

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2020»

## **Деструктивное влияние ионосферы Земли на работу РСА Р – диапазона**

А.А. Калинин, Б.Г. Кутуза, В.Ю. Манаков, В.М. Масюк, В.А. Плющев

*Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН, 103907, Москва, ул. Моховая, 11. корп. 7. тел.: +7(495) 629-33-65, Факс: +7(495) 629-36-78, E-mail:*

*[kalinkevich@newmail.ru](mailto:kalinkevich@newmail.ru)*

*Акционерного общества «Концерн радиостроения «Вега»», к.т.н., 121170, г.Москва, Кутузовский проспект, 34, тел. +7(499)753-40-04 доб.1017 +7(499)249-07-04, факс: +7(495)933-15-63, e-mail: [mail@vega.su](mailto:mail@vega.su).*

## **Destructive influence of the Earth's ionosphere on the P-band SAR operation**

A. A. Kalinkevich, B. G. Kutuza, V.M.Masyuk, V.Yu. Manakov, V. A. Plyushchev

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia*

*“Vega” Radio Engineering Group of Companies, Moscow, 121170 Russia*

*e-mail: [kalinkevich@cplire.ru](mailto:kalinkevich@cplire.ru)*

*Анализ результатов исследований окружающей среды с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) Р и VHF диапазонов показал важность использования их как для распознавания объектов, так и для дистанционного зондирования поверхностного земных покровов. Однако ни один космический эксперимент с такой аппаратурой пока не был реализован. Основным сдерживающим фактором является отсутствие надежных методик по компенсации влияния ионосферы Земли на качество радиолокационных изображений (РЛИ). Планируется, что в ближайшие годы все же возможно будут функционировать два космических аппарата, обеспечивающие поляриметрическую радиолокационную съемку поверхности Земли с помощью РСА на частоте 435 МГц («BIOMASS» и «МКС-РСА(Р)»).*

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, ионосфера Земли, разрешающая способность, плазма.

*Analysis of the results of environmental studies using synthetic aperture radars (RSA) in the P and VHF ranges has shown the importance of using them both for object recognition and for remote sensing of earth covers. However, to date, no space experiments have been performed using such synthetic aperture radars. However, no space experiment with this equipment has yet been performed until the present. The main constraint is the lack of reliable methods for compensating the impact of the Earth's ionosphere on the quality of radar images (RLI). It is planned that in the coming years, it is still possible to operate two spacecraft that provide polarimetric radar survey of the Earth's surface at 435 MHz ("BIOMAS" and "ISS-SAR(P)").*

**Keywords:** synthesized aperture radar, Earth's ionosphere, resolution, plasma.

### **Введение**

Радиолокационные станции с синтезированной апертурой Р ( $\lambda \sim 70$  см) и VHF ( $\lambda \sim 2-5$  м) диапазонов рассматриваются в качестве эффективного метода исследования как отражательных свойств земной поверхности, так и обнаружения объектов, находящихся под растительным покровом и под поверхностным слоем Земли [1-4]. При использовании таких РСА из космоса, не смотря на технические возможности создания космической РСА метрового диапазона, до настоящего времени в мировой практике не было выполнено ни одного эксперимента. Причиной является потеря когерентности и поляриметрические искажения принимаемого сигнала вследствие эффектов распространения радиоволн этих диапазонов в ионосфере Земли. Теоретические исследования показали, что уникальные свойства РСА Р и VHF диапазонов за

счет деструктивного влияния ионосферы могут быть сведены до минимума, если их использовать на космических аппаратах. Попытки изучения влияния ионосферы на работу поляризационных РСА в настоящее время осуществляется на результатах измерений в L-диапазоне [5,6], где влияние ионосферы мало.

### Деструктивное влияние ионосферы Земли на функционирование РСА Р-диапазона.

Ионосфера - слой атмосферы планеты, который состоит из смеси газа нейтральных атомов и молекул и квазинейтральной плазмы. Ионосферная плазма описывается концентрацией электронов. Профиль электронной концентрации меняется от время суток, сезона, широты, активности солнца, магнитных бурь и т.д. В ионосфере обычно существует ряд локальных максимумов электронной плотности, называемых слоями - D, E, F [10,11]. В каждом слое ионосферы непрерывно происходят нерегулярные сгущения и разрежения плотности ионизации. Масштабы неоднородностей электронной концентрации варьируются в широком диапазоне от метров до десятков километров, перемещаются с различной скоростью, а также меняют конфигурацию. Вопросы, связанные с образованием этих неоднородностей, их масштабами, недостаточно изучены. Нестационарные, нерегулярные, пространственно-некоррелируемые электронные неоднородности приводят к особенностям распространения низкочастотных радиоволн в ионосфере и могут свести на нет эффективность использования РСА этих диапазонов из космоса. Вопросам влияния ионосферы Земли на распространение радиоволн посвящено большое количество работ, которые в первую очередь связаны с проблемами передачи информации, изучения параметров ионосферы [3,4,7-12]. При рассмотрении использования космических РСА Р и VHF диапазонов все эти вопросы объединяются в одну проблему. Кроме того, возникают вопросы, касающиеся отражением ЭМИ от шероховатой поверхности Земли. В ионосфере (диспергирующей среде), находящейся в магнитном поле Земли, механизм распространения радиоволн дополнительно усложняется. В зависимости от частоты радиоволны  $\omega$  электрические свойства ионосферы различны для различных диапазонов радиоволн. В предполагаемых эксперимента «BIOMASS» и «МКС-РСА(Р)» радиолокационные станции будут функционировать в диапазоне  $f \sim 435$  МГц.

Ионосфера характеризуется [12]:

А) Плазменной частотой ( $f_p$ )-частотой собственных продольных колебаний пространственного заряда в однородной плазме в отсутствие магнитного поля. В системе СГС  $f_p = 0,90 \times 10^4 \sqrt{N_e} \approx (5-10) \text{ МГц}$ , где  $N_e$ -концентрация электронов. Для Р-диапазона в ионосферы ( $\omega^2 \gg \nu^2$ , где  $\nu$ -частота столкновения электронов) справедливы соотношения для показателя преломления  $n$ , проводимости  $\sigma$  и поглощения  $\chi$

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_0^2}{\omega^2}, \sigma = \frac{e^2 N_e \nu}{m \omega^2}, \chi = \frac{2\pi\sigma}{\omega\sqrt{\varepsilon}}, \text{ где } e \text{ и } m \text{ - заряд и масса}$$

электрона

Для передачи импульса необходимо передать некоторую полосу частот, ширина которой обратно пропорциональна длительности импульса. Поэтому импульсы при прохождении через ионосферу искажаются [14]. Характерной особенностью является то, что искажения зависят от расстояния пройденной радиоволной.

Б) Гиромагнитной частотой  $f_h$ - частотой обращения заряженной частице в постоянном магнитном поле  $\mathbf{H}$  в плоскости перпендикулярной  $\mathbf{H}$ . Для свободного электрона гиромагнитная частота  $f_h = \frac{1}{2\pi} \times \frac{eH}{cm} \approx (5-10) \text{ МГц}$  (в системе СГС),  $c$  – скорость света в вакууме.

В соответствии с исходными данными на МКС-РСА(Р) ( $f = 400-450 \text{ МГц}$ ), средняя частота сигнала  $f(435 \text{ МГц}) \gg f_p, f_h$ .

Магнитное поле Земли делает ионосферу анизотропной в результате происходит поворот плоскости поляризации ЭМИ. Величину угла вращения плоскости поляризации плоской волны на длине пути (S) можно выразить через электронную концентрация и напряженность магнитного поля [13,14]

$$\Omega = \frac{\pi}{cf^2} \int_s N_e H \cos \Theta ds, \text{ где } \theta - \text{ угол между направлением распространения и}$$

геомагнитным полем.

При движении космического аппарата по орбите помимо того, что меняется  $N_e$ , меняется  $H$  и  $\theta$ . Так как концентрация электронов на трассе прохождения ЭМИ меняется, происходит непрерывная флуктуация угла поворота плоскости поляризации ЭМИ.

### Особенности распространения радиоимпульса в ионосфере

Дисперсионные свойства ионосферной плазмы вызывают двойственное искажение распространяющихся в ней сигналов:

а) за счет дисперсии (зависимости фазовой скорости от частоты) будут меняться длительность и форма импульса;

б) за счет фарадеевского эффекта наблюдается вращения плоскости поляризации сигналов (каждая частотная составляющая сложного сигнала будет поворачиваться на свой угол).

Конечно полоса частот незначительная, но данные эффекты зависят от расстояния прохождения сигнала через среду.

В проекте «МКС-РСА(Р)» предполагается использования ЛЧМ сигнал. Детальное рассмотрение распространения ЛЧМ сигнала в ионосфере рассмотрено в [15]. Необходимо отметить, что зависимость изменения частоты от времени в импульсе меняется. В случае приема плоско поляризованной волны за счет фарадеевского вращения плоско поляризационная волна (на пример, V поляризации) будет приобретать Н компоненту, интенсивность которой зависит от длины прохождения сигнала. В результате учета двух факторов будет наблюдаться искажение как длительности и формы импульса, так и зависимости частотного заполнения на обеих поляризациях [3]. Данное искажение будет зависеть как от характеристик состояния ионосферы, так и угла между магнитной силовой линии Земного и направлением распространения сигнала [3,4]. В качестве примера, на рис.1 из [15] приводятся графики возможных трансформаций огибающей импульса и вида частотного заполнения в зависимости от ориентации луча по отношению к магнитному полю Земли.

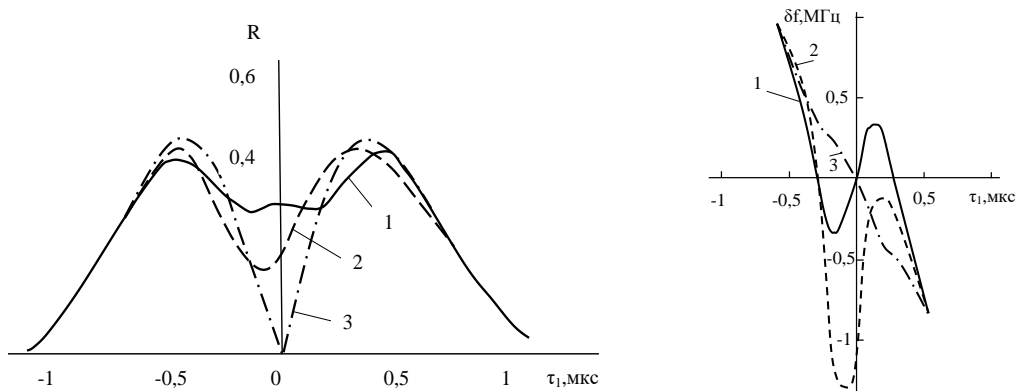


Рис.1. Огибающая и частотное заполнения свертки широкополосного сигнала в анизотропной ионосфере: 1-3 в зависимости от ориентации луча по отношению к магнитному полю Земли  $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$

Как уже отмечалось, ионосфера из-за наличия магнитного поля Земли является анизотропной средой. В частности, в ионосфере изменение поляризации электромагнитной волны объясняется не только эффектом Фарадея, но также эффектом Коттона-Мутона [20]. Эффект Коттона-Мутона сказывается на поляризационных свойствах ЭМ-волны на частотах меньше порядка 150 МГц. Порядок величины эффекта уменьшается с увеличением частоты (полагается, что на частотах больше 300 МГц данный эффект пренебрежимо мал). Однако величина угла поляризации за счет этого эффекта зависит от **отражающих свойств подстилающей поверхности**. Принцип калибровки поляризационных РСА (нахождение поляризационной матрицы рассеяния) основывается на том, что кросс-поляризационные компоненты ее в ионосфере для линейно поляризованной РСА будут равны ( $VH=HV$ ) [21]. В случае, когда влиянием эффекта Коттона-Мутона на поляризационную матрицу пренебречь нельзя, восстановление истинной матрицы рассеяния из измерений невозможно [13]. Для успешного использования поляризационных РСА Р и VHF диапазонов требуется доказательство принципа взаимности кросс-поляризационных компонент, т.е. РЛИ на кросс-поляризациях одинаковы.

При изменениях параметров ионосферы при движении спутника вид приведенных зависимостей будет непрерывно меняться. Данные примеры показывают сложность синтеза сигнала как по дальности, так и по азимуту при получении РЛИ наблюдаемой поверхности.

Для выполнения синтеза отраженного сигнала возникают неопределенности: а) изменение длительности сигнала, б) изменение формы огибающей, в) изменение формы частотного заполнения свертки сигнала.

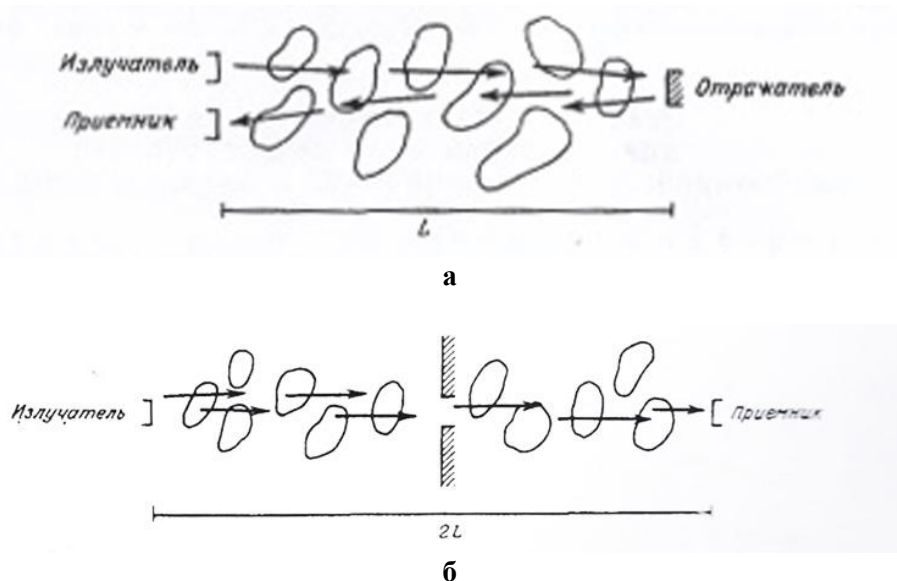
#### **Тонкая неоднородная структура ионосферы**

Для получения РЛИ в Р-диапазоне большое значение приобретает искажение фазы прошедшего через ионосферу сигнала, так как эти искажения определяют возможность выполнения синтеза по азимуту. В ионосфере непрерывно происходят нерегулярные сгущения и разрежения плотности ионизации. Кроме того форма неоднородностей ионосферы меняется и одновременно перемещается. Неоднородности представляются областями с электронной плотностью, отличной от среднего значения на данной высоте ионосферы. Законы миграции неоднородностей в ионосфере достоверно не изучены. Предполагается, что основной причиной является турбулентное движение ионизированного газа. Размеры неоднородностей лежат в очень широких пределах (как предполагается) - от нескольких метров до нескольких километров. На высоте 60÷80 км, т.е. в области D, преобладают более мелкие неоднородности размером до десятков метров, в слое E - неоднородности размером 200÷300 м, а в слое F - неоднородности размером до нескольких километров. Отклонение электронной плотности неоднородностей от среднего значения составляет (0,1÷1)%, скорость движения неоднородностей (предполагается) не превышает 1÷10 м/с [16]. При зондировании поверхности с МКС радиоволна пересекает области неоднородности как с размерами, сопоставимыми с длиной перемещения МКС за период повторения зондирующих импульсов, так и неоднородности размером до нескольких километров. Не смотря на то, что отклонение электронной плотности неоднородностей от среднего значения составляет (0,1÷1)%, изменения фазы прошедшего через эти неоднородности волны могут достигать значительных величин [19]. Влиянию мелкомасштабных, нестационарных неоднородностей с учетом их движения и движения ИСЗ на формирование синтезированных изображений необходимо уделять особое внимание.

#### **Распространение ЭМИ в реальных неоднородных средах**

При распространении электромагнитных волн в реальных средах из-за случайных неоднородностей возникают разнообразные флуктуационные эффекты. Было обнаружено, что при двукратном прохождении волн через одни и те же неоднородности возникают качественно

новые флуктуационные эффекты [17]. На первый взгляд может показаться, что флуктуационные свойства волны, попадающие в приемник в эксперименте (рис.2(а)), аналогичны свойствам волны прошедшей удвоенную дистанции  $2L$  по прямой (рис.2(б)), так как в обоих случаях волна проходит в случайно-неоднородной среде трассу одинаковой длины  $2L$ . Однако в эксперименте (рис.2а) отраженная волна проходит через те же неоднородности, что и падающая, в то время как на трассе (рис.2б) волна распространяется через различные неоднородности. Именно это приводит к специфическим флуктуационным эффектам, в частности, удвоению дисперсии фазы нормально отраженной волны (рис.2а) по сравнению с дисперсией фазы, волны, распространяющейся на трассе  $2L$  (рис.2б). Встает вопрос за счет движения спутника и движения ионосферы распространение волны на трассе спутник-Земля и Земля-спутник будет происходить через одни и те же неоднородности или разные. Если распространение волны на трассе спутник-Земля и Земля-спутник будет происходить через одни и те же неоднородности, то флуктуации фазы будут возрастать в два раза [17]. Данный вопрос не рассматривается в работах, посвященных работам спутниковым РСА Р-диапазона.



**Рис. 2** Пояснение к вопросу двукратного прохождения волны в случайно-неоднородных Средах

### Проблемы отражения ЭМИ от поверхности Земли.

При отражении электромагнитной волны от шероховатой диэлектрической поверхности возникают особенности, которые могут повлиять на интерпретацию результатов РСА Р-диапазона. Для примера, рассмотрим использования отражение круговой поляризации от металлической поверхности и от трехгранного уголкового отражателя. Из-за обратимости фазы при отражение происходит изменение направления вращения круговой поляризации на противоположное. При этом фарадеевский угол поворота плоскости поляризации на трассе МКС-Земля-МКС был бы равен удвоенному значению. Однако поведение вращения круговой поляризации от шероховатой диэлектрической шероховатой поверхности остается под вопросом.

Известно, что при отражении от шероховатой поверхности плоско-поляризованной волны появляются компоненты кросс поляризации. В частности, модель отражения можно представить в виде набора различных двугранных и трехгранных уголкового отражателей.

Трехгранные уголкового отражатели при отражении не меняют плоскость поляризации. Но так, как кросс-поляризация компонента в реальности имеется место, к модели поверхности необходимо добавить набор двухгранных уголкового отражателей, у которых ребра повернуты на угол  $\alpha$  относительно плоскости распространения [17]. При этом матрица отражения от них будем 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 угловых отражателей, значение угла  $\alpha$  вращение круговой поляризации становится неясным. В результате угол поворота плоскости поляризации при прохождении через ионосферу на трассе МКС-Земля-МКС может оказаться и равны нулю. Вероятнее всего, при отражении от шероховатой поверхности будут наблюдаться волны имеющие разные направления вращения. В системе РСА необходимо создавать приемные устройства для принятия сигналов с разными направлениями вращения. Авторам неизвестны построения подобных систем и проведения экспериментов с ними.

### Заключение

Проведение космического эксперимента с РСА Р-диапазона в настоящее время подходит под статус сложного исследования, требующего большого объема разнообразных междисциплинарных исследований с привлечением специалистов различных областей знаний.

### Литература

1. "IMARK – Multi-Frequency Airborne Polarimetric Radar System Operating on Board of TU-134A Flying Laboratory for Remote Observations of the Earth's Surface", Moscow Scientific Research Institute for Instrument Engineering, MNIIP/VEGA-M Corporation, Russia, 1998, P.8
2. Штейншлейгера Ф.Б., Дзенкевича А.В., Манакова В.Ю. и др. //Радиотехника и электроника 1997, том 42, №6, с.725-732
3. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В.//Радиотехника и электроника,1991, том. 36, с.1-6.
4. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В.//Радиотехника и электроника,1992, №1 с.90-95.
5. Freeman A., Chapman B., Rosen P. // Z. Li, Journal of Geophysical Research, vol. 116, A04303, pp.1-13, April 2011.
6. Kim Jun Su, Dankimayer A., Papathanassiou K. //Symposium IGARSS, 2011 IEEE International, pp. 1505-1508
7. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Y., Freeman A.//Radio Science (USA), 1999, V.34, №1, P.257-268
8. Ефимов А.И., Калинкевич А.А., Кутуза Б.Г. //Радиотехника,1998, №2, с.19-24
9. Goriachkin O.V., //IEEE Proceedings of 1999 International Geoscience and Remote Sensing
10. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа. 1975.
11. Долуханов М.П. Распространение РВ. М.:Гос.Издат. по вопросам связи и радио. 1960
12. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502
13. Кутуза Б.Г., Мошком А.В. // Исследование Земли из космоса 1988, №5, с.94-98
14. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме «Наука» 1967.
15. Стрелков Г.М. //Радиотехника и электроника, 2008, том 53, №9, с.1094-1103

16. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме «Наука» 1972
17. Кравцов Ю.А., Саичев А.И., //Успехи физ. наук, 1982, том.137, вып.3, с.501-527
18. Freeman A., //IEEE Trans. Geosci.Sens., 1992. V.30. №6. P.1107-1121.5
19. Fremam A. et al.:// Radio Science: Vol.13, №1, 1978, pp.167-187.
- 20.Олюнин Н.Н., Сазонов В.В., Виноградов А.Г. //Сборник докладов XVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»,Воронеж, 2010
21. Freeman A., //IEEE Tran.on Geoscience and Remote sensing, V.42, NO.8 2004, P.1617.