

Оценка эффективности некогерентного накопления при интерферометрической обработке данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой

А.В. Сосновский¹

¹Уральский федеральный университет, Мира 19, Екатеринбург, Россия, 620002

Аннотация. Экспериментальное исследование эффективности алгоритмов интерферометрической обработки радиолокационных данных осложняется тем, что количественный результат может быть получен только после завершения всей процедуры обработки, поэтому сложно оценить эффективность её первых этапов – некогерентного накопления и подавления фазового шума. Предложен метод экспериментальной оценки точности результатов интерферометрической обработки различными алгоритмами на этапе некогерентного накопления при различных способах выбора коэффициентов накопления, основанный на обратном преобразовании эталонных данных. Представлены результаты реализации метода для данных ALOS PALSAR и предложены оптимальные значения коэффициентов накопления для радиолокационных данных ALOS PALSAR, полученных в режиме двойной поляризации (FBD) для местностей с холмистым рельефом.

1. Введение

Цифровые модели рельефа (ЦМР) и карты смещений рельефа широко используются при создании и обновлении высотной основы цифровых топографических карт различных масштабов, при экологическом мониторинге зон проведения работ по добыче полезных ископаемых, контроле состояния транспортных коммуникаций [1-5].

Метод космической радиолокационной интерферометрии (технологии InSAR и DInSAR), позволяет получать оба вида высотной информации. Суть метода состоит в совместной обработке фазовых полей, полученных при съёмке радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) одного и того же участка местности одновременно двумя разнесёнными антенными системами, либо одной антенной на двух смежных витках орбиты.

Технология интерферометрической обработки радиолокационных данных при построении цифровой модели рельефа включает следующие этапы: формирование пары комплексных радиолокационных изображений (РЛИ), пространственное совмещение радиолокационных изображений одной и той же области поверхности; формирование интерферограммы путем поэлементного комплексного перемножения двух РЛИ; компенсацию фазового набега по опорной поверхности; некогерентное накопление; оценивание когерентности данных; подавление фазового шума; устранение фазовой неоднозначности (развёртывание фазы); построение цифровой модели местности – пересчёт развёрнутых (абсолютных) фаз в высоты рельефа и геокодирование (переход от полётной системы координат РСА к какой-либо картографической проекции).

Эффективность интерферометрической обработки оценивается по величине отклонения получаемой ЦМР от эталонной. Критериями оценки качества получаемой ЦМР могут выступать точности абсолютного положения контрольных точек в плане и по высоте (среднее абсолютное отклонение); максимальные погрешности контрольных точек в плане и по высоте; среднеквадратические погрешности представления высот контрольных точек. Однако, экспериментальное исследование эффективности алгоритмов, применяемых на каждом этапе, осложняется тем, что количественный результат можно получить только после завершения всей процедуры обработки. Именно такой подход (наряду с визуальным оцениванием качества), как правило, и используется в настоящее время для оценивания эффективности интерферометрических алгоритмов [5], однако в этом случае затруднённой оказывается оценка эффективности начальных этапов обработки – некогерентного накопления и подавления фазового шума [1,2,5].

В настоящей работе на основе предложенного метода обратного преобразования эталонной ЦМР [7,8] проведено сравнение эффективности различных способов некогерентного накопления в увязке с алгоритмами подавления фазового шума. Методика анализа проиллюстрирована примерами обработки данных, полученных радиолокатором ALOS PALSAR

2. Некогерентное накопление при интерферометрической обработке данных РСА

Некогерентное накопление (НК, multilooking) представляет собой суммирование результатов независимых радиолокационных наблюдений с целью снижения уровня спекл-шумов радиолокационных изображений и фазовых шумов интерферограмм. НК реализуется путём суммирования N_A смежных отсчётов радиолокационного изображения (в том числе комплексного) в азимутальном направлении, при этом выигрыш от его использования состоит в снижении уровня флуктуаций спекл- и фазовых шумов примерно в $\sqrt{N_A}$ раз. Если РСА использует зондирующий сигнал с линейной частотной модуляцией, то аналогичный эффект будет достигаться и при накоплении вдоль дальностной координаты изображения (N_R); таким образом, коэффициент некогерентного накопления (количество суммируемых отсчётов) будем далее записывать следующим образом $N_A \times N_R$. При интерферометрической обработке некогерентное накопление должно выполняться после этапа компенсации фазового набега по опорной поверхности, поскольку такая компенсация переносит спектр интерферограммы в область нижних частот, а некогерентное накопление, напротив, полностью «вырезает» высокочастотную часть спектра, и изменение порядка выполнения этих операций приведёт к неизбежной потере полезной информации.

Для экспериментального исследования точности построения рельефа при использовании различных алгоритмов интерферометрической обработки радиолокационных данных авторами разработан метод обратного преобразования эталонного рельефа [7, 8, 9]. Его суть заключается в получении эталонных высот и фаз (в бортовой системе координат) путём преобразований эталонных картографических данных местности-полигона в порядке, обратном порядку интерферометрической обработки. В качестве эталонных данных выступают точки планово-высотной основы топографических карт. Преобразование проводится в три этапа:

1) перепроецирование координат высотных точек из географической системы координат $h_{0i}\{B, L\}$ в полётную систему координат первого РЛИ «азимут-наклонная дальность», пересчитанную к номерам элементов разрешения РЛИ $h_{0i}\{m, n\}$ (значения высот при этом не изменяются) [6].

2) преобразование полученного эталона высот в эталон абсолютных фаз по соотношению:

$$\Psi_{0i}(m_i, n_i) = 2\pi \left[h_{0i}(m_i, n_i) / h_A(n_i) \right] \quad (1)$$

где h_{0i} – эталонные высоты, h_A – высота неоднозначности, т.е. расстояние в вертикальном направлении (относительно поверхности референц-эллипсоида или общеземного эллипсоида), соответствующее разности фаз отражённых сигналов. Высота неоднозначности с достаточной

точностью может быть определена по орбитальным данным, а её зависимостью от наклонной дальности иногда можно пренебрегать.

Оценки точности производится по критерию среднеквадратичного отклонения следующим образом.

2) для относительной фазы:

$$\sigma[\varphi^x] = \sqrt{\frac{\sum_i \left\{ \arg \left[\frac{\exp(j\varphi_i^x(m_i, n_i) - j\Psi_{0i}(m_i, n_i))}{\exp(j\varphi_i^x(m_i, n_i) - j\Psi_{0i}(m_i, n_i))} \right] \right\}^2}{N-1}} \quad (2)$$

где φ_i^x – значения фаз интерферограммы либо после некогерентного накопления, $\overline{\varphi_i^x}$ и $\overline{\Psi_{0i}}$ и – средние значения интерферометрической и эталонной фаз. Формула (2) имеет отличия от стандартного определения с.к.о., вызванные необходимостью сохранения результата оценки при внесении постоянного фазового сдвига в съёмочные данные.

Получаемые значения с.к.о. относительной фазы после некогерентного накопления сигнала позволяют, с одной стороны, оценить снижение фазового шума при накоплении, а с другой – найти оптимальное значение коэффициента накопления, при превышении которого начинают преобладать ошибки, связанные со снижением частоты пространственной дискретизации данных.

В качестве эталонных высотных данных при оценивании эффективности могут выступать координаты пунктов государственных геодезической (ГГС), гравиметрической (ГГРС) и нивелирной (ГНС) сетей, регулярные (GRID) и нерегулярные (TIN) цифровые модели рельефа, массивы координаты отдельных точек местности (отметки высот цифровых топографических карт, точки планово-высотного обоснования). С точек зрения удобства совмещения съёмочных и эталонных данных и адекватности получаемых оценок для реализации методики наилучшим образом подходят эталонные данные в виде массива координат отметок высот цифровых топографических карт. В отличие от матричной эталонной цифровой модели рельефа, использование массива отдельных точек позволяет исключить влияние на результат оценивания участков местности-полигона, не обеспеченных эталонной информацией – водных поверхностей и районов проведения открытых горных работ. Координаты эталонных точек должны быть преобразованы в международную геодезическую систему WGS-84 (используемой навигационной аппаратуры носителя), а система высот – из Балтийской системы нормальных высот 1977 года к системе геодезических высот относительно общеземного эллипсоида WGS-84.

3. Экспериментальные результаты

Экспериментальные съёмочные данные были получены космическим аппаратом ALOS (радиолокатор PALSAR) в режиме двух поляризаций (использовался кадр с ГГ-поляризацией), поле фазы имеет высоту неоднозначности 17,2 м (на ближнем крае сцены); Период пространственной дискретизации составлял 15,0×3,1 м, размер сцены – 12000×1800 элементов. Эталонный рельеф местности-полигона представляет собой набор из 1429 точек планово-высотной основы с вертикальной точностью не хуже 0,2 м и охватывает территорию 1083 кв. км.

После обратных преобразований координат эталонных точек исследовались точности восстановления относительных фаз для безвесовое некогерентного накопления с симметричным $N_A \times N_R$ ($N_A = N_R$) и несимметричным коэффициентами ($N_A \neq N_R$), в том числе для дробных значений N_A и N_R .

Были получены значения показателей точности – среднеквадратичных отклонений фазы и/или высоты после некогерентного накопления с последующей усредняющей фильтрацией, которые приведены на рисунке 1, из которого видно, что применение некогерентного накопления снижает с.к.о. фазы относительно с.к.о. равномерно распределённой случайной фазы ($\pi/\sqrt{3}$

рад) примерно на 40% - до значений порядка 1 рад. Оптимальный коэффициент накопления лежит в пределах от 3×3 до 9×9 и определяется не только характеристиками сцены, но и параметрами применяемого впоследствии усредняющего фильтра: чем больше коэффициент накопления, тем меньший размер окна фильтра требуется использовать для получения оптимального результата.

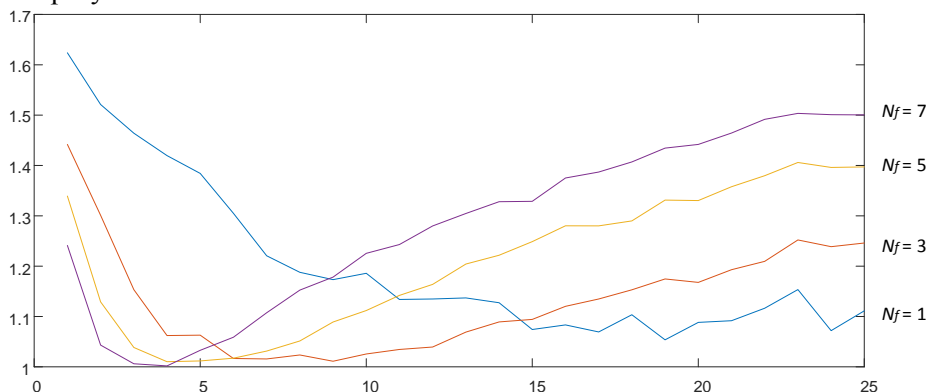


Рисунок 1. Зависимость с.к.о. относительной фазы (рад) после некогерентного накопления и последующей усредняющей фильтрации с окном $N_f \times N_f$ от значения коэффициента накопления ($N_A \times N_R$, $N_A = N_R$).

Для исследования эффективности несимметричного накопления аналогичным образом были рассмотрены возможные пары коэффициентов N_A и N_R , результат представлен на рисунке 2.

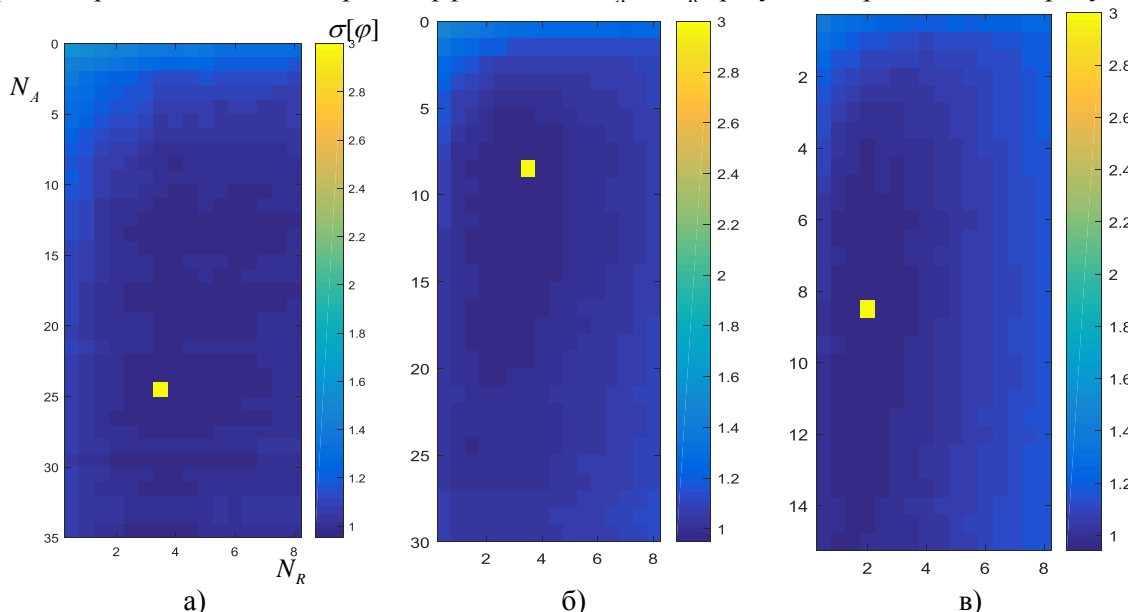


Рисунок 2. Зависимость с.к.о. относительной фазы (рад) после некогерентного накопления и последующей усредняющей фильтрации с окном $N_f \times N_f$ от значений коэффициентов некогерентного накопления N_A и N_R (оптимальные пары коэффициентов подсвечены яркой точкой): а) $N_f = 3$, б) $N_f = 5$, в) $N_f = 7$.

Поскольку радиолокационные данные ALOS PALSAR в режиме двойной поляризации имеют разное пространственное разрешение вдоль азимутальной и дальностной координат, то использование несимметричных коэффициентов может оказаться более эффективным. Из рисунка 2 можно сделать вывод, что выигрыш в точности от перехода к несимметричным коэффициентам получается незначительный ($\sim 0,97$ рад вместо 1 рад), оптимальные значения

коэффициентов варьируются от $25 \times 3,5$ до $8 \times 2,5$ при этом оптимальное соотношение коэффициентов варьируется от 4:1 до 7:1 в пользу N_A .

4. Заключение

Предложен метод экспериментальной оценки точности результатов некогерентного накопления при различных способах выбора коэффициентов накопления. Представлены результаты реализации метода для данных ALOS PALSAR и предложены оптимальные значения коэффициентов накопления. Получено, что оптимальное значение коэффициента накопления лежит в пределах от 3×3 до 9×9 для симметричного случая и $8 \times 2,5$ до $25 \times 3,5$ для несимметричного случая и помимо свойств сцены определяется параметрами последующей фильтрации фазового шума.

5. Литература

- [1] Елизаветин, И.В. Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического PCA / И.В. Елизаветин, Е.А. Ксенофонтов // Исследования Земли из космоса. – 1996. - № 1. – С. 75-90.
- [2] Bamler, R. Synthetic aperture radar interferometry / R. Bamler, P. Hartl // Inverse Problems. – 1998. – Vol. 14(4). – P. r1-r54.
- [3] Joughin, I.R. Synthetic Aperture Radar Interferometry / I.R. Joughin, F. K. Li, S.N. Madsen, E. Rodrigues // Proceedings of the IEEE. – 2000. – Vol. 88(3). – P. 333-382
- [4] Hanssen, R.F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis / R.F. Hanssen. – Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2002. – 308 p.
- [5] Goldstein, R.M. Radar interferogram filtering for geophysical applications / R.M. Goldstein, C.L. Werner // Geophysical Research Letters. – 1998. – Vol. 25(21). – P. 4035-4038.
- [6] Frei, U. Cartographic Reference Systems / U. Frei, C. Graf, E. Meier // SAR Geocoding. Data and System. – Karlsruhe: Wichmann. – 1993. – P. 173-186.
- [7] Сосновский, А.В. Об оценивании точности цифровых моделей рельефа, получаемых методом космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // XXII международная научно-техническая конференция "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC): сборник трудов в 3-х тт. – Воронеж: НПФ "САКВОЕЕ". – 2016. – Т. 3. – С. 1074-1081.
- [8] Сосновский, А.В. Методика экспериментальной оценки эффективности этапов интерферометрической обработки сигналов PCA / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // 26-я Международная Крымская конференция "СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии" (КРЫМИКО). – Севастополь: СевГУ, 2016. – С. 2716-2722.
- [9] Sosnovsky, A.V. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – IEEE Proceedings. – 2018. – Vol. 1. – P. 434-438.

Evaluation of the multilooking effectiveness in interferometric SAR data processing

A.V. Sosnovsky¹

¹Ural Federal University, Mira st. 19, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. Interferometric coherence is an important indicator of the quality of interferograms obtained by synthetic aperture interferometric radars (InSAR), because the areas with low coherence are not suitable for interferometric data processing. The coherence value is used as a parameter for adaptive phase noise suppression algorithms. It can also be used for surface classification tasks. The paper investigates the problem of the coherence estimate reducing under the influence of the topographic phase slope and considers ways to reduce the impact of the slope on the estimate value. The paper presents a comparative efficiency analysis of four methods for coherence maps calculation used for the phase noise suppression on the interferograms by a spectral adaptive filter in interferometric data processing for the Earth's remote sensing space radar ALOS PALSAR.