

К вопросу интерпретации радиолокационных изображений лесных массивов на поляризациях HV и VH

А.А. Калинин¹, Б.Г. Кутуза¹, В.Ю. Манаков², Д.П. Егоров¹, В.М. Масюк¹, В.А. Плющев²

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

E-mail: kalinkevich@cplire.ru, kutuza@cplire.ru, e-mail@compute.su

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

E-mail: mail@vega.su

В научной литературе по радиолокации априорно предполагают, что отражения от земных подстилающих поверхностей на VH и HV взаимны (т.е. комплексные величины отраженных сигналов на VH и HV поляризациях $A_{VH}^* - A_{HV}^* = 0$). Соблюдение принципа взаимности отражения от земной поверхности рассматривается в качестве важного момента при исследовании отражательных свойств земных поверхностей с помощью космических длинноволновых поляриметрических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Однако авторам не известны исследования о правомерности принципа взаимности по отражению поляризационных сигналов на HV и VH от шероховатой поверхности. В качестве математической величины, характеризующей принцип взаимности, предложено использовать коэффициент взаимной корреляции отражения на VH и HV. Предварительные исследования с помощью поляриметрической РСА в Р диапазона длин волн ($\lambda \sim 70$ см) лесных участков показали, что при отражении от лесных массивов наблюдаются отклонения от принципа взаимности. Одновременно результаты анализа выявили особенности, которые трудно объяснить. Для шероховатой поверхности выполнены расчеты по изменению интенсивности и фазы сигнала в зависимости от величины перемещения радиолокационной станции (РС). Показано, что величина смещения радиолокационной станции (Δy_0), при которой коэффициент корреляции для интенсивности сигнала уменьшается на 3дБ, определяется размером апертуры антенны и меньше разрешающей способности РС по y . Одновременно с этим ширина зависимости коэффициента корреляции в формате фазы в первую очередь определяется длиной волны электромагнитного излучения и меньше Δy_0 . Фазовые измерения более информативны. Однако, по нашим исследованиям, для результативного использования радиолокационных изображений в формате фазы необходимо ухудшить тактико-технические характеристики РСА, в частности, увеличивать частоту повторения зондирующих сигналов. Это приведет к увеличению размеров антенной системы - уменьшению зоны обзора и т.д.
Ключевые слова: радиолокационные изображения, лесные массивы, кросс-поляризация, принцип взаимности

On the Interpretation of Radar Images of Forests on HV and VH Polarizations

A.A. Kalinkevich¹, B.G. Kutuzov¹, V.Yu. Manakov², D.P. Egorov¹, V.M. Masyuk¹, V.A. Plyushchev²

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

²Vega Radio Engineering Group of Companies

In the scientific literature on radar, it is a priori assumed that reflections from the Earth's underlying surfaces at VH and HV polarizations are mutual (i.e. complex values of reflected signals at VH and HV $A_{VH}^* - A_{HV}^* = 0$). Compliance with the principle of reciprocity of reflection from the Earth's surface is considered as an important point in the study of the reflective properties of Earth's surfaces

using space long-wave polarimetric radars with synthesized aperture (SAR). However, the authors are not aware of studies on the validity of the reciprocity principle for the reflection of polarization signals on HV and VH from a rough surface. As a mathematical value which characterizes the reciprocity principle, it is proposed to use the coefficient of mutual correlation of reflection on VH and HV. Preliminary studies using polarimetric radar in the P wavelength range ($\lambda \sim 70\text{cm}$) of forest areas have shown that deviations from the reciprocity principle are observed. At the same time, the results of the analysis revealed features that are difficult to explain. For a rough surface, calculations were performed on the change in the intensity and phase of the signal depending on the movement of the radar station (RS). It is shown that the value of the radar station offset (Δy_0), at which the correlation coefficient for the signal intensity decreases by 3dB, is determined by the size of the antenna aperture and is less than the resolution of the RS in y . At the same time, the width of the correlation coefficient dependence in the phase format is primarily determined by the wavelength of electromagnetic radiation and is less than Δy_0 . Phase measurements are more informative. However, according to our research, for the effective use of radar images in the phase format, it is necessary to worsen the tactical and technical characteristics of the radar, in particular, to increase the frequency of repetition of probing signals. This will lead to an increase in the size of the antenna system and a decrease in the viewing area, etc.

Keywords: radar images, forests, cross-polarization, principle of reciprocity

Введение

В научной литературе по радиолокации (см., например, [1-2]) априорно предполагают, что отражения от земных подстилающих поверхностей на VH и HV взаимны. Концепция взаимности предполагает два основных постулата:

1) среда, через которую проходит электромагнитное излучение (ЭМИ) линейна, изотропна и негиротропна. Гиротропная среда обладает способностью вращать плоскость поляризации распространяющихся в ней линейно поляризованных электромагнитных волн. Насколько эти условия можно отнести к принципу взаимности отражения электромагнитных волн от лесных массивов в Р-диапазоне длин волн - не понятно;

2) авторами [3] рассматривался вопрос о петлеобразных цепочках событий. Согласно подходу Фейнмана-Уилера, отражение от элемента объемного разрешения формируется не только за счет непосредственного отражения от элементов объемного разрешения лесной среды, но также за счет всевозможных предыдущих переотражений. По мнению Уилера и Фейнмана, необходимо к принципу взаимности дополнительно декларировать принцип запрета на подобные замкнутые во времени (петлеобразные) цепочки событий. Однако для случая отражения от лесной поверхности игнорировать такие явления нельзя. Кроме того, в зависимости от типа поверхности (луг, кустарник, различные лесные массивы и т.д.) для разных диапазонов длин волн роль петлеобразных цепочек событий будет разной, и мера взаимности должна меняться.

Таким образом, с теоретической точки зрения выполнение условий принципа взаимности отражения ЭМИ для разных длин волн от лесной поверхности не доказано. Мерой невзаимности обратного рассеяния является неравенство комплексных амплитуд $A_{VH}^* \neq A_{HV}^*$ [4]. Можно ожидать, что растительный покров будет оказывать влияние на величину взаимности.

Была предпринята попытка [5] использовать самолетные РЛИ на HV и VH поляризациях в Р диапазоне для изучения принципа взаимности отражения от земной поверхности. Для этого использовались результаты одновременной съемки земной поверхности на всех поляризациях в Р-диапазоне длин волн с борта самолета. При проведении эксперимента принцип взаимности РЛИ на HV и VH поляризациях может нарушаться за счет того, что: измерения на HV и VH поляризациях осуществляются неодновременно, а со сдвигом равным периоду T зондирования импульсов РЛИ (за время T самолет перемещается на величину $\Delta y = v_c T$); приемо-передающие тракты каналов V и H не идентичны; за счет отражательных свойств земной поверхности.

При анализе радиолокационных изображений на VH и HV поляризациях отмечалось, что для точечных объектов могут наблюдаться значительные расхождения в отражательных свойствах на HV и VH поляризациях (рис. 1).



Рис. 1. Разница фрагмента поляриметрических изображений для Р-диапазона длин волн

Специалисты по дистанционному зондированию поверхности Земли на этот эффект не обращали внимание. Однако при внимательном рассмотрении можно обнаружить расхождения и для пространственных областей (необходимо отметить, что в науке существует направление, связанное с возможностью радиолокационного обнаружения и выделения объектов и пространственных зон с невзаимными свойствами обратного рассеяния радиоволн на фоне «взаимных» объектов. В частности, обнаружение и выделение промышленных предприятий на фоне отражений от прочих городских построек, см., например, [6,7]).

Анализ самолетных кросс поляризационных РЛИ

При анализе поляризационных VH и HV радиолокационного изображения в Р диапазоне длин волн, получаемых с помощью самолетного РСА, в качестве математической величины принципа взаимности отражения от земной поверхности, было предложено использовать коэффициент взаимной корреляции произвольно выбранного размера участка земной поверхности [5]

$$R_{VH,HV}^* = \frac{\sum_i A_{VH}^*(x_i - \bar{x}) \text{conj}(A_{HV}^*(x_i - \bar{x}))}{n\sqrt{S_{VH}^2 S_{HV}^2}}, \quad (1)$$

где S_{VH}^2 и S_{HV}^2 дисперсии сравниваемых величин от среднего значения.

Выбор такого критерия принципа взаимности отличается от общепринятого. Для общепринятого критерия оценка его справедливости определяется разностью комплексных величины отраженных сигналов на VH и HV поляризациях $A_{VH}^* - A_{HV}^* \neq 0$ [3,6-7]. Величины $R_{VH,HV}^*$ и $A_{VH}^* - A_{HV}^*$ являются комплексными, поэтому можно их рассматривать как в формате амплитуды (интенсивности), так и в формате фазы.

Для случая РСА [8,9-10] запись отраженного сигнала осуществляется в двух ортогональных каналах (реальном и мнимом). После выполнения процедуры синтезирования в каждом из этих каналов для дальнейшей обработки и интерпретации имеем реальное $A(x,y)$ и мнимое $B(x,y)$ радиолокационные изображения. На этапах получения реальных и мнимых изображений процедуру обработок можно считать линейной. Мнимые и реальные изображения в отдельности мало информативны [8,10], рис. 2 (из работы [10]). До данного момента обработка экспериментальных данных соответствует линейным преобразованиям. На следующем этапе обработки осуществляется получение РЛИ в формате интенсивности $I_I(x,y) = A^2(x,y) + B^2(x,y)$ и в формате фазы $I_\Phi(x,y) = \arctg(A(x,y)/B(x,y))$, т.е. для VH и HV поляризаций РЛИ в формате интенсивности и формате фазы получаются в результате нелинейных преобразований (рис. 2).

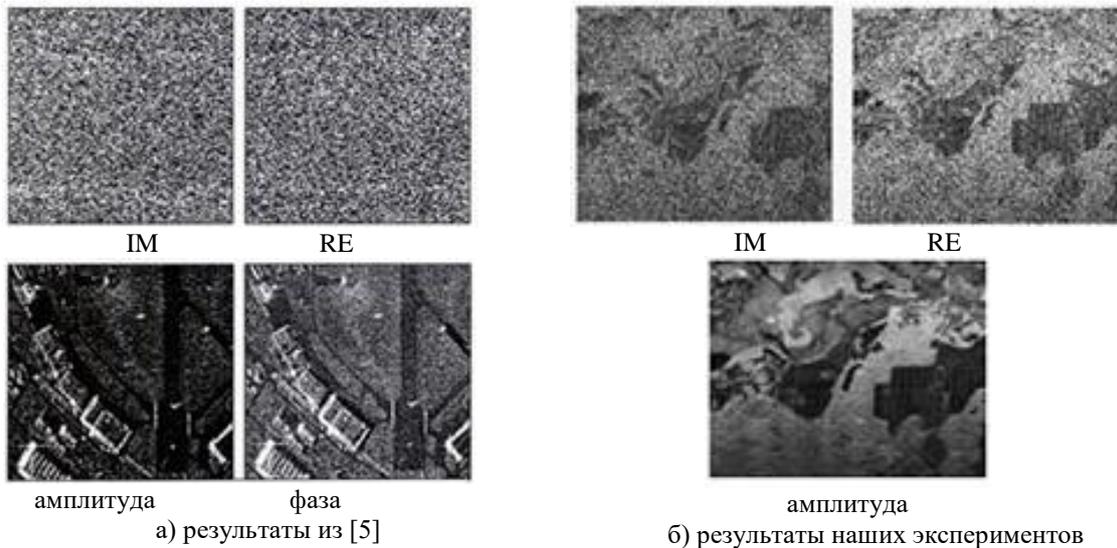


Рис. 2. Действительная, мнимая и рассчитанные амплитудная и фазовая компоненты РЛИ участка земной поверхности

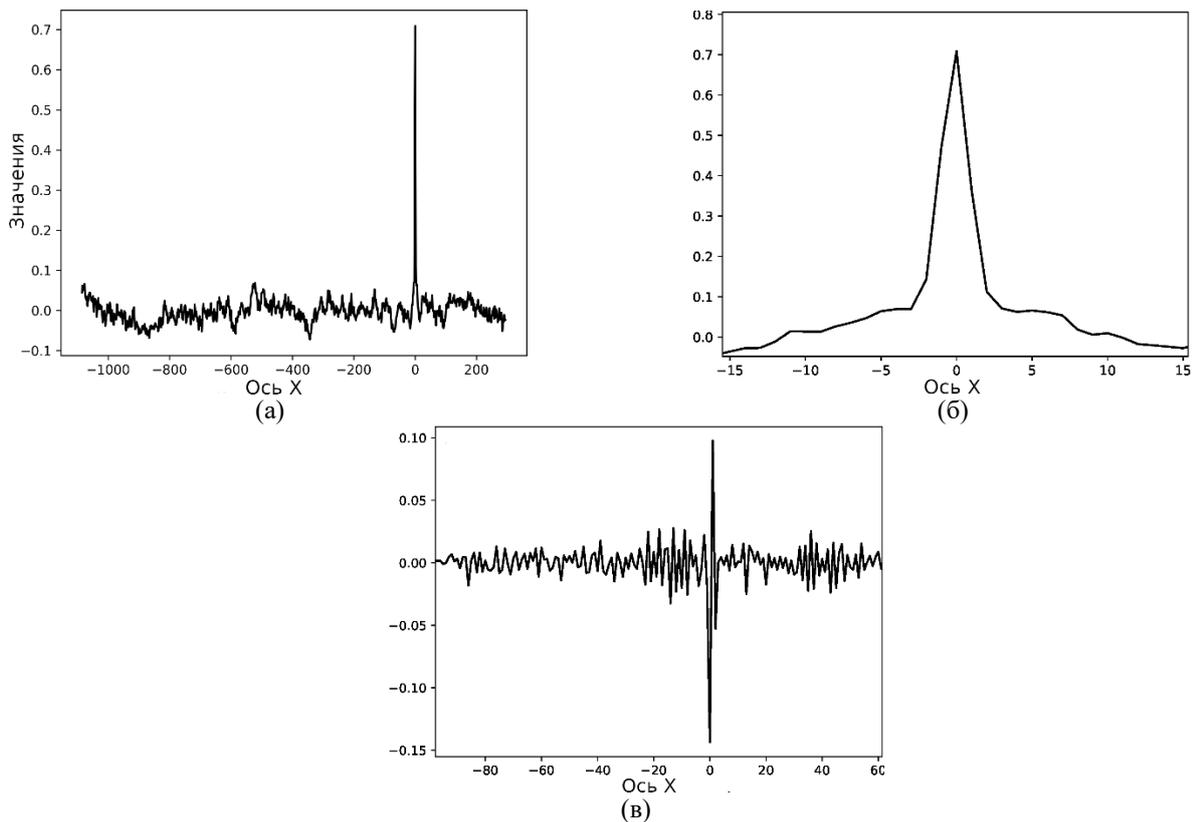


Рис. 3. Функция корреляции по дальности для изображений HV и VH поляризаций по одной строке (окно для усреднения ~3000 пикселей): а) в формате амплитуды; б) в формате амплитуды – увелич. масштаб; в) в формате фазы

Принцип взаимности справедлив для разнообразных систем (механических, акустических, электромагнитных), описываемых линейными уравнениями. Согласно этому условию, возникает дополнительный мотив полагать, что поляризационные изображения на VH и HV в форматах интенсивности и фазы не соответствуют принципу взаимности. Однако значение коэффициента взаимной корреляции может

оказаться в дальнейшем дополнительной величиной для классификации лесного массива.

Для оценки влияния типа растительности, а также уменьшения влияния флюктуаций движения самолета на экспериментально получаемые значения было предложено использовать зависимость взаимного коэффициента корреляции по дальности, полагая, что на разных дальностях типы лесной растительности меняются [5]. Для этого на поляризационных изображениях VH и HV в формате амплитуды $A_i(x,y)$ или в формате фазы $B_i(x,y)$ выбирались два одинакового размера окна (размер окна мог меняться). Как правило, в данной работе размер окна соответствовал нескольким тысячам пикселей.

При фиксации окна на одном из РЛИ на дальности окна y_0 окно на другом изображении могло перемещаться по дальности Δy . В результате имелась возможность определить функцию взаимной корреляции $R_{VH-HV}(y_0, \Delta y)$ как для формата интенсивности, так и для формата фазы (рис. 3 из [5]).

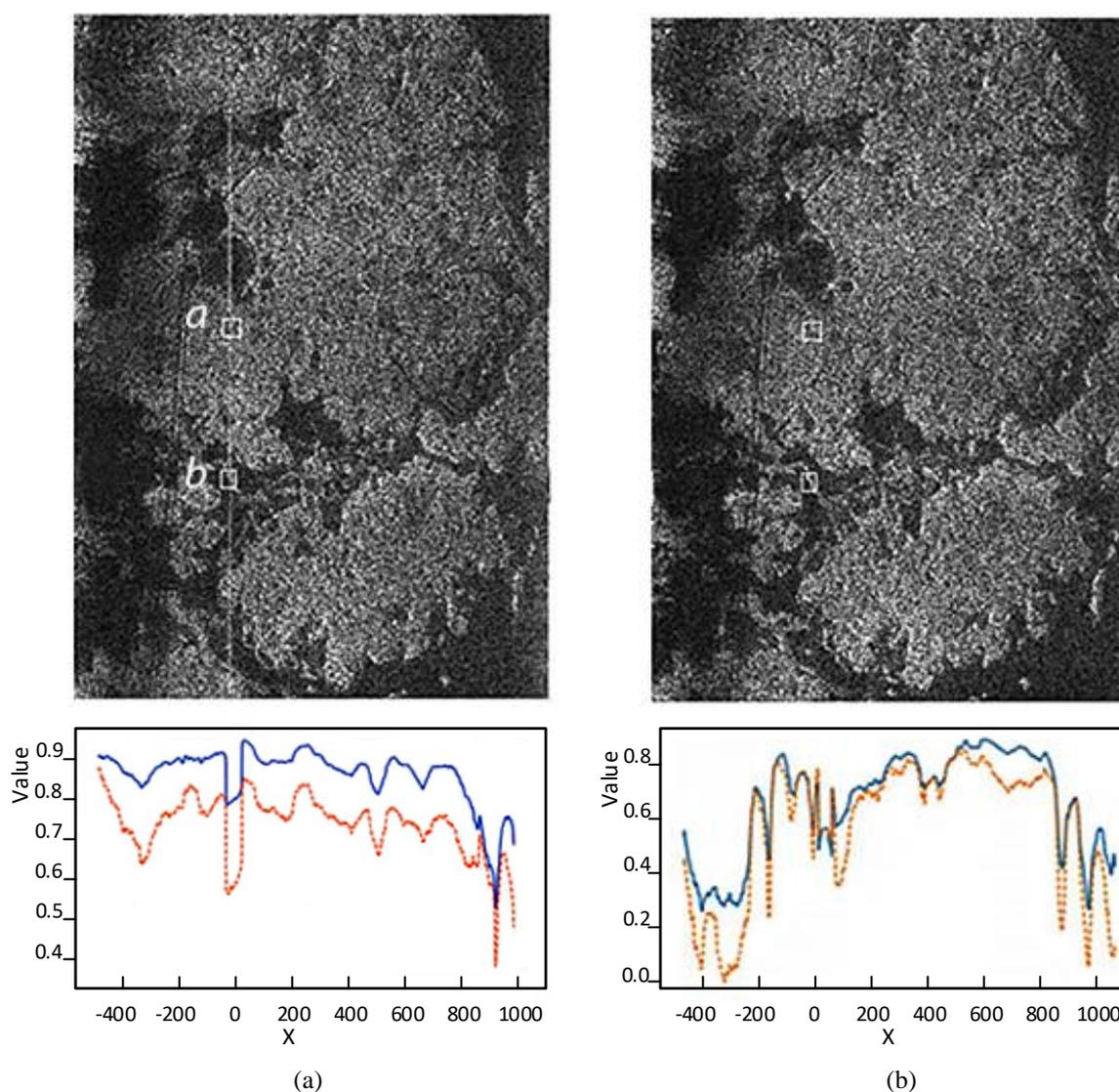


Рис. 4. Зависимость коэффициента взаимной корреляции по дальности для амплитуды РЛИ изображений и для комплексных изображений, соответствующих двум положениям самолета – (а) и (б)

Для формата интенсивности вид функции взаимной корреляции рис. 3 (а, б), имеет привычный вид, несмотря на то, что для разных типов леса максимальное значение функции взаимной корреляции меняется. Для формата фазы даже для одного типа леса ее вид принимает произвольно форму, при этом максимальное значение ее не превышает $\sim 0.15 - 0.2$ (рис 3 в).

При одновременном перемещении обоих окон по дальности и вычислении коэффициента взаимной корреляции определяется изменение $R_{VH-HV}(y, \Delta y = 0)$ по дальности. В результате появляется возможность изучения влияния типа поверхности на принцип взаимности (рис. 4) [5].

Основной вывод, который был сделан в [5] - величина взаимного коэффициента корреляции сигналов на VH и HV поляризациях в формате интенсивности зависит от типа поверхности. Сделать какой-то вывод для РЛИ в формате фазы не удастся. Поэтому дальнейшие исследования были связаны с выяснением этого момента.

Моделирование обратного отражения от подстилающей поверхности

Для моделирования отражения от земной поверхности представим ее в виде независимых равномерно расположенных неподвижных N точек на удалении H от траектории движения носителя. Тогда комплексную амплитуду сигнала, принятого станцией, можно представить в виде:

$$B \sim \sum_{i=1}^N b_i \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} 2r_i\right), \quad (2)$$

где b_i - амплитуда отражения от точки i, r_i - расстояние от этой точки до радиолокатора.

Пусть имеются две одинаковые радиолокационные станции, расположенные симметрично относительно начала координат друг от друга на расстоянии 2A, зоны перекрытия облучения которых практически совпадают. Влиянием областей вне зоны перекрытия пренебрегаем. Комплексные амплитуды для двух станций будут:

$$B_1 \sim \sum_{i=1}^N b_i \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} 2 \sqrt{H^2 + \left(x_i + \frac{A}{2}\right)^2}\right\}, \quad B_2 \sim \sum_{i=1}^N b_i \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} 2 \sqrt{H^2 + \left(x_i - \frac{A}{2}\right)^2}\right\}, \quad (3)$$

а коэффициент корреляции (он будет зависеть от расстояния 2A) $R_{12} \sim \overline{B_1 B_2^*}$. Пусть коэффициенты отражения от всех N точек одинаковые, т.е. $b_i = \text{const}$, $H \gg x$, $H \gg A$. Тогда:

$$\sqrt{H^2 + \left(x_i + \frac{A}{2}\right)^2} \sim H \left(1 + \frac{x_i^2 + x_i A + A^2}{2H^2}\right), \quad \sqrt{H^2 + \left(x_i - \frac{A}{2}\right)^2} \sim H \left(1 + \frac{x_i^2 - x_i A + A^2}{2H^2}\right) \quad (4)$$

При переходе к интегралу имеем:

$$R_{12} \sim \int_{-x}^x \exp\left(-j \frac{4\pi A}{\lambda H} x\right) dx \sim \frac{\lambda H}{-j4\pi A} e^{-j \frac{4\pi A}{\lambda H} x} \Big|_{-x}^x, \quad (5)$$

где $\{-x, x\}$ определяются ДНА. Считаем $2\theta = \frac{\lambda}{d}$.

В результате получаем (6).

$$R_{12} \sim \frac{\lambda H}{-j4\pi A} \left(e^{j\frac{4\pi\lambda H}{\lambda H 2D}A} - e^{-j\frac{4\pi\lambda H}{\lambda H 2D}A} \right) = \frac{D}{2\pi A} \frac{\lambda H}{D} \sim \sin\left(\frac{2\pi A}{D}\right) \sim \frac{\sin\left(\frac{2\pi A}{D}\right)}{\frac{2\pi A}{D}}. \quad (6)$$

Вид автокорреляционной функции от расстояния смещения A определяется апертурой антенны. $R_{12} = 0$, при $\frac{2\pi A}{D} = \pi$, т.е. при $A = \frac{D}{2}$. Необходимо обратить внимание на то, что интервал корреляции ($2A=D$) значительно меньше величины разрешающей способности станции $L = 2\theta L_0$.

Более детальное моделирование предполагает проведение численного эксперимента. За основу численного моделирования использовалась схема, представленная на рис. 5.

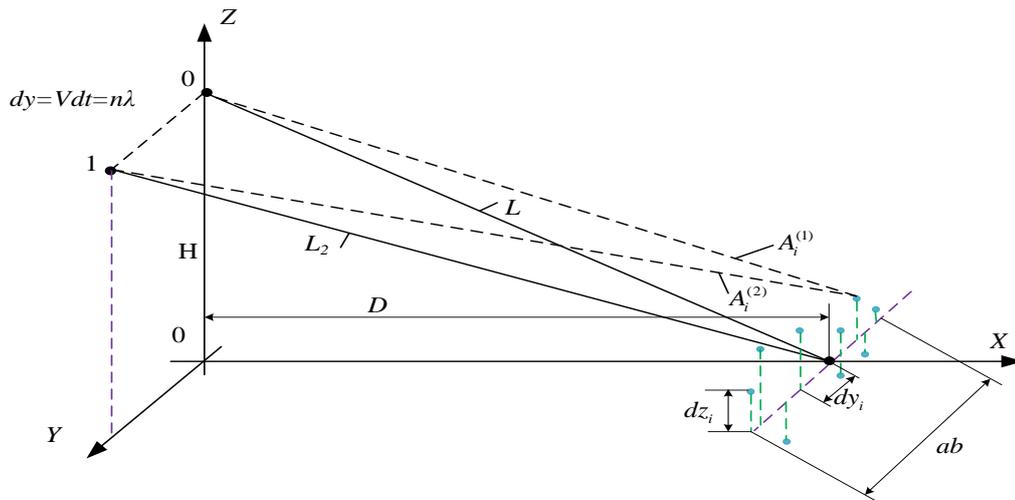


Рис. 5. Численное моделирование

Ниже приводятся расчеты для конкретного случая $H=D=5000$ м. Расположение точечных отражателей по направлению движения самолета соответствовало равномерному распределению. Распределение по высоте относительно среднего уровня – нормальное. Количество отражающих точек для расчета произвольно задавалось от 10000. Расположение точек относительно среднего уровня соответствовало случайному нормальному закону с дисперсией 2м. Моделирование выполнялось для длин волн 3см., 23см., 70см.

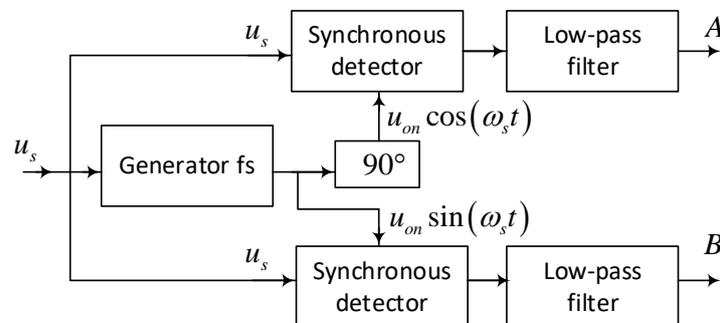


Рис. 6. Принцип измерения реального и мнимого значений обратного отражения

Используя принцип синхронного детектирования [9] (рис. 6), мы имеем реальное $A_{\text{реал}}$ и $B_{\text{мним}}$ мнимое значения отраженного сигнала для элемента разрешения

$$A_{\text{реал}} = a \sum_k \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_k\right) \quad \text{и} \quad B_{\text{миним}} = a \sum_k \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_k\right) \quad (7)$$

где l_k - расстояние до k -ого отражателя.

В формате интенсивности имеем

$$A = a^2 \left\{ \left[\sum_k \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_k\right) \right]^2 + \left[\sum_k \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_k\right) \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

В формате фазы имеем

$$\theta = \text{arctg} \left\{ \frac{\sum_k \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_k\right)}{\sum_k \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_k\right)} \right\}. \quad (9)$$

При изменении положения носителя на y меняются и значения $A(y)$ и $\theta(y)$.

На рис. 7, для наглядности, представлены некоторые результаты расчетов функций взаимной корреляции отраженного сигнала в формате интенсивности и в формате фазы при указанных выше параметрах.

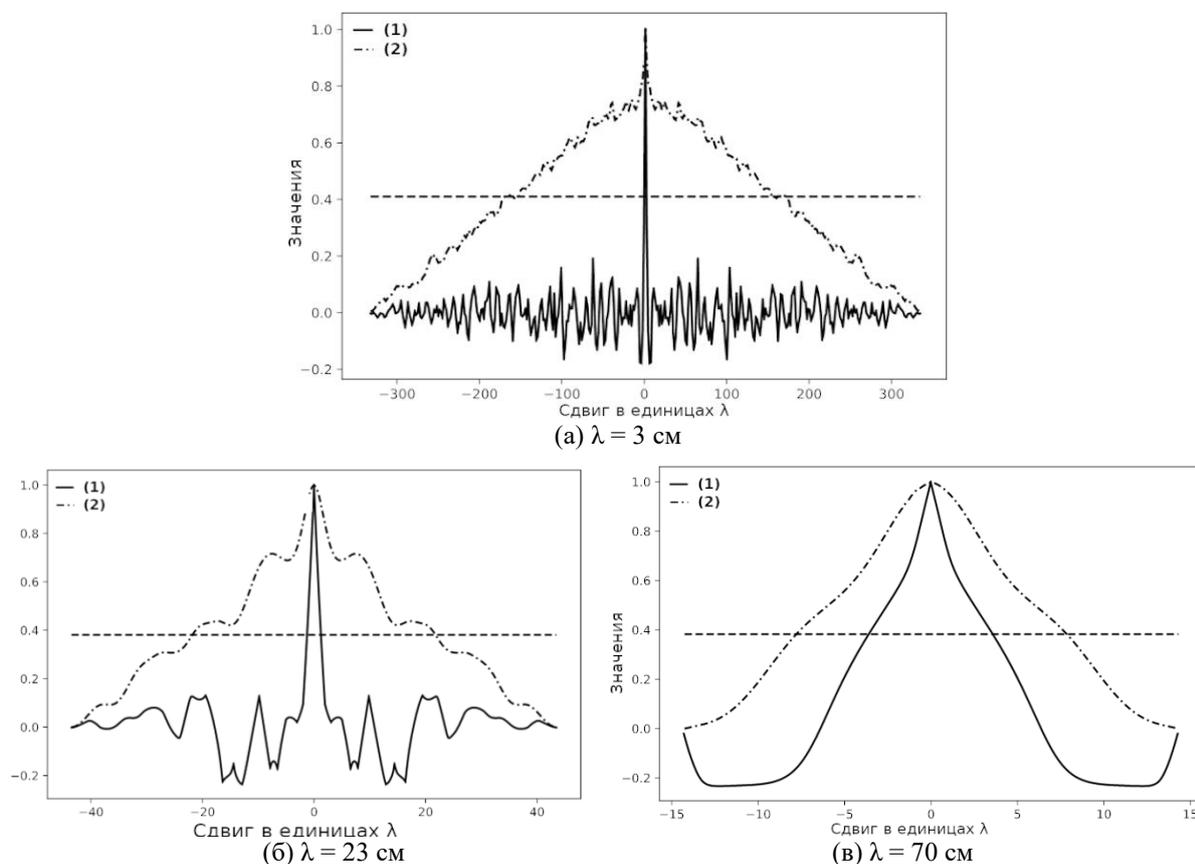


Рис. 7. Результаты расчета функций корреляции в форматах интенсивности и фазы для разных диапазонов длин волн

Несмотря на то, что при изменении исходных параметров результаты расчетов меняются, основные особенности остаются неизменными. Особенно сильно меняется функция корреляции в формате фазы. Основной результат – ширина автокорреляционной функции для отраженного сигнала в формате интенсивности значительно шире, чем для формата фазы, зависит от диапазона длин волн. Пространственные спектры автокорреляционных функций широкие. Получение синтезированных изображений соответствует оптимальной фильтрации принимаемых при движении носителя сигналов. Однако из-за того, что спектры автокорреляционных функций широкие, роль быстрых флюктуаций приводит к тому, что РСА изображения

имеют спекл-структуру (это наиболее четко проявляется на РЛИ в формате интенсивности). Размер спеклов на РЛИ соответствует максимально возможному размеру разрешающей способности РСА.

Так как интервал взаимной корреляции в формате фазы меньше, чем перемещение носителя за T , то отсчеты фазы становятся практически независимыми. В результате, коэффициент корреляции стремится к нулю, что и наблюдается в эксперименте (рис.7 в). Можно сделать вывод, что фазовые измерения более информативны.

Однако согласно нашим исследованиям, для результативного использования радиолокационных изображений в формате фазы необходимо ухудшить тактико-технические характеристики РСА, в частности, необходимо увеличить частоту повторения зондирующих сигналов. Это приведет к увеличению размеров антенной системы - уменьшению зоны обзора и т.д.

Выводы

Анализ условий для утверждения принципа взаимности РЛИ на VН и НV поляризациях в форматах интенсивности и фазы показывает, что выполнение принципа взаимности проблематично. В качестве математической величины взаимности РЛИ на VН и НV поляризациях предложено использовать коэффициент взаимной корреляции. Математическое моделирование показало, что функция автокорреляции отраженного от шероховатой поверхности СВЧ монохроматического сигнала в формате интенсивности сильно отличается функции автокорреляции в формате фазы. Ширина автокорреляционной функции в формате интенсивности определяется в первую очередь ДНА и значительно шире автокорреляционной функции в формате фазы, которая преимущественно определяется длиной волны СВЧ сигнала. Корректное измерение автокорреляционной функции в формате фазы затруднительно для импульсных радиолокационных систем.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках госзадания по теме 0030-2019-0008 “Космос” и при поддержке РФФИ (проект № 20-02-00703).

Литература

1. Freeman A. Calibration of Linearly Polarimetric SAR Data Subject to Faraday Rotation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V.42, No.8, P.1617-1624.
2. 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.
3. Wheeler J.A., Feynman R.P. Direct Interparticle Action // Reviews of Modern Physics. 1949. V.21, No.3, P.425-433.
4. Богородский В.В., Канарейки Д.Б., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 279 с.
5. Kalinkevich A.A., Kutuza B.G., Manakov V.Yu., Egorov D.P., Plyushev V.A. The use of cross-polarization images from long-wave polarimetric synthetic aperture radars for the study of the Earth's surface // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. SPb.: Mozhaisky MAA, 2021.
6. Сысоев А.Н., Малютин Н.Д. Современные устройства, антенны и отражатели с не взаимными свойствами // Радиоэлектроника. 2020. №11. С.1684-1719.
7. Khlusov V.A., Vorob'ov P.V. Monostatic radar sensing of partially nonreciprocal mediums backscatter // Journal of EM Waves and Appl. 2021. V.35, N.13. P.1687-1698.

8. Frery 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.
9. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под. ред. В.С.Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
10. Калинин А.А., Крылова М.С., Масюк В.М., Манаков В.Ю. Труды VIII Всероссийской конференции “Радиолокация и радиосвязь”. 2014. С.169-174.