\partial \ln P(\bar{u} | \cos \theta)}{\partial \cos \theta} = 0, \quad (10)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial \cos \theta} \left[\frac{2A}{N_0} \times \int_{t_{31}}^{t_{31} + \tau_{и}} u_1(t) \cos[\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta] dt \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial \cos \theta} \left[\frac{2A}{N_0} \times \int_{t_{32}}^{t_{32} + \tau_{и}} u_2(t) \cos[\omega_0 t - 2R_0 k - kD \cos \theta] dt \right] = 0. \quad (11)$$

Продифференцируем каждое из слагаемых в отдельности, а затем сложим полученные выражения. Дифференцируя корреляционный интеграл для канала антенны 1, получим следующий результат:

$$\frac{\partial}{\partial \cos \theta} \left[\frac{2A}{N_0} \times$$

$$\int_{t_{31}}^{t_{31} + \tau_{и}} u_1(t) \cos[\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta] dt \right] =$$

$$= \frac{2A}{N_0} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) [-\sin(\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta) \cdot kD] dt = \\ & = -\frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta) dt = \\ & = -\frac{2AkD}{N_0} \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k + kD \cos \theta) dt = \\ & = -\frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin((\omega_0 t - 2R_0 k) + kD \cos \theta) dt = \\ & = -\frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \left[\sin(\omega_0 t - 2R_0 k) \cos(kD \cos \theta) + \right. \\ & \left. + \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) \sin(kD \cos \theta) \right] dt = \\ & = -\frac{2AkD}{N_0} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) \cos(kD \cos \theta) dt + \right. \\ & \left. + \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) \sin(kD \cos \theta) dt \right] \cdot \\ & \frac{\partial}{\partial \cos \theta} [y_1(\cos \theta)] = -\frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \left[\cos(kD \cos \theta) \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt + \right. \\ & \left. + \sin(kD \cos \theta) \int_{t_{31}}^{t_{31}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt \right] \cdot \end{aligned} \quad (12)$$

Проделив аналогичные преобразования, можем записать производную корреляционного интеграла для канала антенны 2

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \cos \theta} [y_2(\cos \theta)] = \frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \left[\cos(kD \cos \theta) \int_{t_{32}}^{t_{32}+\tau_{\Pi}} u_2(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt - \right. \\ & \left. - \sin(kD \cos \theta) \int_{t_{32}}^{t_{32}+\tau_{\Pi}} u_2(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt \right] \cdot \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя полученные выражения (12) и (13)

в (11) найдем оптимальную оценку $\cos \theta$

$$\begin{aligned} & -\frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \left[\cos(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt + \right. \\ & \left. + \sin(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt \right] + \\ & + \frac{2AkD}{N_0} \times \\ & \times \left[\cos(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_2(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt - \right. \\ & \left. - \sin(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_2(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt \right] = 0. \\ & \cos(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_2(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt - \\ & - \sin(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_2(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt = \\ & = \cos(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt + \\ & + \sin(kD \cos \theta) \int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} u_1(t) \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt. \\ & \cos(kD \cos \theta) \times \\ & \times \left[\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} [u_2(t) - u_1(t)] \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt \right] = \\ & = \sin(kD \cos \theta) \times \\ & \times \left[\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} [u_2(t) + u_1(t)] \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt \right]. \end{aligned}$$

$$\tan(k \cdot D \cdot \cos \theta) =$$

$$\frac{\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} [u_2(t) - u_1(t)] \cdot \sin(\omega_0 t - 2R_0 k) dt}{\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{\Pi}} [u_2(t) + u_1(t)] \cdot \cos(\omega_0 t - 2R_0 k) dt} \cdot \quad (14)$$

Учитывая, что

$$2R_0 k = \omega_0 \frac{2R_0}{c} = \omega_0 t_{30},$$

можем переписать (14) в виде

$$\tan(k \cdot D \cdot \cos \theta) =$$

$$= \frac{\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{и}} [u_2(t) - u_1(t)] \cdot \sin[\omega_0(t - t_{30})] dt}{\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{и}} [u_2(t) + u_1(t)] \cdot \cos[\omega_0(t - t_{30})] dt}. \quad (15)$$

Запишем искомую оценку параметра $\cos \theta$

$$\widehat{\cos \theta} = \frac{\operatorname{atan} \left[\frac{\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{и}} [u_2(t) - u_1(t)] \cdot \sin[\omega_0(t - t_{30})] dt}{\int_{t_{30}}^{t_{30}+\tau_{и}} [u_2(t) + u_1(t)] \cdot \cos[\omega_0(t - t_{30})] dt} \right]}{k \cdot D}. \quad (16)$$

Заключение

Рассмотрена задача первичной обработки радиолокационных данных для вертикального интерферометра с целью повышения точности определения высоты рельефа зондируемой поверхности.

Предложено применить оптимальную обработку сигналов на этапе первичной обработки, исполь-

зуя метод максимального правдоподобия. Для косинуса угла визирования записана функция правдоподобия и получена искомая оптимальная оценка как решение уравнения правдоподобия.

Предлагаемый подход направлен на повышение качества получаемой оценки высоты рельефа.

Литература

1. Радиолокационные методы исследования Земли [Текст] / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко и др.; под ред. Ю.А. Мельник. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
2. Корнеева, Т. РЛС с синтезированной апертурой космического базирования [Текст] / Т. Корнеева // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2000. – №1. – С. 46-48.
3. Bamler, R. Synthetic aperture radar interferometry [Текст] / R. Bamler, P. Hartl // Inverse Problems. – 1998. – V.14, №4. – P. R1-R54.
4. Грехэм, Л.Ц. Радиointерферометр с синтезированной апертурой для картографирования [Текст] / Л.Ц. Грехэм // ТИИЭР. – 1974. – Т.62, № 6. – С. 133-140.

Поступила в редакцию 12.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник В.В. Пискорж, Научно-исследовательский институт радиоизмерений, Харьков.

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ РАДАРАХ С СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ АНТЕНИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ РЕЛЬЄФУ

О.В. Єремєєв

Розглянута задача підвищення точності визначення висоти рельєфу в інтерферометричних радарях з синтезованою апертурою антени (РСА). Для вирішення поставленої задачі запропоновано застосувати оптимальну обробку сигналів на етапі первинної обробки радіолокаційної інформації. Для вирішення задачі синтезу оптимального алгоритму запропоновано використати метод максимальної правдоподібності. У якості моделі інтерферометричного РСА розглянуто однопрохідний вертикальний інтерферометр. Для обраної моделі інтерферометра отримано алгоритм знаходження оптимальної оцінки висоти рельєфу.

Ключові слова: інтерферометричні РСА, відбудова висоти рельєфу, цифрова модель рельєфу.

SIGNALS PROCESSING OPTIMIZATION IN INTERFEROMETRIC SAR FOR ACCURACY IMPROVEMENT OF HEIGHT OF THE RELIEF ESTIMATION

A.V. Yermeyev

The problem of accuracy improvement of height of the relief estimation in interferometric synthetic aperture radar (SAR) is investigated. An optimal signal processing in primary radar information processing stage is proposed to solve the problem. The maximum likelihood approach is used for an optimal algorithm synthesis. As a model of the interferometric SAR, the vertical interferometer is considered. For the selected interferometer model, an optimal algorithm for height of the relief estimation is obtained.

Key words: interferometric SAR, height reconstruction, digital elevation model.

Єремєєв Александр Викторович – аспірант кафедри проектування радіоелектронних систем летальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Україна, e-mail: a.yermeyev@gmail.com.