

УДК 528.71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ОТ ПАРАМЕТРОВ
ОБРАБОТКИ**

**ЧАСТЬ 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ PS
ДАННЫХ РСА PALSAR/ALOS ПО ТЕРРИТОРИИ МОСКОВСКОГО
РЕГИОНА**

А. А. Феоктистов¹, А. И. Захаров², М. А. Гусев¹, П. В. Денисов¹

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО “Российские космические системы”

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Статья поступила в редакцию 20 июля 2016 г.

Аннотация. Представлены основные результаты обработки методом постоянных рассеивателей данных РСА PALSAR/ALOS по территории Московского региона. Проведена оценка влияния атмосферных факторов и параметров обработки.

Ключевые слова: метод постоянных рассеивателей, РСА, атмосферный фазовый экран, ЦММ, ALOS, PALSAR, SARscape.

Abstract. The paper presents the results of ALOS PALSAR data processing for a dataset acquired over the territory of Moscow region. In order to obtain stable measurements in the presence of high temporal decorrelation the Persistent Scatterers technique was used. We have conducted experimental studies of the potential and restrictions of PS technique applied to long temporal series of 29 SAR images obtained during 18.06.2006 - 14.02.2011 over the Moscow city territory by ALOS PALSAR instrument (L-band SAR), 23,6 cm wavelength).

One of the important results obtained was the discovery of four-fold reduction of the PS spatial density for urban territory in L-band compared with C-band SAR like as ENVISAT ASAR. The effect may be explained by the decrease of radar cross-section

of corner-like scatterers in urban territories at longer wavelengths, their respective fading and subsequent decrease of PS density.

The dependence of PS history of displacements for the targets spread across the test territory in the case of varying length K of SAR images time series was studied also. It was discovered that for $K=27, 28$ и 29 the velocities of PS displacements as well as residual heights being measured are practically the same.

To study the problem of the atmospheric phase distortions we analyzed histories of PS displacements derived using the technology of Atmospheric Phase Screen, which is calculated by SARscape software in a procedure of spatial/temporal filtering of differential interferograms from the data stack. The decrease of the PSs displacement histories correlation level was found to be typical for the PSs spaced at the distance larger than 1.5 km. At the same time high correlation level of displacement histories of densely located PSs leads to the assumption that significant amount of residual phase distortions may be associated with inaccuracy of the recovery of low-frequency spatial component of atmospheric phase screen models.

Key words: persistent scatterers technique, PS, SAR, ALOS, PALSAR, atmospheric phase screen, APS, DEM, SARscape.

1. Введение

В данной работе продолжены исследования практических возможностей метода постоянных рассеивателей с помощью его программной реализации в виде модуля PS в программном пакете SARscape. В статьях [1,2] изложены первые результаты обработки тестового набора из 25 фрагментов радиолокационных снимков территории вблизи города Лас Вегас, США, полученных радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) ASAR/ENVISAT (С-диапазон, длина волны излучения 5,6 см). Особенность обрабатывавшегося тестового массива изображений была в том, что снятая территория является полупустынной территорией (влияние атмосферных фазовых искажений и осадков предположительно относительно невелико; вследствие положительных температур снежный покров и процессы

замерзания-оттаивания, приводящие к нежелательной динамике отражающей поверхности, практически не наблюдаются).

На новом этапе нами проведены экспериментальные исследования возможностей и ограничений метода PS в случае обработки длинной временной серии из 29 радиолокационных изображений, полученных в период с 18.06.2006 по 14.02.2011 по территории г. Москвы и Московской области с помощью РСА PALSAR/ALOS (L-диапазон, длина волны излучения 23,6 см). Некоторые результаты анализа группы близко расположенных рассеивателей приведены в [3], где на примере гостиницы Дельта (район метро Партизанская) проведена оценка влияния условий измерения смещений частей корпуса гостиницы с помощью метода PS на точность измерений. Вследствие малого расстояния между постоянными рассеивателями влияние атмосферных фазовых искажений на измерения взаимного положения PS считалось несущественным [3]. В ходе анализа истории смещений группы компактно расположенных PS сделано заключение о том, что основные ошибки измерений динамики отражающей поверхности порождены: (1) ошибками в знании высоты рельефа отражающей поверхности или положения постоянных рассеивателей по высоте, (2) шумами приемной системы, (3) изменением свойств отражающей поверхности под воздействием атмосферных осадков и температуры.

В данной работе сообщается о результатах дополнительных исследований для произвольного количества PS с произвольным взаимным положением на поверхности, выполненных с использованием модуля PS программного пакета SARscape и опорной цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM V4. Ограничения, связанные с компактностью расположения анализируемых PS, здесь отсутствуют, а потому проблеме атмосферных фазовых искажений уделялось основное внимание. Исследования проводились в пределах границ тестового фрагмента размером 14x15 км². Границы области "покрытия" земной поверхности каждым из 29 снимков РСА, а также границы тестового фрагмента, показаны на рис. 1 красным цветом. Московская кольцевая

автомобильная дорога отмечена желтым цветом. Значения основных параметров алгоритмов обработки с помощью модуля PS полностью соответствуют значениям из [2].

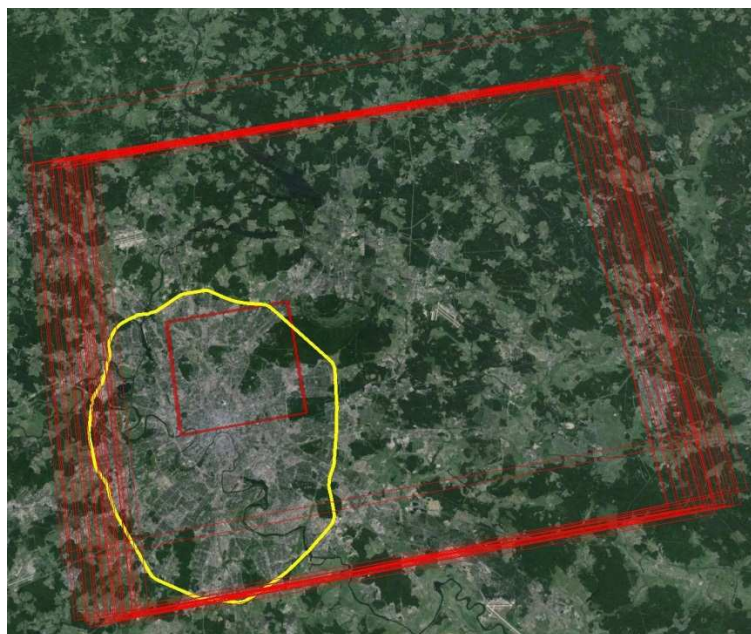


Рисунок 1 – Границы области покрытия земной поверхности изображениями PCA PALSAR/ALOS и тестового фрагмента

Замечание. Метод PS разработан для анализа постоянных рассеивателей (точечных объектов типа квазиуголковых отражателей); в рамках метода PS “работает” разреженная сетка пикселей; возможность формирования пространственно “плотных” выходных продуктов реализована в рамках метода малых базовых линий [4,5].

2. Основные результаты

На рис. 2 представлено усредненное орторектифицированное изображение тестового участка земной поверхности на северо-востоке Москвы, полученное в результате выполнения процедур расчета средних значений амплитуды

(попиксельного усреднения для серии изображений при $K = 29$, K – количество изображений в серии) и орторектификации.

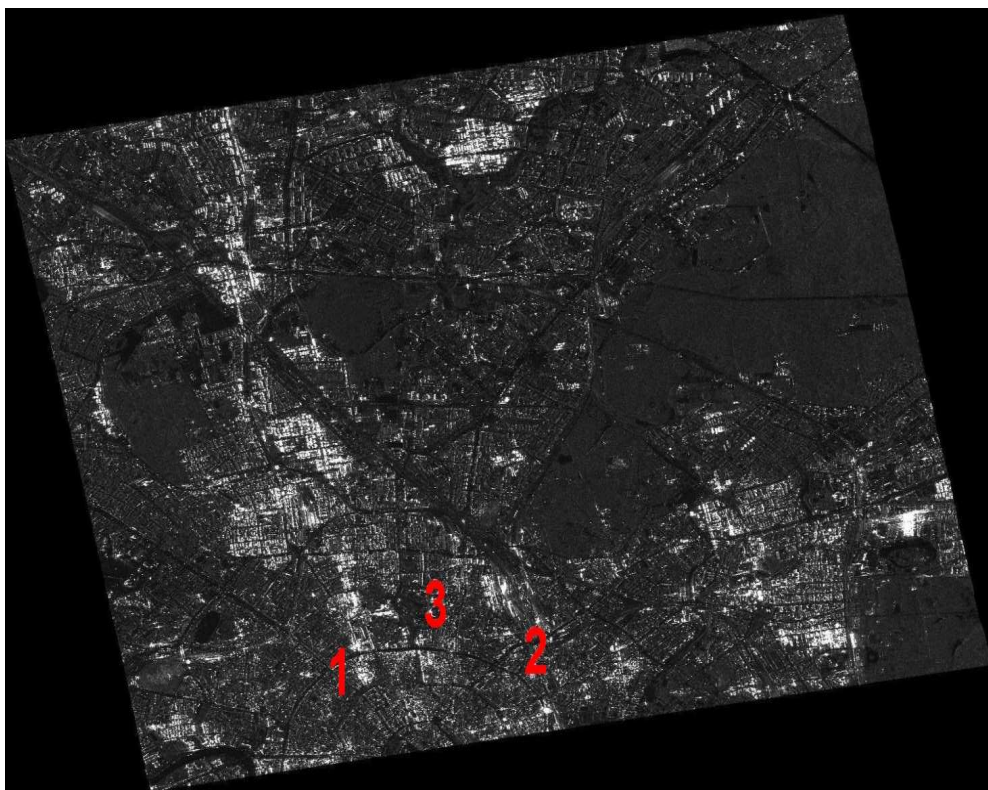


Рисунок 2 – Усредненное изображение тестового фрагмента

Один из вариантов схемы распределения массива PS при $K = 27$, полученных с помощью пакета SARscape при указанных выше параметрах обработки, приведен на рис. 3. Средняя плотность PS по поверхности в этом районе города $N_{PS} = 85 \text{ PS/км}^2$.

Замечание. При обработке набора данных PCA C-диапазона ASAR/ENVISAT (часть 2, раздел 4.2 [2]) при $K = 25$ было получено значительно более высокое значение $N_{PS} = 215 \text{ PS/км}^2$. Более высокий уровень пространственного разрешения данных PCA PALSAR/ALOS (14 м вместо 30 м у данных PCA ASAR/ENVISAT) должен был привести к дополнительному значительному увеличению N_{PS} . Обнаруженное нами падение N_{PS} до 85 PS/км^2 , по-видимому, возникло вследствие превалирующего

влияния другого фактора. Длина волны излучения PCA PALSAR/ALOS более чем в 4 раза превышает длину волны излучения ASAR/ENVISAT, что приводит к существенному снижению уровня эффективной площади рассеяния квазиуголковых отражателей типичной городской застройки, исчезновению некоторых из них и результирующему падению плотности PS.

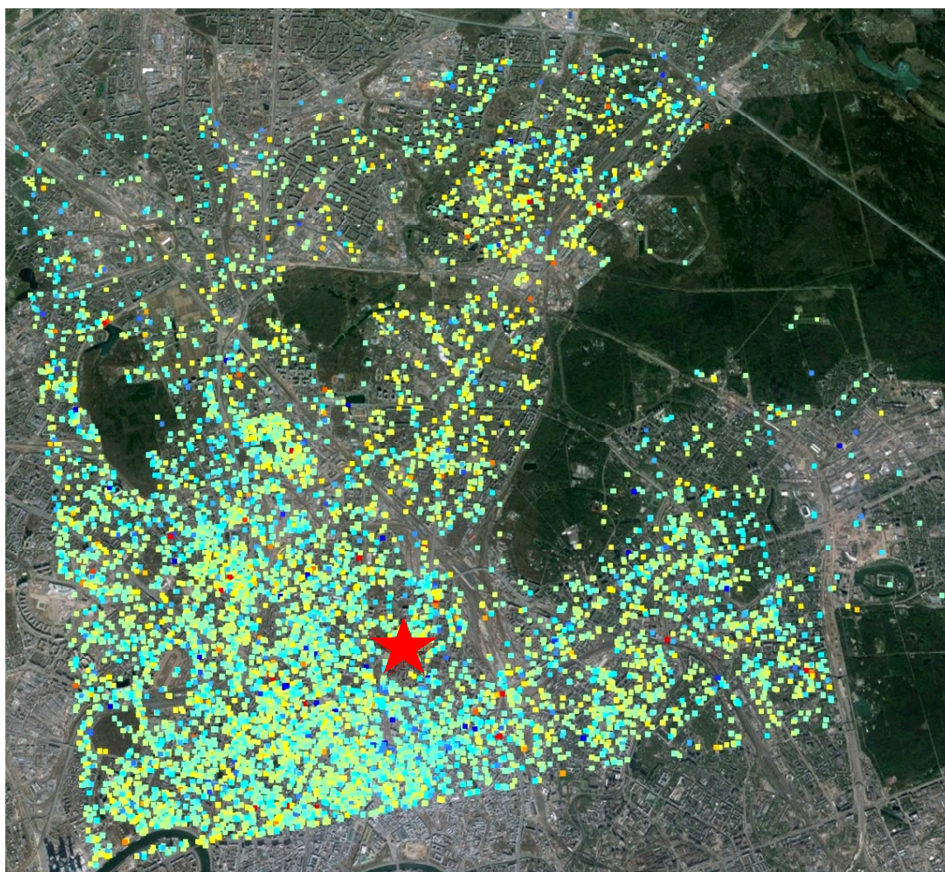


Рисунок 3 – Схема распределения PS в восточной части города

В качестве варианта 3D-визуализации расположения постоянных рассеивателей на рис. 4 представлен фрагмент схемы распределения PS в районе спорткомплекса Олимпийский (его местоположение обозначено на рис. 3 звездочкой). Данная опция должна обеспечивать однозначную идентификацию элементов инфраструктуры, соответствующих отдельным PS (путем визуального анализа с разных ракурсов; опция рекомендована для использования разработчиками программного пакета SARscape; важна при

решении задач оперативного мониторинга критически важных объектов); однако вследствие ошибок в геометрических преобразованиях текущая версия программного обеспечения работает недостаточно удовлетворительно.

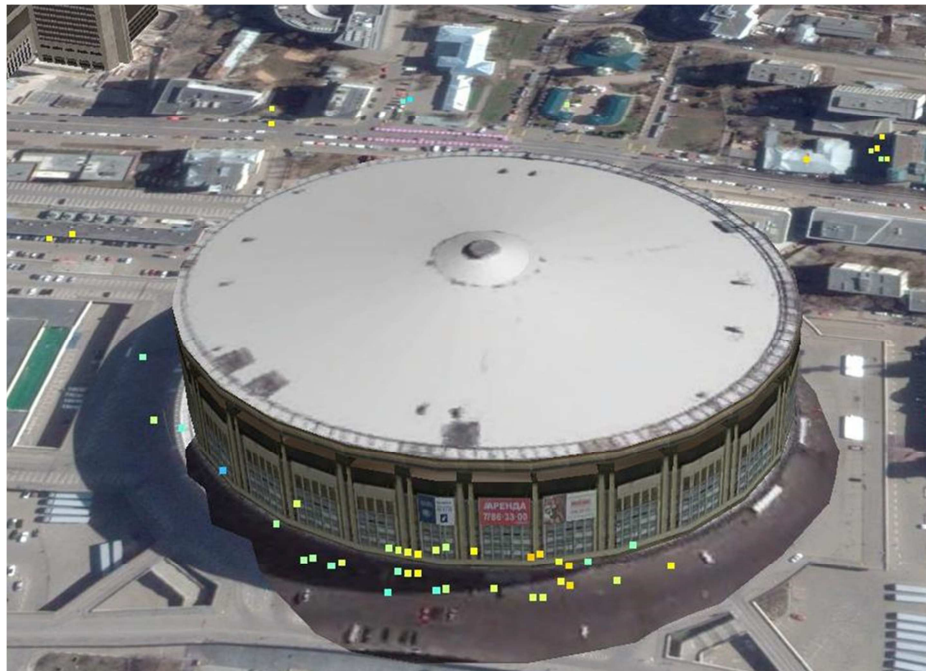


Рисунок 4 – Пример отображения в 3D-формате с использованием интерфейса Google Earth

2.1. Анализ зависимости историй смещения PS от количества изображений K

Ввиду отсутствия каких-либо результатов подспутниковых измерений значительное внимание уделено анализу относительных точностных характеристик выходных продуктов модуля PS; в полной аналогии с проведенным ранее анализом данных PCA ASAR/ENVISAT (часть 2, раздел 9.1 [2]) исследована зависимость историй смещения трех PS, взятых на разных участках тестового фрагмента, от значений одного из ключевых параметров обработки – количества изображений временной серии (история смещения – совокупность значений величин смещений, рассчитанных на момент съемки парных изображений каждой интерферометрической пары; характеристики набора данных представлены в [3]). Дислокация PS обозначена

цифрами 1,2,3 на рис. 2. Критерий выбора PS – однозначная идентификация на схемах распределения PS, рассчитанных с использованием временных серий из $K = 29, 28, 27$ изображений; при проведении обработки последовательно исключались изображения с порядковыми номерами 14 (второй этап обработки) и 2 (третий этап) [3].

2.1.1. Анализ графических зависимостей. На рис. 5 представлены графические зависимости для историй смещения трех PS для каждой из трех временных серий; зависимости построены с использованием функции линейной аппроксимации программы Excel 2010 (величины смещений из выходного файла модуля PS). Цвета – красный, зеленый, синий при $K = 27, 28, 29$, соответственно. Цветные пунктирные линии – линии регрессии (линейные аппроксимирующие зависимости); скорости смещения PS определяются тангенсами угла наклона прямых.

Необходимо отметить наличие проблем, связанных с возникновением на графиках как одиночных "выбросов", так и серий "выбросов" с экстремальным изменением значений смещения. Разности значений смещений PS в соседних отсчетах (амплитуды) экстремальных "выбросов", выделены красными звездочками, примерно равны половине длины волны излучения PСA:

$$\lambda/2 = 11,8 \text{ см} \quad (1)$$

Это является серьезным аргументом в пользу того, что причиной данного артефакта могут быть сбои в работе процедуры развертки фазы при формировании историй смещений PS (некорректно восстановленное количество компонент фазы, кратных 2π) [6].

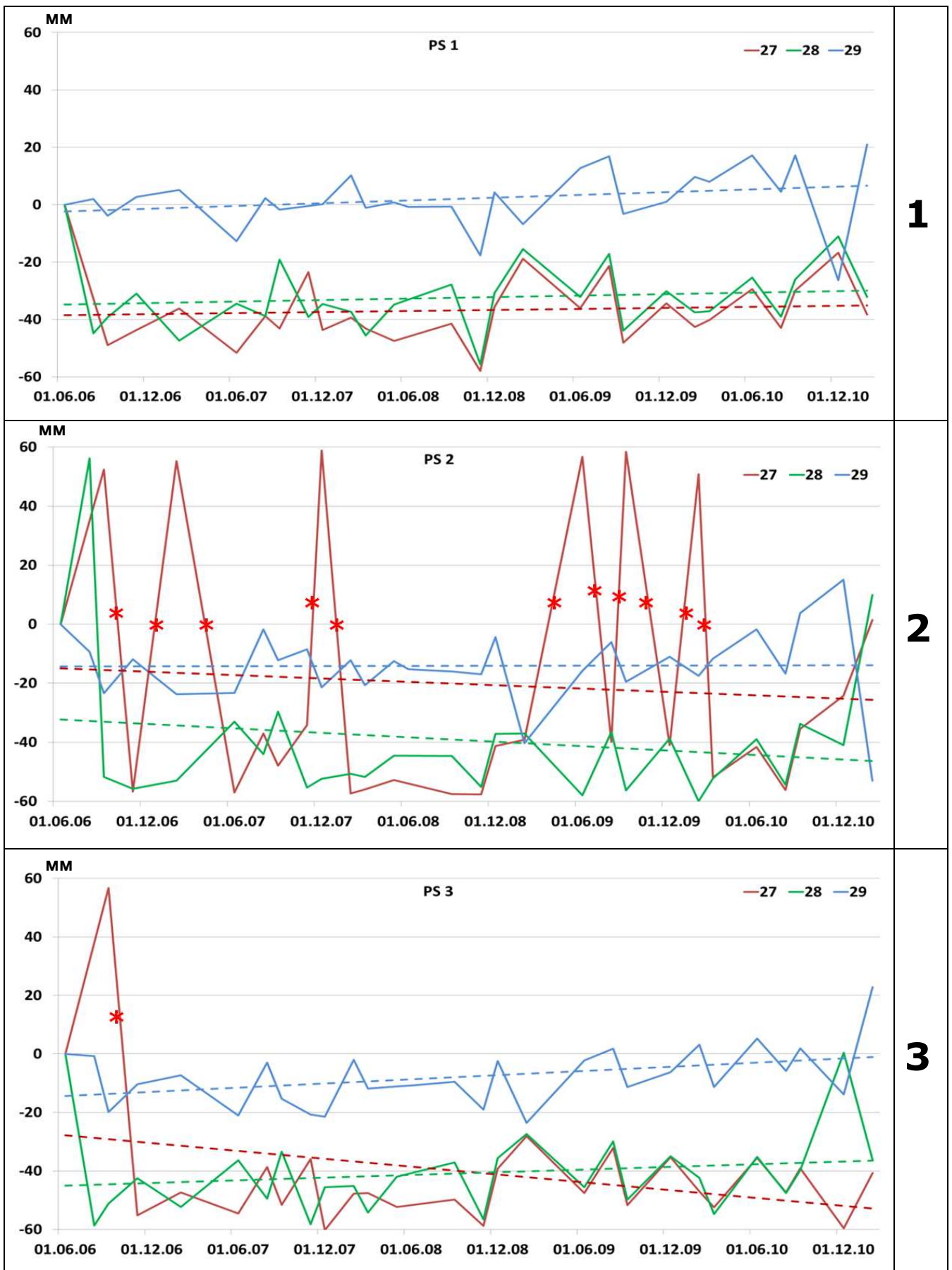


Рисунок 5 – Истории смещения трех PS для серий снимков разной длины

Замечание. Можно отметить также, что аналогичные эффекты возникали и ранее – при обработке данных PCA ASAR/ENVISAT (часть 2, раздел 9.1 [2]). Амплитуда экстремальных "выбросов" в этом случае падает примерно в четыре раза – что полностью соответствует отношению длин волн излучения PCA PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT – 5,6 и 23,6 см, соответственно.

2.1.2. *Сопоставление рассчитанных значений скорости смещений PS.* В таблице 1 (столбцы 2-4) представлены рассчитанные модулем PS значения скорости смещения трех PS для каждой из трех временных серий изображений.

Замечание. В модуле PS оценка значений скорости смещений и остаточной высоты для каждого PS проводится в рамках так называемой методики простой периодограммы, использующей исходные свернутые значения фазы (часть 1 раздел 2.1.6 [2]). По этой причине зафиксированные сбои в работе процедуры развертки фазы не сказываются на результатах расчетов – процедура формирования историй смещений PS выполняется позже.

Значения среднеквадратичных отклонений скорости смещения трех PS, CKO_V , равны 0,58; 0,38; 1,19 мм/год, соответственно; среднее значение $CKO_{V\ MEAN} = 0,71$ мм/год. Поскольку значения скорости смещения V_{PSCmin} пикселя PSC_{min} с минимальным значением индекса рассеяния амплитуды D_A для этих трех наборов оказались различными (столбец 5), выполнена "ручная" коррекция рассчитанных при $K = 29$ значений скорости смещения всех трех PS (часть 1, раздел 3 [1]). Скорректированные значения скорости смещения трех PS представлены в столбцах 6-8; значения CKO_V скорости смещения равны 0,41; 0,53; 0,84 мм/год, соответственно; среднее значение $CKO_{V\ MEAN} = 0,6$ мм/год. Таким образом, проведение коррекции привело к снижению $CKO_{V\ MEAN}$ с 0,71 мм/год до 0,6 мм/год, т.е. примерно на 16%.

Таблица 1 – Значения скорости смещений PS по данным модуля PS, мм/год

К	PS_1	PS_2	PS_3	V_{PS}Cmin	PS_1	PS_2	PS_3
1	2	3	4	5	6	7	8
27	-0,44	40,12	-1,94	-1,01	-0,44	0,12	-1,94
28	0,35	-0,62	-0,54	-1,01	0,35	-0,62	-0,54
29	0,68	-0,07	0,41	-0,17	-0,26	-0,91	-0,43
Средняя скорость	–	–	–	–	-0,12	-0,47	-0,97
CKO_V	0,58	0,38	1,19	0,48	0,41	0,53	0,84
CKO_VMEAN	0,71				0,6		

Далее также в полной аналогии с проведенным ранее анализом данных PCA ASAR/ENVISAT (часть 2, раздел 9.1 [2]) выполнены контрольные расчеты значений скорости смещений PS с использованием функции линейной аппроксимации программы Excel 2010. Предварительно в выходном файле модуля PS (со значениями смещений PS) исключены экстремальные "выбросы".

Полученные результаты представлены в таблице 2. Значения CKO_V скорости смещения PS1, PS2 и PS3 равны, соответственно, 0,34; 1,32; 0,40 мм/год. Среднее значение $CKO_{V\ MEAN} = 0,69$ мм/год. Важно отметить – значения $CKO_{V\ MEAN}$ по данным программы Excel 2010 и модуля PS оказались близкими (0,69 и 0,6 мм/год, соответственно).

Таблица 2 – Значения скорости смещений PS по данным функции линейной аппроксимации, реализованной в программе Excel 2010, мм/год

К	PS_1	PS_2	PS_3
27	2,88	3,43	1,61
28	2,74	0,80	2,34
29	3,39	2,30	1,68
Средняя скорость	3,00	2,18	1,88
CKO_V	0,34	1,32	0,40
CKO_VMEAN	0,69		

Разница между значениями средней скорости смещения PS1, PS2 и PS3 по данным Excel и SARscape (последние после "ручной" коррекции значений скорости смещения) оказалась равной, соответственно, 3,12; 2,65 и 2,85 мм/год. Это расхождение может быть объяснено двумя возможными причинами: (1) необходимостью введения порогового ограничения на амплитуду отклонения смещений PS от линии регрессии при проведении расчетов с использованием Excel и (2) различием алгоритмов расчета скорости смещений в SARscape и Excel (линейный/нелинейный; часть 2, раздел 9.1 [2]).

Априорные оценки точности расчетов ($CKO_{V APRIORY}$) значений скорости смещения PS (часть 1, раздел 2.1.5 [1] и часть 2, раздел 6 [2]) при $K = 27,28,29$ приведены в таблице 3. Можно констатировать, что: (1) среднее значение $CKO_{V MEAN}$ по данным модуля PS и Excel значительно меньше априорных оценок точности расчетов значений скорости смещения $CKO_{V APRIORY}$ (различие примерно в три раза), (2) зафиксированные различия между значениями средней скорости смещения PS1, PS2, PS3 по данным Excel и SARscape лишь незначительно превышают уровень априорных оценок точности $CKO_{V APRIORY}$.

Таблица 3 – Априорные оценки точности расчетов (CKO) значений скорости смещения PS, мм/год

K	27	28	29
$CKO_{V APRIORY}$	2,52	2,52	2,52

2.2. Анализ зависимости значений остаточных высот PS от количества изображений K

В таблице 4 представлены рассчитанные с помощью модуля PS значения остаточных высот для трех PS при $K = 27,28,29$; значения CKO (CKO_H) равны 0,96; 0,91; 1,04 м, соответственно; среднее значение $CKO_{H MEAN} = 0,97$ м. Таким образом, вариабельность значений остаточных высот PS в данном случае выросла на два порядка в сравнении с результатами проведенного ранее анализа данных PCA ASAR/ENVISAT (часть 2, раздел 9.2 [2]).

Априорные оценки точности расчетов ($CKO_{H APRIORY}$) значений остаточных высот PS (часть 1, раздел 2.1.5 [1] и часть 2, раздел 6 [2]) при $K = 27, 28, 29$ приведены в таблице 5. Можно констатировать, что среднее значение $CKO_{H MEAN}$ достаточно близко к уровню априорных оценок точности $CKO_{H APRIORY}$, превышая их примерно на 50%.

Таблица 4 – Значения остаточных высот PS, м

Набор, К	Остаточные высоты, м		
	PS 1	PS 2	PS 3
27	-12	-13,9	-5,7
28	-13,8	-13,6	-5,7
29	-12,3	-12,2	-3,9
Среднее	-12,7	-13,233	-5,1
CKO_H	0,96	0,91	1,04
$CKO_{H MEAN}$	0,97		

Таблица 5 – Априорные оценки точности расчетов ($CKO_{H APRIORY}$) значений остаточных высот PS, м

К	27	28	29
$CKO_{H APRIORY}$	0,63	0,65	0,62

2.3. Остаточные атмосферные искажения

Считается [1,2], что основной объем атмосферных фазовых искажений связан с низкочастотными пространственными компонентами, которые эффективно устраняются при проведении атмосферной коррекции с использованием атмосферных фазовых экранов (APS), рассчитываемых в рамках процедуры высокочастотной временной и низкочастотной пространственной фильтрации (при проведении расчетов использовано

задаваемое по умолчанию значение линейных размеров низкочастотного фильтра $L = 1200$ м (часть 2, раздел 2 [2]).

В данном разделе описаны результаты проведенного визуального анализа остаточных атмосферных искажений (после проведения атмосферной коррекции). Анализировались только "корректные" истории смещения; истории смещения, содержащие вызванные сбоями в работе процедуры развертки фазы экстремальные "выбросы", из рассмотрения исключены. В качестве "опорной" графической зависимости выбран график для PS1 при $K=29$ (синий график на рис 5.1). На рис. 6 представлены графические зависимости для историй смещения трех групп из шести PS. Все расчеты выполнены для временной серии из $K = 29$ изображений.

Первая группа включает рассеиватель PS1 и случайную выборку из пяти PS, находящихся в локальной окрестности PS1. Вторая группа включает PS1 и случайную выборку из других пяти PS, находящихся на расстоянии порядка нескольких сотен метров друг от друга. Наконец, третья группа кроме PS1 включает случайную выборку из пяти PS, расположенных на расстоянии порядка полутора км друг от друга (что превышает линейные размеры низкочастотного пространственного фильтра L). Графические зависимости для первой группы PS – на рис 6.1, второй – на рис. 6.2, третьей – на рис. 6.3.

Представленные на рис. 6.1 графические зависимости для историй смещений шести компактно расположенных PS характеризуются высоким уровнем коррелированности (вследствие достаточно высокого уровня "стабильности" остаточных атмосферных фазовых искажений на малых расстояниях); основные позиции на графиках, в которых этот уровень особенно высок, выделены красными звездочками.

Уровень коррелированности для PS, находящихся на расстояниях порядка сотен метров друг от друга, начинает снижаться, рис. 6.2, хотя еще можно выделить (синие звездочки) ряд позиций, в которых этот уровень достаточно высок. Причина очевидна – на этих расстояниях начинают проявляться

эффекты пространственной вариабельности остаточных атмосферных искажений. Позиции с достаточно высоким уровнем коррелированности одновременно обладают и достаточно высокой кросс-коррелированностью с соответствующими фрагментами графических зависимостей на рис. 6.1, что свидетельствует об относительно более низком уровне пространственной вариабельности атмосферных фазовых искажений на соответствующие даты съемки.

И, наконец, для PS, находящихся на расстоянии порядка полутора км друг от друга, рис. 6.3, явная коррелированность сохранилась только в двух позициях (синие звездочки), причем в этих случаях заметна кросс-корреляция с соответствующими фрагментами графических зависимостей на рис. 6.1. и 6.2. Необходимо подчеркнуть, что ситуации, когда сохраняется коррелированность для PS, находящихся друг от друга на расстояниях, превышающих линейные размеры низкочастотного фильтра L , возникают вследствие недостаточной эффективности используемой процедуры низкочастотной пространственной фильтрации.

2.4. Количественная оценка эффективности алгоритма атмосферной коррекции

При проведении количественной оценки эффективности атмосферной коррекции использован эвристический параметр – эффективность алгоритма атмосферной коррекции EFF_{ATM} , равный отношению:

$$EFF_{ATM} = \alpha \sigma_{BEFORE} / \sigma_{AFTER} \quad (2)$$

σ_{BEFOFE} – оценка среднеквадратичного отклонения (CKO) для атмосферных фазовых искажений, устраненных на этапе атмосферной коррекции:

$$\sigma_{BEFOFE} = (1/5) \sum_{i=1}^5 CKO_{APS} (i) \quad (3)$$

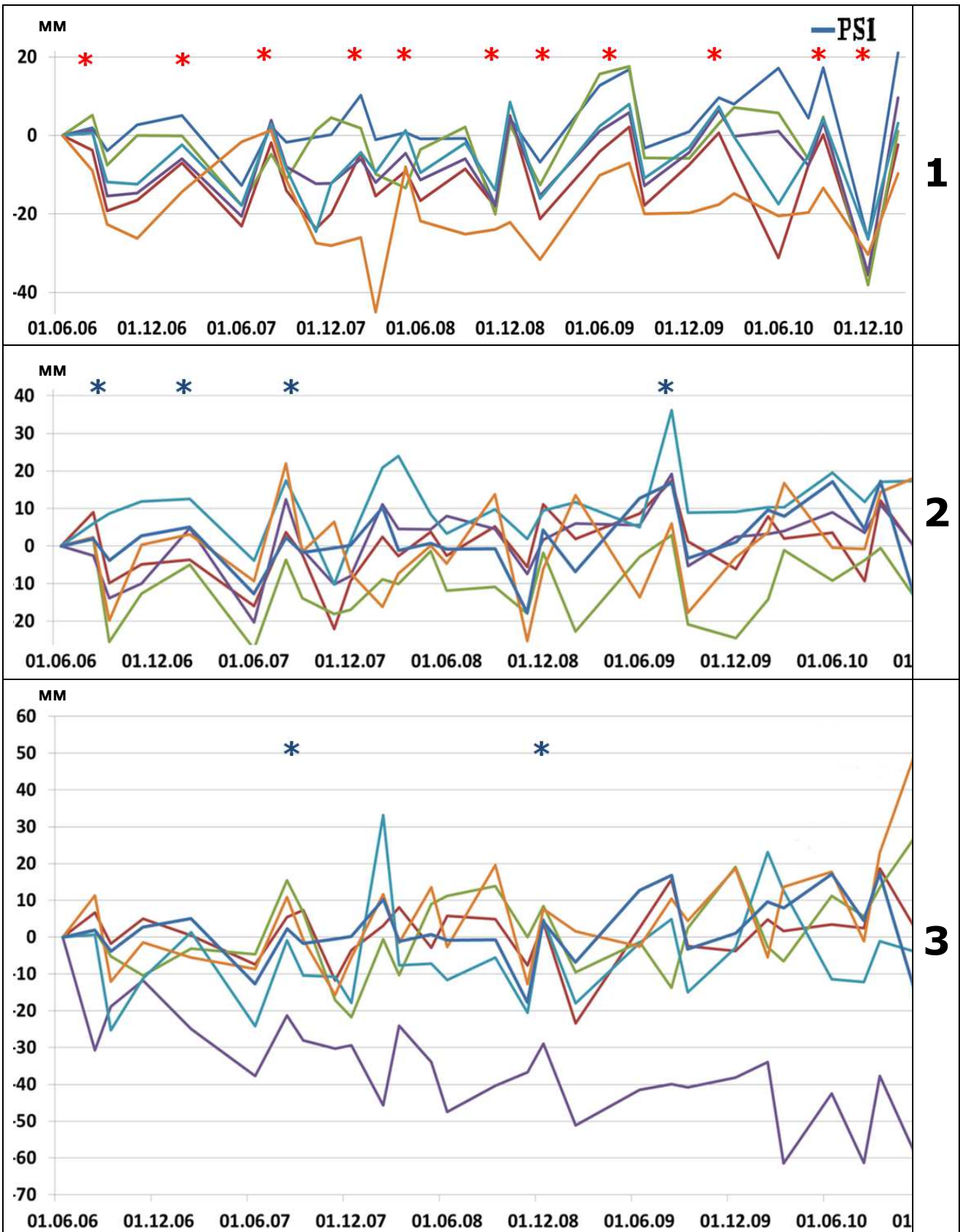


Рисунок 6 – Графические зависимости для историй смещения PS1 и трех случайных выборок PS

где $CKO_{APS}(i)$ – CKO значений фазы (в радианах) для пяти точек ($i = 1, \dots, 5$), рассчитанных по набору атмосферных фазовых экранов APS_k ; $k = 1, \dots, K$; $K = 28$. Положение пяти точек указано цифрами на рис. 7, на котором в качестве примера приведено изображение одного из атмосферных фазовых экранов (после выполнения процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации, часть 2, раздел 7 [2]); минимальное и максимальное значения фазы равны 0,22 и 1,83 рад, что согласно (4) соответствует смещениям 4,1 и 34,4 мм.

Переход от значений фазы в радианах к смещениям в мм выполнен в (1) с использованием коэффициента:

$$\alpha = \lambda/4\pi \quad (4)$$

σ_{AFTER} – CKO от линии регрессии (линейной аппроксимации смещений), мм; расчет выполнен с использованием шести "корректных" историй смещений, рис. 6.1; представляется, что формируемая оценка адекватно характеризует уровень остаточных атмосферных искажений (раздел 2.3).

Замечание. Физический смысл введенного параметра эффективности алгоритма атмосферной коррекции EFF_{ATM} предельно очевиден – он характеризует отношение (1) произведения $\alpha \sigma_{BEFORE}$, являющегося оценкой уровня ошибок в определении величин смещений PS, мм, к которым могли бы привести устраненные на этапе атмосферной коррекции атмосферные фазовые искажения и (2) величины σ_{AFTER} , являющейся оценкой уровня ошибок в определении величин смещений PS, мм, в рассчитанных трендах смещений (вызванных остаточными атмосферными искажениями, остающимися после проведения атмосферной коррекции).

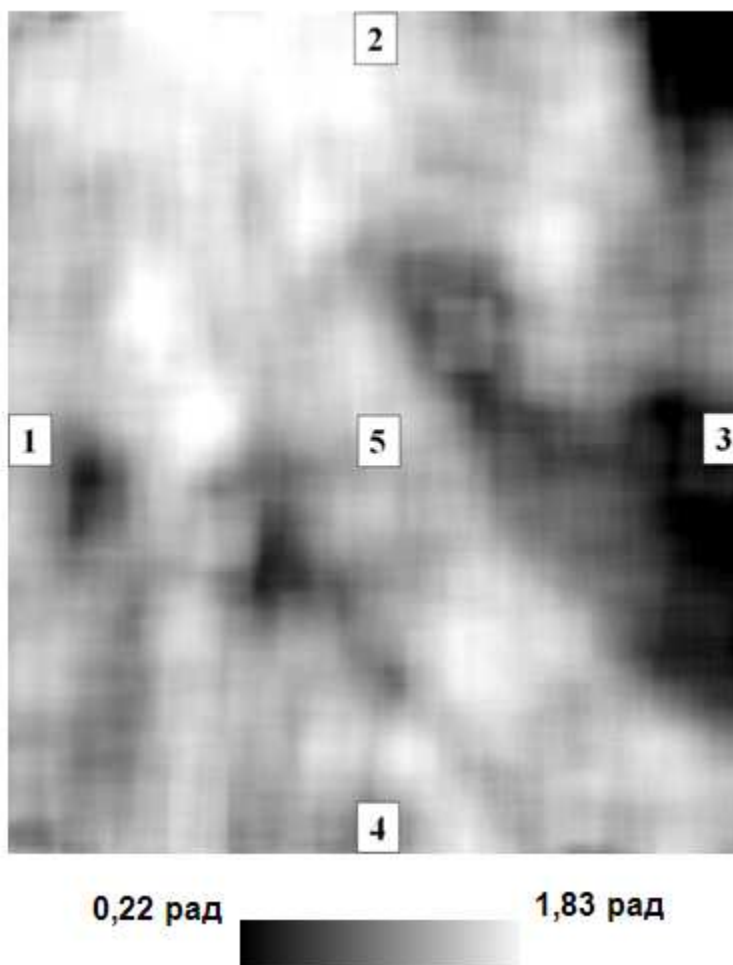


Рисунок 7 – Пример атмосферного фазового экрана PCA

Результаты проведенной количественной оценки эффективности алгоритма атмосферной коррекции представлены в первой строке таблицы 6. Для сравнения во второй строке приведены аналогичные результаты расчетов по данным ASAR/ENVISAT (часть 2, раздел 7 [2]).

Таблица 6 – Результаты оценки эффективности атмосферной коррекции

PCA	$\sigma_{AFTER}, \text{MM}$	$\sigma_{BEFORE}, \text{MM}$	EFF_{ATM}	σ_{AFTER}/λ
PALSAR/ALOS	10,37	32,57	3,14	0,045
ASAR/ENVISAT	3,41	4,46	1,31	0,061

Можно отметить два момента. Во-первых, полученные по результатам обработки данных PCA PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT значения отношения σ_{AFTER}/λ оказались очень близкими (0,045 и 0,061) – иными словами, уровень остаточных атмосферных искажений оказался близким к значению $\lambda/20$ – для обоих упомянутых PCA, длины волн которых резко различаются (5,6 и 23,6 см, соответственно). Возможно, это значение характеризует предельные возможности варианта алгоритма атмосферной коррекции, реализованного в модуле PS программного пакета SARscape. Разумеется, чтобы однозначно сделать столь серьезное заключение, необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования.

Во-вторых, следует обратить внимание на достаточно сильное различие значений параметра эффективности алгоритма атмосферной коррекции EFF_{ATM} , рассчитанных по данным PCA PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT (3,14 и 1,31). Возможная интерпретация: массив данных PCA PALSAR/ALOS получен по территории г. Москвы и Московской области, для которой характерны достаточно сильные атмосферные искажения, тогда как в тестовом массиве PCA ASAR/ENVISAT (по полупустынной территории в США) уровень атмосферных фазовых искажений должен быть существенно более низким (лишь незначительно превышая тот уровень, ниже которого алгоритм коррекции становится недостаточно эффективным).

4. Выводы

Представлены основные результаты дополнительных экспериментальных исследований практических возможностей метода PS на примере модуля PS программного пакета SARscape и данных PCA PALSAR/ALOS по территории Московского региона.

Высокий уровень коррелированности графических зависимостей для "корректных" историй смещений компактно расположенных PS позволил сделать предположение о том, что значительный объем остаточных (после проведения атмосферной коррекции) искажений связан с пространственно-

высокочастотными компонентами локальных атмосферных фазовых искажений.

Установлено, что значения отношения остаточных атмосферных искажений к длинам волн излучения PCA PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT достаточно близки – 0,045 и 0,061, соответственно (т.е. CKO остаточных атмосферных искажений примерно равно $\lambda/20$ для обоих PCA, длины волн которых существенно различаются – 5,6 и 23,6 см). Возможно, это значение характеризует предельные возможности реализованного в модуле PS варианта алгоритма атмосферной коррекции – необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Установлено также существенное различие между значениями параметра эффективности алгоритма атмосферной коррекции EFF_{ATM} , рассчитанными по данным PCA PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT (3,14 и 1,31). Возможная интерпретация – массив данных PCA PALSAR/ALOS получен по территории г. Москвы и Московской области, где характерно достаточно сильное влияние атмосферных факторов, тогда как для полупустынной территории в США (PCA ASAR/ENVISAT) характерен существенно более низкий уровень атмосферных фазовых искажений, лишь незначительно превышающий тот уровень, ниже которого алгоритм коррекции становится недостаточно эффективным.

Установлено, что наиболее вероятной причиной возникновения экстремальных "выбросов" на историях смещений PS являются сбои в работе процедуры развертки фазы на этапе формирования историй смещения PS (амплитуда выбросов равна примерно $\lambda/2$). Отмечается, что аналогичные эффекты возникали и ранее – при обработке данных PCA ASAR/ENVISAT (амплитуда экстремальных "выбросов" в этом случае падает примерно в четыре раза – что полностью соответствует отношению длин волн излучения PCA PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT).

Построены схемы распределения PS по территории тестового фрагмента; зафиксировано резкое падение средней плотности PS по сравнению с

аналогичными результатами проведенной ранее обработки данных РСА ASAR/ENVISAT. Падение плотности PS объясняется четырехкратным различием длин волн РСА PALSAR/ALOS и ASAR/ENVISAT, приводящим к соответствующему снижению уровня эффективной площади рассеяния квазиуголковых отражателей, формируемых элементами типичной городской инфраструктуры.

Опция однозначной идентификации элементов инфраструктуры, соответствующих отдельным PS, реализована в рамках процедуры 3D-визуализации (данная опция особенно важна при решении задач типа оперативного мониторинга критически важных объектов). Отмечается, что ввиду ошибок в геометрических преобразованиях текущая версия программного обеспечения работает недостаточно удовлетворительно.

В отсутствие прецизионных подспутниковых данных значительное внимание уделено анализу относительных точностных характеристик выходных продуктов; исследована зависимость историй смещения трех PS, взятых на разных участках тестового фрагмента, от значений одного из ключевых параметров обработки – количества K изображений временной серии. Проведено количественное сопоставление рассчитанных модулем PS значений скорости смещений PS с результатами контрольных расчетов с использованием функции линейной аппроксимации программы Excel 2010; показано, что зафиксированные расхождения в целом соответствуют априорным оценкам точности расчетов. Показано также, что аналогичные выводы могут быть сделаны и в отношении точности расчетов остаточных высот PS.

Литература

1. Феокистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 1. Ключевые моменты метода постоянных рассеивателей // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/5/text.html>

2. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2014. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/6/text.html>
3. Захаров А.И., Феоктистов А.А., Гусев М.А., Денисов П.В. Влияние условий проведения радарной съемки на точность измерений динамики урбанизированной территории методом постоянных отражателей. Труды VII Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» в рамках VI Всероссийских Армандовских чтений «Муром`2016». Муром, 31.05-02.06. 2016 г., Муром. Электронное издание: CD-ROM, с. 389-396.
4. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARscape и данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. Часть 1. Ключевые моменты метода // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.html>.
5. Феоктистов А.А., Захаров А. И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARscape и данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/2/text.html>.
6. Захаров А.И., Яковлев О.И, Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли. Радиолокационное зондирование поверхности // М.: КРАСАНД, 2012. – 248 С.