

Особенности принципа взаимности радиолокационных изображений HV и VH радаров с синтезированной апертурой земной поверхности

А.А.Калинкевич¹, Б.Г.Кутуза¹, В.Ю.Манаков², Д.П.Егоров¹, В.А.Плющев²

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корпус 7.

E-mail: kalinkevich@cplire.ru

²Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»
121170, г.Москва, Кутузовский проспект, 34.

E-mail: mail@vega.su

Выполнен анализ использования космической поляриметрической съемки земной поверхности с помощью РСА для измерения фарадеевского угла поворота плоско поляризационного электромагнитного излучения на трассе спутник-Земля-спутник и калибровки радара. Показано, что технические характеристики РСА, перемещение радара во время съемки, особенности отражения электромагнитных волн от шероховатой земной поверхности, а также мелкомасштабные неоднородности ионосферы влияют на результаты сопоставления радиолокационных изображений на HV и VH поляризациях. В результате встает вопрос о точности измерения угла поворота плоскости поляризации сигнала РСА из-за эффекта фарадея, необходимого для калибровки линейно поляризованной поляриметрической РСА с помощью методик, предлагаемых советскими и зарубежными специалистами при выполнении радиолокационной съемки с борта космического аппарата в длинноволновом диапазоне. Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, технические характеристики радара, скорость носителя, ионосфера Земли, фарадеевский угол поворота плоскостиполяризации

Features of the reciprocity principle of HV and VH synthesized aperture radar images of the Earth's surface

A.A. Kalinkevich¹, B.G. Kutuza¹, V.Yu. Manakov², D.P.Egorov¹, V.A. Plyushchev²

¹Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.

²“Vega” Radio Engineering Group of Companies.

The analysis of the use of space polarimetric survey of the Earth's surface using the SAR for measuring the Faraday angle of rotation of plane-polarizing electromagnetic radiation on the satellite-Earth-satellite route and radar calibration is performed. It is shown that the technical characteristics of SAR, the radar movement during the survey, the features of reflection of electromagnetic waves from rough ground surface, as well as small-scale inhomogeneities of the ionosphere affect the results of mapping the radar images on HV and VH polarizations. As a result, the question arises about the accuracy of measuring the angle of rotation of the plane of polarization of the SAR signal due to the Faraday effect required for calibration of linearly polarized polarimetric SAR using the methods proposed by Soviet and foreign specialists when performing radar surveys from the spacecraft in the long-wave range. Keywords: synthetic aperture radar, radar specifications, Earth's ionosphere, Faraday angle of rotation of the polarization plane.

Введение

В данной работе рассматриваются вопросы, которые в значительной степени относятся к анализу результатов космических радиолокационных съемок с помощью поляриметрических космических РСА, работающих в длинноволновом диапазоне. Однако при анализе результатов поляриметрической съемки земной поверхности радарными, размещенными на борту самолетных носителей, возникают аналогичные вопросы. При выполнении исследований отражения от поверхности Земли, различных объектов с

помощью радиолокационных поляриметрических комплексов предполагается, что выполняется принцип **взаимности**, т.е. радиолокационное отражение от поверхности земли на HV и VH поляризациях идентичны. Данное предположение основывается на выводах работы [1,2]. Если в экспериментах кросс поляризационные измерения оказываются не идентичными, то этот эффект связывают с тем, что характеристики канала на прием и излучение для тракта H поляризации отличаются от характеристик для тракта V поляризации. При дальнейшем рассмотрении эти различия учитываются. Отметим, что авторы данной работы не обладают информацией о подтверждении принципа взаимности для летающих радиолокационных комплексов. Теоретическое моделирование отражения (с участием некоторых авторов данной работы) в случае возможного переотражения электромагнитного излучения от элементов исследуемого объекта, расположенных на расстояниях превышающих десятки длин волн, на данном этапе исследований показывает, что принцип взаимности для таких случаев требует дополнительных исследований.

Представим, что РСА космического базирования излучает волну линейной поляризации. Это излучение в ионосфере Земли можно представить в виде двух волн круговой поляризации: обыкновенной и необыкновенной. Так как скорости распространения этих волн в ионосфере различаются, на входе приемного устройства между ними возникает разность фаз. Эта разность фаз соответствует углу поворота плоскости поляризации линейно поляризованной волны (фарадеевский угол поворота) излучаемого электромагнитного излучения. В работах [3,4] рассматриваются вопросы, касающиеся угла поворота плоскости поляризации сигнала РСА в ионосфере из-за эффекта фарадея. В частности, знание угла поворота плоскости поляризации за счет фарадеевского вращения необходимо для калибровки линейно поляризованной поляриметрической РСА, размещенной на борту космического аппарата в длинноволновом диапазоне.

Проблемы отражения ЭМИ от поверхности Земли

В случае использования поляриметрической РСА на космическом носителе авторы [3,4] предложили оценивать фарадеевский угол поворота плоскости поляризации посредством анализа экспериментальной комплексной матрицы измерений в линейном поляризационном базисе для различных комбинаций горизонтальной (h) и вертикальной (v) поляризаций сигнала на излучении и приеме

$$S = \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{pmatrix}.$$

Различие в радиолокационных изображениях на HV и VH поляризациях авторы [3,4] связывают:

- а) с аппаратными искажениями (с различными техническими характеристиками h и v трактов РСА);
- б) с искажениями, возникающими при распространении электромагнитных волн на участке спутник-Земля;
- в) с искажениями, связанными с геометрией съемки. В конечном итоге они по результатам измерения компонент матрицы предложили:

1. Методику по компенсации разницы характеристик трактов радиолокатора на h и v поляризациях;
2. Предположили, что, в конечном счете, соблюдается принцип взаимности отражения от земной поверхности. В матрице отражения от поверхности Земли L

$$L = \begin{pmatrix} L_{hh} & L_{hv} \\ L_{vh} & L_{vv} \end{pmatrix}, \text{т.е. предположили } L_{hv} \equiv L_{vh};$$

3. Предположили, что из-за невзаимности среды распространения сигнала фарадеевский угол поворота при распространении сигнала от ИСЗ до поверхности Земли и обратно удваивается.

Однако при отражении электромагнитной волны от шероховатой диэлектрической поверхности возникают особенности [5,6], которые могут повлиять на интерпретацию результатов РСА. Для примера рассмотрим использование отражения круговой поляризации от металлической поверхности и от трехгранного уголкового отражателя. Из-за обратимости фазы при отражении происходит изменение направления вращения круговой поляризации на противоположное. При этом фарадеевский угол поворота плоскости поляризации на трассе МКС-Земля-МКС действительно был бы равен удвоенному значению. В тоже время для случая двугранного уголкового отражателя обратимости фазы не происходит, и при обратном распространении должна происходить компенсация поворота на трассе спутник-Земля. Модель отражения от шероховатой земной поверхности можно представить в виде набора трехгранных и двугранных уголкового отражателей, имеющих различные размеры.

Трехгранные уголкового отражатели при отражении не меняют плоскость поляризации. Но так как кросс поляризация компонента в реальности имеет место, к модели поверхности необходимо добавить набор двугранных уголкового отражателей, у которых ребра повернуты на угол α относительно плоскости распространения. При этом матрица отражения от них будет иметь вид

$$S = S_0 \begin{pmatrix} \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) \\ \sin(2\alpha) & -\cos(2\alpha) \end{pmatrix}$$

и при $\alpha = \pm 45^\circ$ вид матрицы будет

$$S = S_0 \begin{pmatrix} 0 & \sin(2\alpha) \\ \sin(2\alpha) & 0 \end{pmatrix}.$$

В зависимости от количества и размеров уголкового отражателей и значения угла α , угол поворота плоскости поляризации сигнала на входе приемника РСА при прохождении через ионосферу на трассе МКС-Земля-МКС может отличаться от удвоенного значения, как предполагают авторы [3,4].

Принцип взаимности в матрице L также может нарушаться из-за того, что совокупная матрица рассеяния формируется за два этапа: на первом этапе излучается сигнал на горизонтальной поляризации (H), а приемное устройство осуществляет регистрацию на горизонтальной и вертикальной поляризации; на втором этапе излучается сигнал на вертикальной поляризации (V), принимаются сигналы как вертикальной, так и горизонтальной поляризации, т.е. радиолокационные изображения на HV и VH получаются в разное время с интервалом T (периоду посылки импульсов). За это время летательный аппарат перемещается на расстояние $L = \nu T$, где ν - скорость носителя. Если величина пролета по трассе превышает величину разрешающей способности станции, то комплексные радиолокационные изображения на HV и VH поляризациях будут независимыми, и поднимать вопрос об измерении фарадеевского угла поворота плоскости плоско поляризованного излучения не имеет смысла. Кроме того, сигналы, соответствующие HV и VH поляризациям, проходят через разные мелкомасштабные флуктуации неоднородности ионосферы. Таким образом, вычисление фарадеевского угла поворота плоско поляризованной волны по результатам измерения матрицы отражения

спрадиолокационного изображения зависит от скорости движения носителя РСА, от спектра мелкомасштабных неоднородностей ионосферы [5,6], технических характеристик построения РСА.

Формирование РЛИ

Информация, получаемая из радиолокационного зондирования, формируется на основе электромагнитных сигналов, комплексных по своей природе. При использовании РСА комплексное радиолокационное изображение состоит из реальной и мнимой компонент изображения. Только после некоторой обработки оно представляется в удобном для нас формате, как правило, в формате амплитуды и интенсивности (см. рис.1).

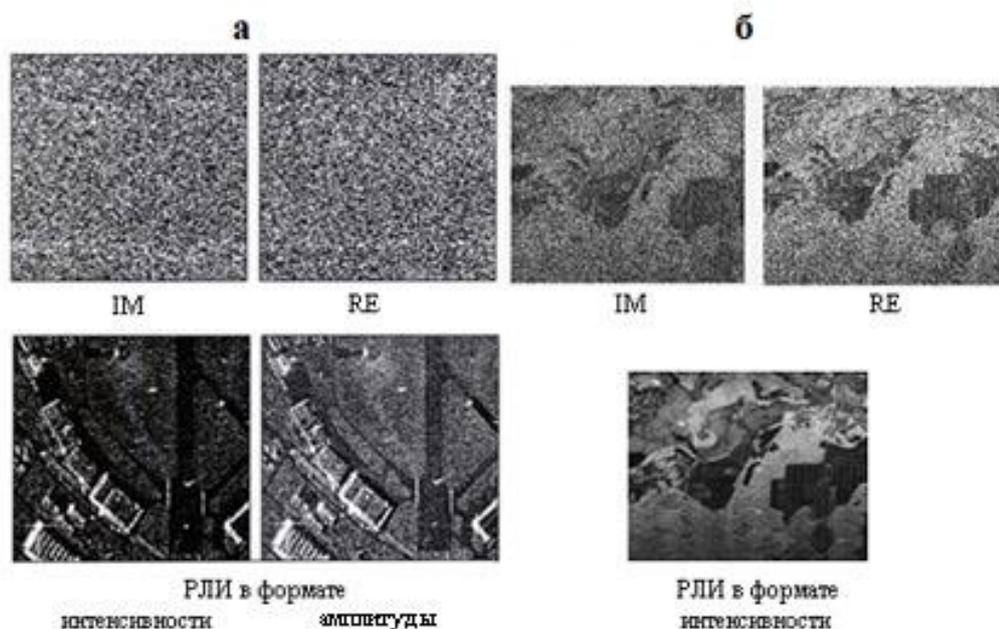


Рис.1. Реальная и мнимая компоненты РЛИ изображения участка земной поверхности; РЛИ в формате амплитуды и интенсивности после обработки реальных и мнимых изображений (а – из работы [7,8], б – полученное в наших экспериментах).

Как отмечается в [7], в реальных и мнимых компонентах РЛИ изображения трудно увидеть полезную информацию. Однако комплексные компоненты позволяют получить РЛИ в формате амплитуды рис. 2а, а также РЛИ в формате фазы рис.2б.

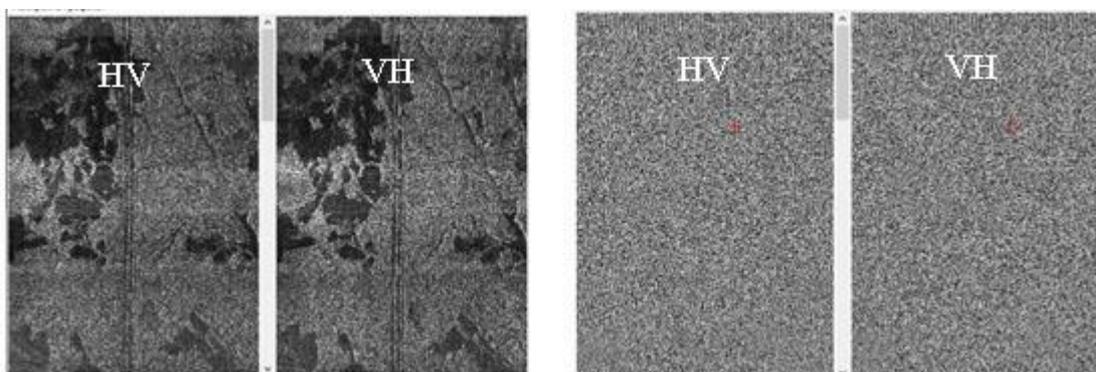


Рис.2. а) РЛИ в диапазоне Рна HV и VH поляризациях в формате амплитуды; б) РЛИ в диапазоне Рна HV и VH поляризациях в формате фазы.

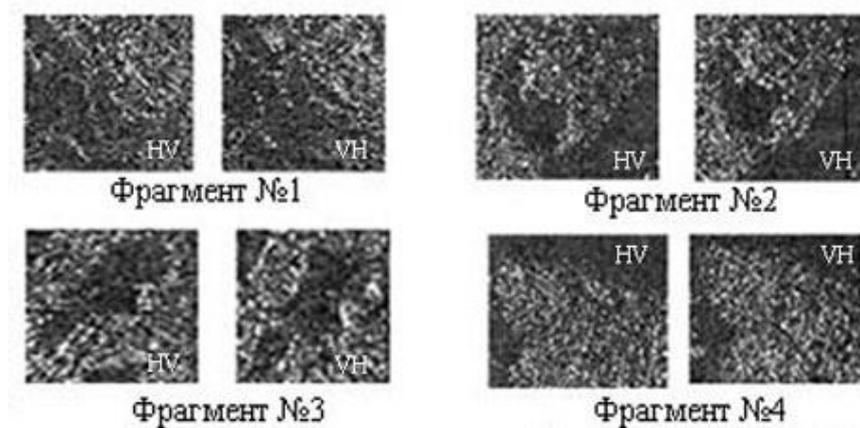


Рис. 3. Фрагменты РЛИ в Р диапазоне сняты одновременно в одном заходе на HV и VH с интервалом, равным периоду повторения зондирующих импульсов.

На первый взгляд РЛИ как в формате амплитуды, так и фазы на HV и VH поляризациях идентичны и, можно сказать, взаимны. Однако внимательное рассмотрение показывает, что РЛИ на HV и VH поляризациях в формате амплитуды не идентичны. В качестве примера на рис.3. для сравнения представлены одни и те же фрагменты РЛИ Р диапазона, снятые одновременно в одном заходе на HV и VH с интервалом, равным периоду повторения зондирующих импульсов.

Заключение

Анализ формирования радиолокационных изображений поверхности Земли с помощью РСА длинноволнового диапазона из космоса показывает, что реальная величина фарадеевского угла поворота плоскости поляризации линейно поляризованного излучения на трассе спутник-Земля-спутник более сложная, чем описывается в работах [3,4]. Основным сдерживающим фактором проверки правильности теоретических исследований является то, что до настоящего времени не было ни одного космического эксперимента с помощью длинноволновой РСА. При этом следует обратить внимание на необходимость создания наземных полигонов, оборудованных не только трехгранными и двугранными уголковыми отражателями, но специальной радиотехнической аппаратурой, работающей совместно с РСА [6]. При использовании самолетных поляриметрических РСА отсутствуют фарадеевский поворот плоскости поляризации линейно поляризованного сигнала, эффекты связанные с неоднородностью ионосферы. Основными факторами для нарушения принципа взаимности матрицы обратного отражения предположительно должны являться неидентичность трактов H и V каналов радара, величина перемещения носителя за интервал времени получения изображений HV и VH (периода посылок сигналов на H и V поляризациях). И основным неясным вопросом остается: "Выполняется ли принцип взаимности на HV и VH поляризациях при отражении от шероховатых поверхностей?".

Основной недостаток работ авторов [3,4] по данному направлению заключается в том, что теоретические рассуждения выполняются в отрыве от условий выполнения съемки, возможных особенностей отражения электромагнитного излучения от земной поверхности и технических характеристик радиолокационной аппаратуры.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках госзадания по теме 0030-2019-0008 "Космос".

Литература

1. Фельд Я.Н. Теорема взаимности в электродинамике для неустановившихся процессов. Док.Акад.Наук СССР, 1943, Том 41, №7, С.294-297.

4. Фельд Я.Р. Теоремы и задачи нестационарных процессов электродинамики. Радиотехника и электроника 1993, №1, С.38-48.
5. A.Freeman. Calibration of Linearly Polarimetric SAR Data Subject to Faraday Rotation. IEEE Tran. Geosci. and Rem. Sensing, Vol.42, No 8, P.1617-1624.
6. Арманд Н.А., Захаров А.И. Применение радаров с синтезированной апертурой для измерения угла поворота плоскости поляризации из-за эффекта фарадея. Радиотехника и электроника, 2006, Т.51, №10, С.1210-1217.
7. Масюк В.М., Кутуза Б.Г., Манаков В.Ю., Плющев В.А., Калинин А.А. Деструктивное влияние ионосферы Земли на работу РСА Р-диапазона // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]/Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2020». Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020. С.238-244. URL: http://www.mivlgu.ru/conf/armand2020/sbornik-2020/section_3.html.
8. Калинин А.А., Масюк В.М., Кутуза Б.Г., Манаков В.Ю., Плющев В.А. Пути компенсации влияния ионосферы Земли на качество синтезированных радиолокационных изображений // Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]/Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2020». Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020. С.245-250. URL: http://www.mivlgu.ru/conf/armand2020/sbornik-2020/section_3.html.
9. Frey A.C., Freitas C.C., Santanna S.J.S., Renno C.D. Statistical Properties of SAR Data and their Consequences. Seminar of the United Nations Programme on Space Applications, 10:53-62, 1999.
10. Калинин А.А., Крылова М.С., Масюк В.М., Манаков В.Ю. О новом подходе построения бистатической радиолокации, предназначенной для обзора земной поверхности с неподвижных носителей. // Труды VIII Всероссийской конференции «РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОСВЯЗЬ» (Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН) 24-26 ноября 2014. С.169-173.