

## Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах PALSAR-2 по реперным эхо-сигналам опор ЛЭП

А. И. Захаров, Л.Н. Захарова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область,  
[aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)*

*На примере территории дельты реки Селенга в Бурятии исследована возможность мониторинга динамики снежного покрова и оценки его толщины по данным интерферометрической съемки радаром L-диапазона PALSAR-2. Основу метода составляет различие интерферометрической разности фаз сигналов опор ЛЭП и покрытой снегом окружающей равнинной поверхности. Анализ наземных метеоданных показал, что существует пропорциональная связь измеряемого различия фаз сигналов с толщиной снежного покрова, что позволяет измерять его толщину.*

*The capacity of SAR differential interferometry to monitor snow covers and to measure snow depth using PALSAR-2 data acquired over Selenga river delta in Buryatia was studied. The technique is based on the comparison of interferometric phase discrepancy between signals scattered from power line towers top and surrounding plain area covered with snow. An analysis of meteorological data from local weather stations reveals direct relation of the phase discrepancies mentioned with snow cover depth; that provides the basis for snow cover depth measurements.*

Дифференциальная радарная интерферометрия – известный способ выявления динамики отражающей поверхности и трассы распространения сигнала. Неизвестная начальная фаза на дифференциальной интерферограмме вносит систематику в измерения динамики, а потому обязательным является использование заведомо стабильного реперного объекта, обеспечивающего калибровку фазовых измерений.

В данной работе сделана попытка выявить методами радарной интерферометрии процесс накопления снега на обширных равнинных территориях в дельте реки Селенги в период с конца 2014 – по начало 2015 года и сделать оценку его толщины. В качестве стабильных реперных отражателей выбраны опоры ЛЭП в районе поселка Каменск (см. снимок ЛЭП на рис. 1).



Рис.1. Опоры ЛЭП вблизи населенного пункта Каменск, Бурятия

Экспериментальный материал в данной работе - данные японского космического РСА L-диапазона PALSAR-2 (длина волны  $\lambda=22.9$  см), проводившего съемку территории дельты Селенги в период с октября 2014 года по январь 2015 г. Используются снимки, полученные на согласованной горизонтальной поляризации. Угол падения радиоволн РСА  $\theta=31^\circ$ , наклонная дальность до центра кадра  $r_n=750$  км, расстояние между пикселями по наклонной дальности  $\delta r=4.3$  м, расстояние между пикселями по азимуту  $\delta az=2.9$  м. Пример радиолокационного изображения серии из 9 опор и интерферограммы приведен на рисунках 2 и 3. Спутник находится слева от изображения и движется в вертикальном направлении. Белые горизонтальные полосы – изображения опор ЛЭП с рис 1. Имеет место заворот изображения опоры по дальности – сигнал вершины опоры имеет меньшее запаздывание, чем сигнал основания и находится ближе к радару. Средняя длина изображения опоры 8-10 пикселей, что дает оценку высоты верхних отражающих элементов опоры 30-35 м.

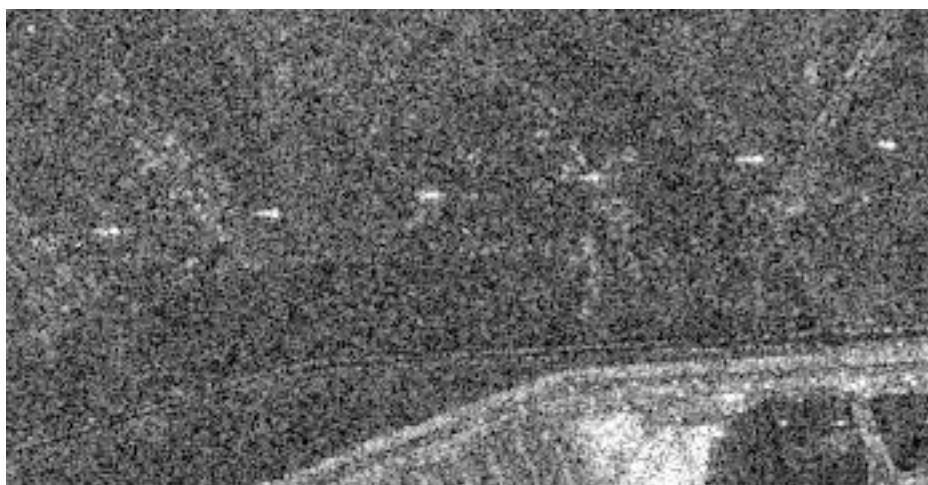


Рис. 2. Амплитудное изображение серии опор ЛЭП в съемке 24 ноября 2014 г.

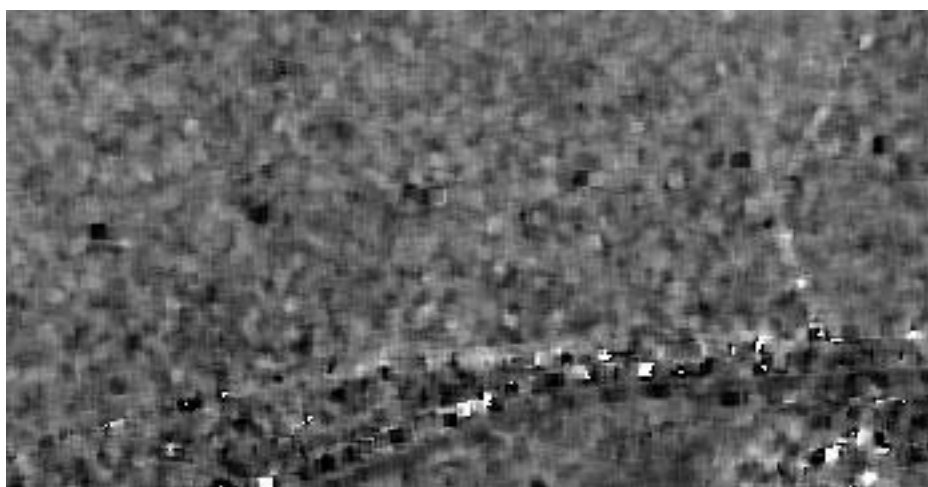
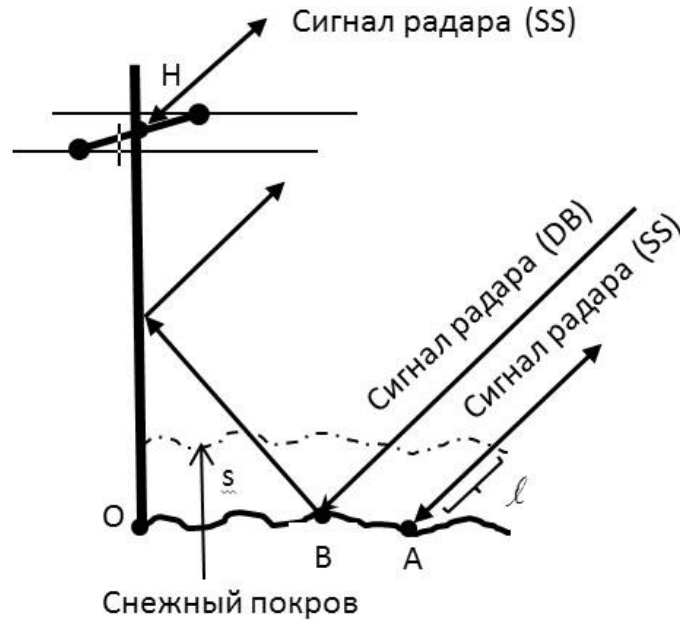


Рис. 3. Интерферограмма по данным съемки 24 ноября 2014 г. и 8 декабря 2014 г.

Эхо-сигнал вершины опоры – сигнал с однократным рассеянием (отражение в точке Н на схеме рис. 4), сигнал нижней части опоры вплоть до земли – сигнал с двойным

переотражением (отражение в точке В). Анализ поляриметрических данных спутника ALOS-1 для этих ЛЭП подтверждает работу именно этих механизмов рассеяния.



**Рис. 4.** Схема отражения сигнала радара элементами конструкции опоры ЛЭП

Заметим, что поскольку вертикальная часть конструкции опоры вместе с горизонтальной поверхностью почвы работает как двугранный уголкоый отражатель, отраженные отрезком ОВ сигналы имеют одинаковое запаздывание, совпадающее с запаздыванием сигнала точки О. По этой причине область точки О на изображении выглядит более яркой. Изображенный прерывистой линией снежный покров глубиной  $s$  влияет на условия прохождения сигнала, отраженного в точках А и В, приводя к приращению кажущейся дальности. Выпавший за время между съемками за время между повторными съемками снег приводит к появлению дополнительного фазового набега на интерферограмме в точках А и В, что может быть выявлено при сравнении фаз в этих точках с фазой сигнала в точке Н. На рис. 3 темные пиксели относительно светлого окружения в нашей схеме обработки сигналов означают меньшее значение фазы и соответственно меньшую дальность до фазового центра рассеяния в точке Н по сравнению с окружающей поверхностью. Существенно, что такое смещение разности фаз сигналов верхушек опор относительно основания и земной поверхности появляется в холодное время года при условии выпадения снега за время между съемками и не наблюдается летом.

Согласно [1], интерферометрическая разность фаз на радарных интерферограммах  $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$  является функцией  $\Delta\varphi_i(\Delta h)$  вариаций рельефа поверхности  $\Delta h$  или топографической фазой, мелкомасштабных площадных смещений поверхности (динамика поверхности)  $\Delta\varphi_d$  за время между съемками, атмосферных флуктуаций электрической длины пути сигнала радара  $\Delta\varphi_a$ , шумов приемной системы  $\Delta\varphi_n$  и неизвестной начальной разности фаз  $\Delta\varphi_0$ . Добавим компоненту, описывающую влияние снежного слоя  $\Delta\varphi_s$ :

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_i + \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_0. \quad (1)$$

В случае съемок PALSAR-2 интерферометрическая база практически всегда мала (менее 500 м), потому топографической компонентой фазы сигнала верхушки опоры можно пренебречь. Динамика поверхности – морозное пучение или просадки поверхности, одинаковые для всех 13 исследуемых далее опор маловероятны, они не наблюдаются, а потому фазой также  $\Delta\varphi_d$  также можно пренебречь. Атмосферными эффектами можно пренебречь потому, что размеры тестового участка с опорами ЛЭП невелики, меньше характерных размеров тропосферных неоднородностей. Поскольку в анализе далее будут использованы разности фаз вершины опоры и окружающей поверхности  $\Delta\varphi_{12s} - \Delta\varphi_{12g}$ , начальную фазу  $\Delta\varphi_0$  также можно исключить из рассмотрения. Запишем увеличение длины пути сигнала в слое снега как

$$\Delta l_{12s} = \frac{\Delta\varphi_{12s} - \Delta\varphi_{12g}}{4\pi} \lambda. \quad (2)$$

Материалом для оценки  $\Delta\varphi_{12s} - \Delta\varphi_{12g}$  являются интерферометрические пары снимков PALSAR-2, перечисленные в таблице 1. Здесь для 13 опор приведены приращения длины пути сигнала  $\Delta l$  в снежном слое.

**Таблица 1. Приращения длины пути сигнала  $\Delta l$ , см, в снежном слое около 13 опор ЛЭП.**

N сеанса	Дата съемки	Пара	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	141022	1	0.1	0.6	0	-0.2	0.1	0.2	-0.4	0.1	-0.2	-0.7	-0.1	0.24	-0.6
2	141105		0.1	0	0.3	-0.2	0.5	0.2	-0.1	0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	0.2
4	141124	3	1.6	1.3	2.3	2.4	1.9	2.1	1.6	2.9	2.0	1.8	2.0	2.0	1.8
5	141208		3.4	3.2	3.2	3.1	3.2	2.4	2.6	3.1	2.9	3.6	2.6	3.6	2.7
6	141222	5	0.1	0.1	1.1	0.9	0.9	0.8	1.3	1.3	0.9	1.3	1.2	0.9	1.0
7	150119		0.1	0.1	1.1	0.9	0.9	0.8	1.3	1.3	0.9	1.3	1.2	0.9	1.0

Сведения о погоде на интервал времени 01 октября 2014 – 28 февраля 2015 даны на графике рис. 5. На интервале съемки первой пары (начиная с дня 22) среднесуточная температура чаще всего была отрицательной. С 14 ноября 2014 года (день 42) до конца февраля она всегда была отрицательной. Постоянный снежный покров установился и продолжал монотонно расти, начиная с 19 ноября (день 51). По данным таблицы, на первом интервале (интервал съемки первой пары) приращение длины пути в среднем равно -0.1 см, на втором 0.1 см, на третьем 2.1 см, на четвертом 3.3 см, на пятом 1.2 см. Интегральное приращение длины на интервалах 3-5 (даты 24 ноября 2014 г. – 19 января 2015 г.), покрывающих весь период накопления снега с начала зимы 2014-2015 г.,  $\Delta l = 6.6$  см. График интегрального приращения длины пути в снежном слое для 13 опор ЛЭП приведен на рис. 6.

Нами также проводились измерения приращения длины пути сигнала при использовании эхо-сигналов с двойным переотражением путем подстановки в формуле (2)

вместо фазы сигнала с однократным рассеянием  $\Delta\varphi_{12S}$  фазы сигнала с двойным переотражением  $\Delta\varphi_{12D}$ . Как и ожидалось, эти приращения в среднем равны нулю, здесь они не приводятся.

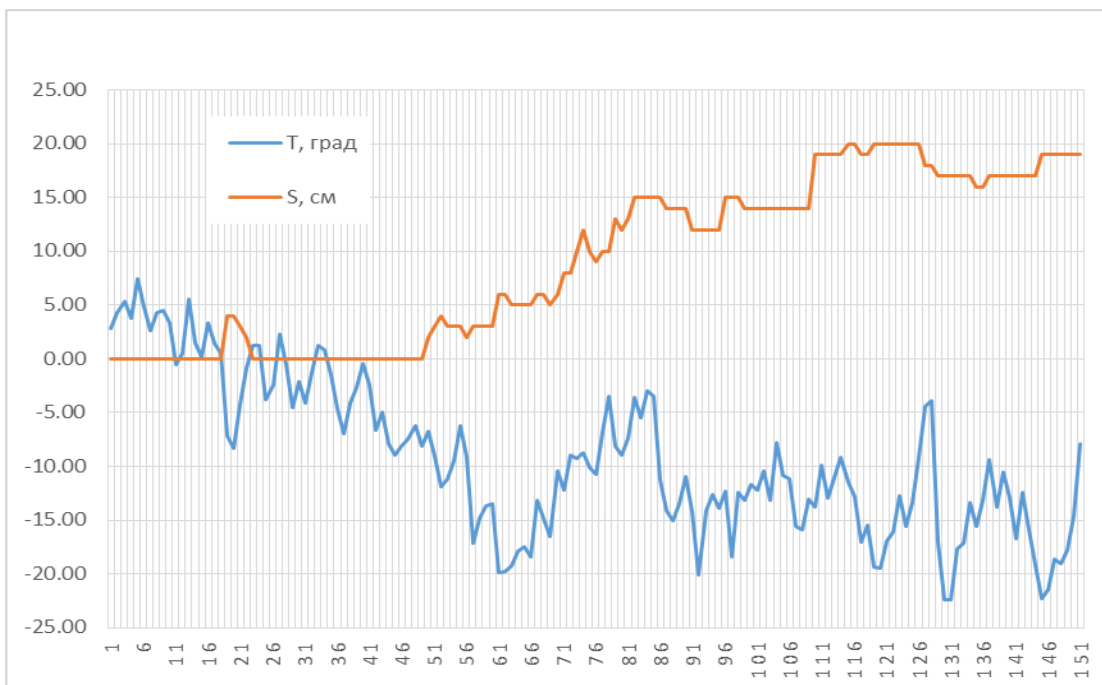


Рис. 5. Толщина снежного покрова, см, и температура, град, в период с 1 октября 2014 г. по 28 февраля 2015 г. по данным наземной метеостанции Кабанска [2]

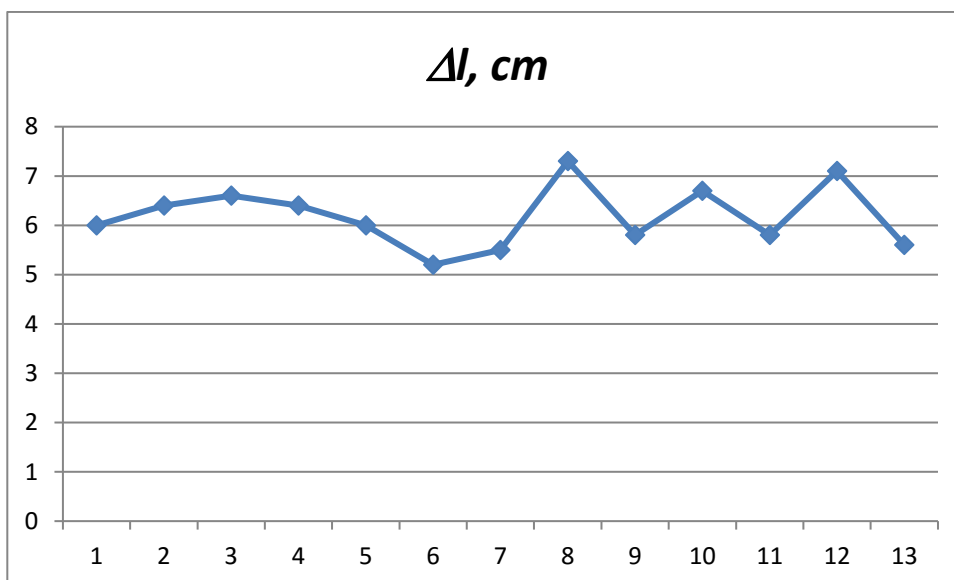


Рис. 6. Приращение длины пути сигнала в слое снега по измерениям с использованием эхо-сигналов 13 опор ЛЭП в период 19 ноября 2014 г. - 19 января 2015 г.

Как известно, приращение длины пути сигнала в слое снега может быть связано с толщиной снежного покрова [3]. Используя связь между приращением односторонней длины пути и толщиной снежного покрова  $s$  из [3,4], запишем

$$s = -\frac{\Delta l}{(\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_s - \sin^2\theta})}. \quad (3)$$

Диэлектрическая проницаемость сухого снега  $\varepsilon_s$  связана с его плотностью  $\rho_d$  следующим соотношением [4]:

$$\varepsilon_s = 1 + 1.6\rho_d + 1.86\rho_d^3.$$

При более вероятной к середине зимы плотности  $\rho_d=0.25$  диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_s=1.53$ . Тогда толщина снежного покрова, вычисленная по формуле (3), равна 26 см, что близко к данным наземной метеостанции Кабанска. Наблюдаемое отличие может быть вызвано уплотнением снега в течение зимы, вследствие чего плотность снега должна быть больше 0.25.

Необходимо отметить, что полученное в данной работе одностороннее приращение длины пути 6.6. см на 2-месячном интервале времени больше половины интервала неоднозначности, равной 5.7 см. Следовательно, максимальный период между съемками интерферометрической пары должен быть несколько меньше, так, чтобы прирост односторонней длины пути сигнала в слое выпавшего снега не превышал половины интервала неоднозначности 5.7 см. Это требование является ещё более жестким в случае использования данных радаров С и Х- диапазонов с более короткой длиной волны.

## Выводы

Радиолокационная интерферометрия является эффективным средством мониторинга снежного покрова, позволяя измерять его толщину и водный эквивалент снега.

Данные радаров L-диапазона могут быть предпочтительнее других частотных диапазонов вследствие более высокой временной стабильности отраженных сигналов, а также большего интервала неоднозначности в измерениях приращения длины пути сигнала из-за выпадения снега за время между интерферометрическими съемками.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (научный проект №15-29-06003). Авторы признательны JAXA за данные PALSAR, предоставленные по проекту RA2 № 102.*

## Литература

1. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.:КРАСАНД, 2012. 248 с.
2. [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Кабанске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Кабанске)
3. Guneriussen, T., Høgda, K. A., Johnsen, H., Lauknes, I., InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow// IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 39(10), October 2001, pp. 2101–2108.
4. Leinss S., A. Wiesmann, J. Lemmetyinen, I. Hajnsek, Snow water equivalent of dry snow measured by differential interferometry// IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol. 8, no. 8, Aug. 2015, pp. 3773–3790.