

Использование интерферометрической когерентности по данным полнополяриметрического РСА для классификации земных покровов

Л.Н. Захарова

*Институт радиотехники и электроники РАН
141190 Московская обл., Фрязино, пл. Введенского, 1
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

Работа иллюстрирует возможности синтеза методов радиолокационной поляриметрии и интерферометрии для проведения классификации земных покровов. Приведены основные понятия новой отрасли дистанционного зондирования — поляриметрической интерферометрии. Проведена обработка данных РСА SIR-C (L- и С-диапазоны, 1994 год) и PALSAR (L-диапазон, 2006 год) по территориям юго-восточного Прибайкалья и по Подмосквью. Для анализа результатов привлечены наземные данные по обоим регионам. Предложена формула, показывающая взаимосвязь вектора поляризации и параметров эллипса поляризации. Проведено сравнение результатов работы двух поляриметрико-интерферометрических методов классификации для различных частотных диапазонов и периодов повторения орбит.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) в последнее время показали себя мощным средством исследования Земли из космоса. Регистрация полной матрицы рассеяния, используемая одновременно с интерферометрической схемой съёмки, открывает новые возможности для изучения отражательных свойств земных покровов методами поляриметрической интерферометрии.

Поляриметрические РСА позволяют регистрировать полную матрицу рассеяния. Расширение потока информации до четырёх каналов предоставляет широкие возможности для интерпретации данных, изучения отражательных свойств различных типов земных покровов, автоматической классификации данных дистанционного зондирования [1]. Организация съёмок с повторяющихся траекторий носителя — необходимое условие для того, чтобы стала возможной интерферометрическая обработка радиолокационных данных. РСА-интерферометрия зарекомендовала себя в последние годы как полезный инструмент для построения карт рельефа высокого разрешения, а также для оценки мелкомасштабных смещений поверхности [2, 3].

Появление данных поляриметрических РСА, пригодных для интерферометрической обработки, привело к возникновению новой отрасли дистанционного зондирования — поляриметрической интерферометрии [4], которая включает в себя не только возможность одновременного использования методов поляриметрии и интерферометрии, но и совершенно новые методики обработки данных, позволяющие извлекать принципиально новую информацию об отражающей поверхности. Особенно интересными выглядят исследования отражения радиосигнала от объёмных сред — растительности [5], снежного/ледового слоя [6].

Поляриметрическая интерферометрия: основные понятия

Поляриметрическая интерферометрия [4] расширяет возможности обычной (скалярной) интерферометрии. Для проведения интерферометрической обработки необходимо иметь два изображения одного и того же участка на земной поверхности, снятые с двух несколько различающихся в пространстве позиций при локально параллельных траекториях носителя. Расстояние между точками съёмками называется базой интерферометра, а комплексная величина

$$\gamma = \frac{\langle z_1 z_2^* \rangle}{\langle z_1 z_1^* \rangle \langle z_2 z_2^* \rangle} \quad (1)$$

(угловые скобки означают пространственное усреднение, а z_1 и z_2 — коэффициенты обратного рассеяния, полученные с первой и второй позиции соответственно) традиционно называется ин-

терферометрической когерентностью, и по смыслу является дополнительной к степени декорреляции изображений. Одним из центральных понятий скалярной интерферометрии и является комплексная когерентность. При этом предполагается, что поляризация обоих изображений одна и та же (однополяризационная съёмка). Классическая (скалярная) интерферометрия имеет множество приложений, главными из которых являются построение цифровых карт рельефа и оценка динамики снимаемой поверхности.

Полнополяриметрическая съёмка позволяет регистрировать полную матрицу рассеяния для каждого элемента изображения, и это не только в четыре раза увеличивает количество данных, но и даёт возможность вычисления элементов матрицы рассеяния в любом поляризационном базисе. Таким образом, для любой комбинации поляризаций на передаче и приёме появляется возможность величину обратно рассеянного сигнала. При этом может быть реализована аналогичная схема съёмки с близких параллельных орбит носителя. Если рассматривать формулу (1) с учётом выбора любой поляризации для z_1 и z_2 , она же является и формулой поляриметрической (векторной) когерентности. Если поляризации при съёмке с первой и второй позиций не совпадают, в величину интерферометрической когерентности привносится «поляризационная» составляющая, отвечающая степени декорреляции между разными поляризационными каналами. Анализ векторной когерентности и составляет предмет поляриметрической РСА-интерферометрии.

Заметим, что единичная по модулю когерентность означает, что изображения полностью коррелированы, и, напротив, нулевая когерентность говорит о полной декорреляции изображений. В последние годы появилось множество исследований, посвящённых векторной когерентности: оптимизация когерентности, моделирование значений поляриметрической когерентности для рассеяния в объёмном слое, анализ геометрической формы области когерентности.

Сигнатуры когерентности

Поляризационная сигнатура когерентности — это график зависимости модуля интерферометрической когерентности от параметров эллипса поляризации (углов эллиптичности и ориентации). Таким образом, каждой точке изображения (а точнее, окружающей её области) можно поставить в соответствие график — сигнатуру когерентности. Некоторые примеры сигнатур когерентности, а также их количественные характеристики приведены в [7, 8, 9].

По форме построенного графика можно судить о том, какая комбинация поляризаций обеспечивает максимально возможную корреляцию изображений. Проанализировав основные источники декорреляции и выявив основную её причину (при съёмках с повторяющихся орбит такой причиной является, как правило, временной фактор), можно делать выводы о влиянии поляризации на рассматриваемый источник декорреляции.

Ключевым наблюдением, на котором основаны излагаемые результаты, является следующее: форма графика сигнатуры когерентности зависит от типа рассеивающей поверхности. Под «формой» здесь понимается взаимное расположение максимумов и минимумов графика и его экстремальных линий.

Прежде чем перейти к обсуждению сигнатур для конкретных типов поверхностей, остановимся на некоторых общих свойствах сигнатур когерентности, взяв для примера случай согласованных поляризаций.

На первый взгляд, сигнатуры когерентности напоминают классические поляризационные сигнатуры, в которых по вертикальной оси откладываются значения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Как правило, профиль линейной поляризации (то есть, сечение, соответствующее нулевому углу эллиптичности) находится выше остальных частей графика, а профили круговых поляризаций — напротив, ниже. Это объясняется снижением отношения сигнал-шум при возрастании модуля угла эллиптичности. Максимальные и минимальные значения когерентности при нулевом угле эллиптичности обыкновенно приходятся на вертикальную (угол ориентации равен 90°) и/или горизонтальную (угол ориентации 0° и 180°) линейную поляризацию.

Области когерентности

При построении сигнатур когерентности в расчёт принимается только абсолютная величина интерферометрической когерентности. Однако фазовая составляющая когерентности несёт не менее важную информацию. Например, построение карты высот интерферометрическим способом основано на использовании разности фаз двух изображений; линейная модель когерентности для объёмного рассеяния (в слое растительности), позволяющая одновременно оценивать высоту растительности и рельеф почвы [5], также учитывает фазовую информацию.

Метод построения областей когерентности [10] заключается в изображении на комплексной плоскости значений когерентности в данной точке для всех возможных поляризаций. В связи с непрерывной зависимостью когерентности от параметров эллипса поляризации эти значения накрывают некоторую компактную область. Поскольку модуль когерентности не превосходит единицы, результирующая область располагается внутри круга единичного радиуса с центром в начале координат.

При вычислении векторной когерентности традиционно используют следующие обозначения и соотношения [4].

$$\gamma = \frac{\langle w_1^* \Omega_{12} w_2 \rangle}{\sqrt{\langle w_1^* T_{11} w_1 \rangle \langle w_2^* T_{22} w_2 \rangle}},$$

где матрицы $\Omega_{12} = k_1 k_2^*$, $T_{11} = k_1 k_1^*$, $T_{22} = k_2 k_2^*$ вычисляются при помощи векторов k_1 и k_2 , которые являются результатом векторизации матриц рассеяния

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

первого и второго изображения, а нормированные векторы w_1 и w_2 отвечают выбранным поляризационным состояниям [4].

Для того, чтобы установить связь этих векторов с параметрами эллипса поляризации, используем поляризационное отношение

$$\rho = \frac{\cos 2\chi \sin 2\psi + i \sin 2\chi}{1 + \cos 2\chi \cos 2\psi},$$

где χ — угол эллиптичности, а ψ — угол ориентации.

При переходе к некоторым поляризационным состояниям А и С, характеризуемым поляризационными соотношениями ρ_A и ρ_C соответственно, первая строка новой матрицы рассеяния выглядит следующим образом:

$$\frac{S_{HH} - (\rho_A^* + \rho_C^*)S_{HV} + \rho_A^* \rho_C^* S_{VV}}{\sqrt{(1 + |\rho_A|^2)(1 + |\rho_C|^2)}} \quad \frac{\rho_A S_{HH} + (1 - \rho_C^* \rho_A)S_{HV} - \rho_C^* S_{VV}}{\sqrt{(1 + |\rho_A|^2)(1 + |\rho_C|^2)}}.$$

Теперь, воспользовавшись тем фактом, что компоненты матрицы рассеяния связаны с векторами k и w простым соотношением $S_{xx} = (w, k^*)$, для линейного базиса

$$k = \begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2}S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix}$$

векторы w вычисляются по формулам

$$w_{\text{copol}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\rho_A - \rho_C \\ \rho_A \rho_C \end{bmatrix} \text{ и } w = \begin{bmatrix} \rho_A^* \\ 1 - \rho_A^* \rho_C \\ \rho_C \end{bmatrix},$$

а для базиса Паули, часто используемого в работах по поляриметрической интерферометрии, в котором вектор k выглядит следующим образом:

$$k = \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix},$$

зависимость компонент вектора w от параметров эллипса поляризации такова:

$$w_{\text{copol}} = \begin{bmatrix} 1 + \rho_A \rho_C \\ 1 - \rho_A \rho_C \\ -\rho_A - \rho_C \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} \rho_A^* - \rho_C \\ \rho_A^* + \rho_C \\ 1 - \rho_A^* \rho_C \end{bmatrix}.$$

Для лёгкости восприятия приведены значения не нормированных векторов w .

Классификация

Как было отмечено в разделе, вводящем поляризационные сигнатуры когерентности, они имеют различную форму в зависимости от типа подстилающей поверхности. На рис. 1 приведены типичные сигнатуры когерентности для поля, леса, городских застроек и водной поверхности.

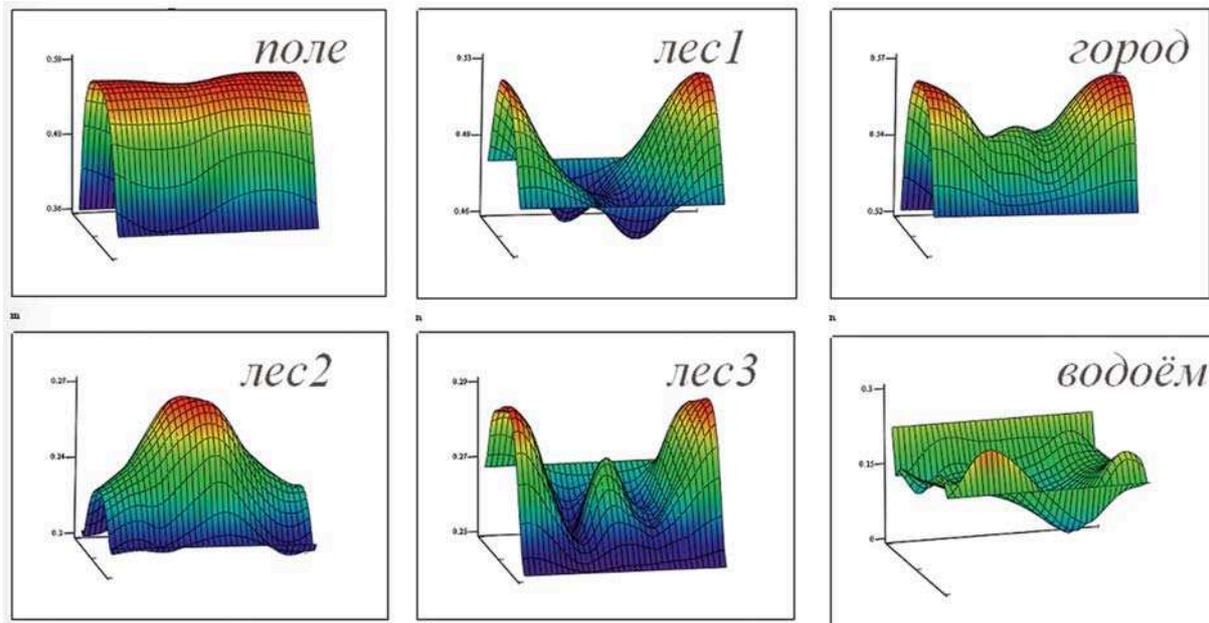


Рис. 1. Сигнатуры когерентности для разных типов поверхности

Как видно из рисунка, лес показывает наибольшую вариабельность сигнатур когерентности. Пример двухчастотных данных радиолокатора SIR-C с временным интервалом 2 суток показывает, что тип сигнатуры когерентности для леса зависит от частотного диапазона: если в L-диапазоне любая лесная территория даёт сигнатуру вида «лес1» (см. рис.1), то в C-диапазоне встречаются все три типа лесных сигнатур. Однако причина этого заключается не в самой величине частоты сигнала, а в степени её влияния на когерентность. Чем ниже частота, тем менее чувствительна когерентность к мелкомасштабным изменениям рассеивающей поверхности. Аналогичным образом, при увеличении интервала между съёмками возрастает разнообразие типов сигнатур когерентности.

При этом вне зависимости от частотного диапазона и интервала между съёмками другие типы поверхности демонстрируют повторяемость формы сигнатур когерентности. Таким образом, на основе сигнатур когерентности может быть выполнена классификация подстилающих покровов. Пример такой классификации приведён на рис. 2.

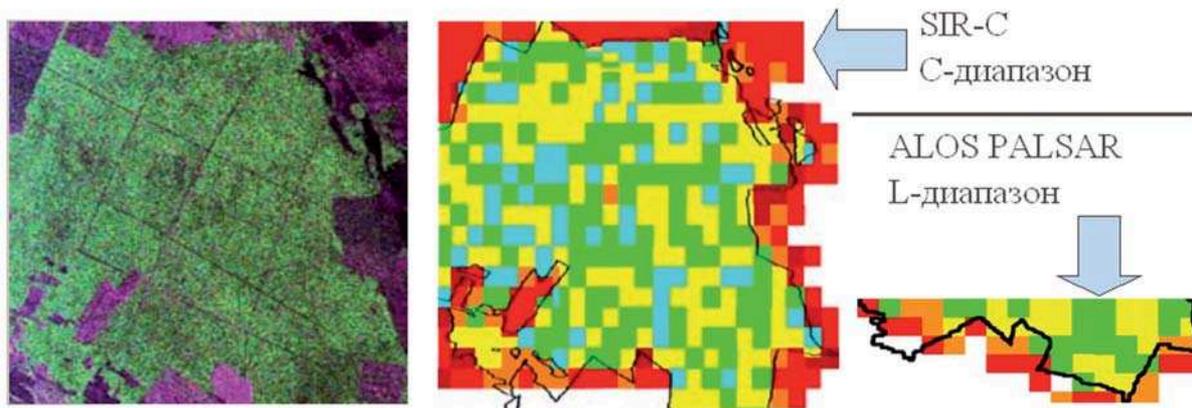


Рис. 2. Изображение окрестностей леса у села Истомино и классификация земных покровов на основе сигнатур когерентности

Красный цвет на карте классификации соответствует полю, жёлтый, голубой и зелёный — лесу (лес1, лес2 и лес3 на рис. 1, соответственно), оранжевый — переходный тип сигнатуры с признаками леса и поля (редколесье либо зоны, включающие в себя оба типа поверхности), чёрной линией показана граница леса, полученная по рисунку слева (изображение в псевдоцвете, где интенсивность красного, зелёного и синего соответствует поляризационным каналам HH, HV и VV). Правый фрагмент классификации выполнен по данным PALSAR (центральный — по данным SIR-C). Легко увидеть, что граница леса снова хорошо прослеживается, однако расположение лесных жёлтых и зелёных квадратиков изменилось. Это означает, что изменение длины волны и временного интервала оказывает различное влияние на вид сигнатуры когерентности.

Области когерентности, как правило, имеют вид эллипса. Как и сигнатуры когерентности, они имеют ряд характерных особенностей для поверхностей разного типа. Так, для поля область когерентности имеет форму эллипса, вытянутого в радиальном направлении (размах до 0.5), однако и с заметной малой полуосью, в отличие от областей когерентности для урбанизированных территорий, почти всегда имеющих форму почти вырожденного в отрезок эллипса. Радиальный размах достигает 0.4–0.5, тогда как перпендикулярный диаметр эллипса очень мал. Область когерентности для леса очень компактна, с небольшой главной полуосью (менее 0.1). Форма бывает как эллиптическая, так и почти круглая. И, наконец, для водных поверхностей область когерентности имеет неправильную форму и включает в себе начало координат.

Сравнение классификации двумя разными методами снова, как и в случае с двумя разными сенсорами, показывает хорошее совпадение результатов на границе леса и поля (более восьмидесяти процентов), и заметные различия в классификации леса (совпадение в 50–60% случаев). Следовательно, в отношении леса ключевыми параметрами для двух приведённых методов являются различные характеристики растительности, что позволяет, объединив эти методы, добиться более тонкой и полной классификации, чем при использовании их по отдельности. При этом, в то время как для метода сигнатур когерентности существует предположение о том, что лес1 и лес2 различаются главным образом плотностью растительности [8], вопрос о физических свойствах леса с областями когерентности различного вида остаётся открытым для дальнейших исследований.

Заключение

Работа посвящена двум методам классификации радиолокационных изображений земной поверхности, использующим векторную когерентность. Различные способы визуализации векторной когерентности (сигнатуры когерентности и области когерентности) демонстрируют согласованную классификацию грубого типа (лес/поле/город/вода). Лесные массивы, являясь средой, для которой характерно объёмное рассеяние сигнала, иллюстрируют различия в результатах работы

двух методов. В работе выделены несколько видов сигнатур и областей когерентности на комплексной плоскости, соответствующих различным типам подстилающих покровов, проведено сравнение данных С- и L-диапазона, сравнение пар интерферометрических сеансов с разницей между съёмками 2 и 46 суток. Проиллюстрирована способность каждого из методов служить основой для классификации, проанализированы причины их рассогласованной работы на лесных территориях.

Литература

1. *Boerner W.-M. et al.* Chapter 5 “Polarimetry at Remote Sensing” in the Manual of Remote Sensing. 3rd Edition, ASPRS publishing, Bethesda, MD, 1997.
2. *Massonet D. et al.* The displacement fields of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // *Nature*, 1993. Vol. 364. P.138–142.
3. *Strozzi T. et al.* Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy // *Proceedings of IGARSS’2000*. Honolulu, USA. 2000.
4. *Cloude S.R., Papathanassiou K.P.* Polarimetric SAR Interferometry // *IEEE Trans.on Geoscience and Remote Sensing*, 1998. Vol. 36, N5. P.1551–1565.
5. *Papathanassiou K.P., Reigber A., and Cloude S.R.* Vegetation and ground parameters estimation using polarimetric Interferometry. Parts I, II. // *Proc. of ESA CEOS Workshop*, 1999. Toulouse, France. 1999.
6. *Dall J., Papathanassiou K., and Skriver H.* Polarimetric SAR Interferometry applied to land ice. First result // *Proc. IGARSS’2003*, Toulouse, France. 2003.
7. *Захарова Л.* Применение методов поляриметрической интерферометрии для исследования вертикальной структуры леса // *Труды XXII Симпозиума по радиолокационному зондированию природных сред*. Санкт-Петербург, 2004.
8. *Захарова Л.* Сигнатуры когерентности в поляриметрической интерферометрии для классификации земных покровов // *Радиотехника*, 2005. №8.
9. *Zakharova L.* Polarimetric coherence signatures for land cover classification // *Proc. 28th URSI General Assambly*, 2005, New-Delhi, India. 2005.
10. *Flynn T., Tabb M., Carande R.* Coherence region shape extraction for vegetation parameter estimation in polarimetric SAR interferometry // *Proc. IGARSS’2002*. Toronto, Canada. 2002.