

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

## **Пути компенсации влияния ионосферы Земли на качество синтезированных радиолокационных изображений**

А.А.Калинкевич, 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).*

## **On the compensation of the influence of the Earth's ionosphere on the quality of synthesized radar images of the SAR of P-band**

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 деструктивного влияния ионосферы на работоспособность космической РЛС с синтезированной апертурой, работающей в P-диапазоне и развитие методик по преодолению этого влияния показал, что для успешного использования комплекса научной аппаратуры «МКС-РСА(P)» в выполнении космического эксперимента требуется проведение дополнительных исследований параметров ионосферы. Такие исследования могут быть проведены с помощью создания специализированных наземных полигонов для проверки работоспособности РСА P-диапазона.*

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, ионосфера Земли, разрешающая способность по наклонной и путевой дальности, фазово-градиентная автофокусировка, активный калибратор со специфическими возможностями.

*Analysis of the destructive influence of the ionosphere on the performance of the space radars with synthetic aperture working in P-band and overcome this effect showed that for the successful use of complex scientific instruments "ISS-SAR(R)" in the implementation of space experiment is required to conduct additional studies of ionospheric parameters. Such studies can be carried out by creating specialized ground polygons to test the performance of the SAR P-band.*

**Keywords:** synthesized aperture radar, Earth's ionosphere, oblique and track-range resolution, phase-gradient autofocus, active calibrator with specific capabilities  
**Keywords:** synthesized aperture radar, Earth's ionosphere, resolution, plasma.

### **Введение**

Трудности проведения КЭ в P-диапазоне связаны с сильным влиянием ионосферы при прохождении электромагнитного излучения через нее. В этом смысле ионосфера представляет сложный фильтр, при прохождении через который меняется длительность ЛЧМ импульса, огибающая и частотное заполнения свертки, фаза и поляризация электромагнитных волн. Кроме того, в ионосфере наблюдаются пространственно-временные неоднородности, а её характеристики зависят от широты и солнечной активности. В имеющейся литературе недостаточно данных, позволяющих провести количественные оценки влияния ионосферы на работу РСА в диапазоне длинных

дециметровых волн. Выполненный анализ влияния ионосферы на распространение в ней электромагнитного импульса показал, что для успешного использования комплекса научной аппаратуры «МКС-РСА(Р)» в выполнении космического эксперимента требуется проведение дополнительных исследований параметров ионосферы. Такие исследования могут быть проведены с помощью создания специализированных наземных полигонов для проверки работоспособности РСА Р-диапазона. Как правило, основой полигонов является оснащение их набором уголковых отражателей и/или активными калибраторами, позволяющими принимать сигналы от РСА, усиливать и излучать их обратно после временной задержки. Такой вид полигона позволяет измерить разрешающую способность РСА и его радиометрические параметры. Однако из проведенного анализа следует, что такой вид калибровки не подходит для РСА Р-диапазона космического базирования. Для КЭ «МКС-РСА(Р)» предусматривается использование активного калибратора специального типа.

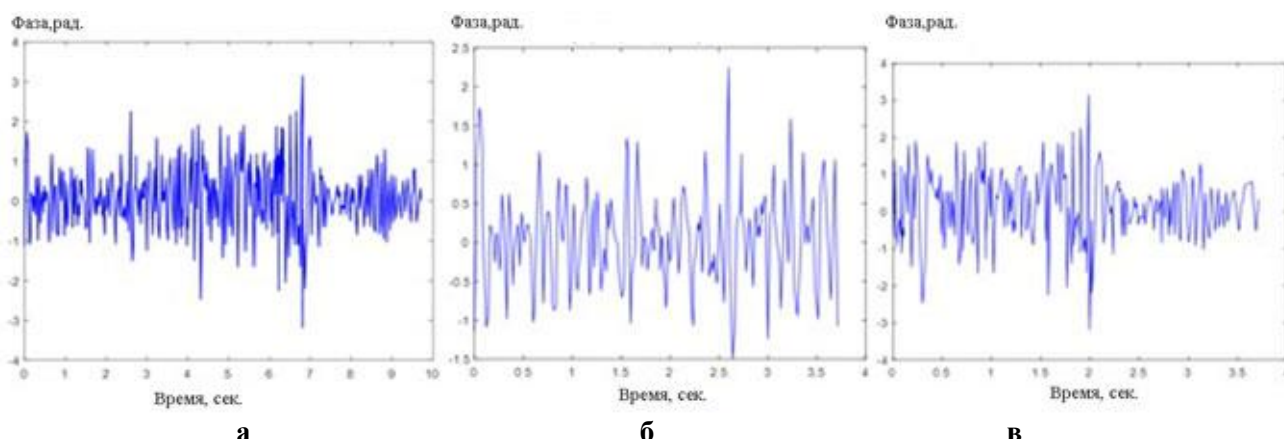
### **Обоснование необходимости создания специализированных наземных полигонов**

Анализ, выполненный в [1], показывают, что частотные компоненты ЛЧМ зондируемого сигнала распространяются в ионосфере с разной скоростью, кроме того, по-разному затухают. Таким образом, форма сигнала и закон частотного заполнения претерпевают изменения. Несмотря на то, что частотная полоса зондируемого сигнала относительно узкая (6 – 50 МГц.), расстояние от МКС до Земли и обратно составляет около 900 км. Поэтому эффективная длительность зондируемого импульса по мере прохождения ионосферы меняется, меняется закон частотной модуляции, меняется и амплитудная форма импульса. Кроме того, происходит смещение МКС от импульса к импульсу. В результате неясно «Как осуществлять свертку отраженного сигнала по дальности?» Кроме того, магнитное поле Земли делает ионосферу анизотропной, так что падающее плоско-поляризованное ЭМИ расщепляется на две волны с противоположным вращением, движущиеся с разными скоростями. В результате происходит поворот плоскости поляризации ЭМИ.

Ионосфера Земли неоднородна по пространству и нестационарна во времени. Пространственные неоднородности имеют масштабы от метров до десятков километров, которые меняются во времени (данный вопрос недостаточно изучен). До конца неясен механизм возникновения этих неоднородностей, скорость их перемещения, время их релаксации, как связаны размеры неоднородностей с высотой их расположения над поверхностью Земли. Неоднородности ионосферы как за счет колебаний угла вращения плоскости поляризации, так и за счет дисперсионных свойств ионосферы приводят к флуктуации фазы принимаемого сигнала. Высокочастотные флуктуации фазы нарушают возможность синтеза изображения по азимуту. Изучение литературы показывает, что наиболее обоснованный метод (двумерный адаптивный метод компенсации ионосферного деструктивного влияния) обработки исходных данных для формирования РЛИ предложен авторами во главе В.Б. Штейншлейгера [2-4]. В этих работах показано, что нельзя разделить процесс формирования синтезированного изображения на отдельные части: синтез по дальности и по азимуту. В качестве исходных данных флуктуации фазы были использованы экспериментальные результаты [5]. Однако проблема о частоте и величине колебаний Фарадеевского угла вращения плоскости поляризации  $\Omega$ , причинах флуктуации фазы на интервале синтеза изображения по азимуту остается открытой.

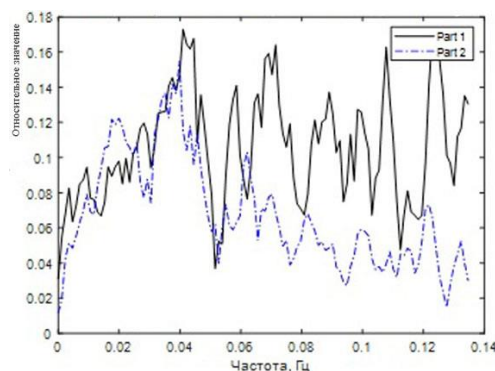
В качестве примера, можно привести анализ данных [5]. В [5] представлены результаты измерения флуктуации фазы для сигналов Р-диапазона круговой

поляризации на временном интервале  $\sim 10$ сек. (рис.1а), а также результаты для первой (б) 5-ти секундной и (в) второй частей.



**Рис.1. Зависимость флюктуации, обусловленных мелкомасштабными неоднородностями ионосферы, монохроматического сигнала на частоте 417 МГц. при приеме сигнала круговой поляризации. Коэффициент корреляции для результатов, представленных на рис. 1б и 1в  $R=0.016$**

Используя полученные зависимости, можно вычислить спектр флюктуаций на интервале 10 сек.  $S(f)$  и на двух близлежащих 3,7-х сек. интервалах  $S_1(f)$  и  $S_2(f)$ . Результаты показывают: а) что спектры флюктуаций фазы превышают спектр доплеровских частот РСА, б) коэффициент корреляции  $S_1(f)$  и  $S_2(f)$  близок к нулю  $R \sim 0.016$ . Сопоставление спектров после выполнения усреднение их спектров скользящим окном по 4-ем измерениям представлено на рис.2. Анализ показывает, что можно выделить две полосы частот  $\Delta f_1(0-0,05$  Гц) и  $\Delta f_2(0,05 - 0,14$  Гц). В полосе частот  $\Delta f_1$  коэффициент корреляции  $R_1 \sim 0.65$ , а в полосе частот  $\Delta f_2(0,05 - 0,14$  Гц)  $R_2 \sim 0.01$ . Таким образом, результаты, полученные [5], соответствуют прохождению ЭМИ как через крупные неоднородности ионосферы, так и через мелкомасштабные.



**Рис.2. Спектры флюктуации фазы двух частей и их сопоставление**

Поэтому требуется разработка метода компенсации ионосферного деструктивного влияния при радиолокационной съемки протяженного участка поверхности. Связано это с тем, что предложенный метод непрерывно должен сам адаптироваться к случайной временной зависимости флюктуации фазы. Кроме того, необходимо выяснить закономерности вращения плоскости поляризации сигнала от шероховатой поверхности. Следует также отметить, что фазово-градиентную автофокусировка

можно эффективно использовать при наличии на местности отдельных малоразмерных объектов, имеющих повышенную отражательную способность.

Для более успешного использования комплекса научной аппаратуры «МКС-РСА(Р)» при выполнении космического эксперимента предполагается провести дополнительные эксперименты по изучению влияния ионосферы и особенностей отражения от подстилающей поверхности на синтезированные радиолокационные изображения. Такие исследования могут быть проведены с помощью создания наземных полигонов. Наземное оборудование должно работать в разных режимах по программе, согласованной с режимом работы РСА Р-диапазона. Совместная работа бортовой и наземной аппаратуры должна быть направлена на изучение влияния ионосферы, отражения от поверхности Земли, для выполнения внешней калибровки РСА.

Как правило, наземные полигоны оснащаются набором уголкового отражателей и/или активными калибраторами, позволяющими принимать сигналы от РСА, усиливать и излучать их обратно после временной задержки. Для космического варианта в Р-диапазоне в случае использования линейных поляризаций приемно-передающее устройства активного калибратора должны оснащаться двумя ортогональными каналами. В каждом канале выполняется цифровая регистрация сигнала на несущей СВЧ частоте, обработкой принимаемого сигнала и дальнейшее пере-излучение их в соответствии с режимом работы.. Вид передающих СВЧ сигналов активного калибратора должен меняться в зависимости от поставленной задачей синхронно с работой РСА.

Частотные компоненты ЛЧМ зондируемого сигнала распространяются в ионосфере с разной скоростью, кроме того, по-разному затухают. Таким образом, форма сигнала и закон частотного заполнения претерпевают изменения. Несмотря на то, что частотная полоса зондируемого сигнала относительно узкая (6 – 50 МГц.), расстояние от МКС до Земли и обратно составляет около 900 км. Поэтому эффективная длительность зондируемого импульса по мере прохождения ионосферы меняется, меняется закон частотной модуляции, меняется и амплитудная форма импульса. Кроме того, происходит смещение МКС от импульса к импульсу, а также поворот плоскости поляризации ЭМИ.

Ионосфера Земли неоднородна по пространству и нестационарна во времени. Пространственные неоднородности имеют масштабы от метров до десятков километров, которые меняются во времени (данный вопрос недостаточно изучен). До конца неясна скорость перемещения мелкомасштабных составляющих, время их релаксации, как связаны размеры неоднородностей с высотой их расположения над поверхностью Земли. Неоднородности ионосферы приводят к флуктуации фазы принимаемого сигнала. как за счет колебаний угла вращения плоскости поляризации, так и за счет дисперсионных свойств ионосферы. Высокочастотные флуктуации фазы представляют наиболее важную часть для получения выполнения синтеза изображения по азимуту.

Таким образом, видно, что для успешного применения РСА Р-диапазона необходимо проведение исследование ионосферы, хотя бы в отдельных районах радиолокационной съемки. При этом данный полигон помимо трехгранных уголкового отражателей необходимо оснастить аппаратурой, которая позволяла бы выполнять роль не только активного отражателя, но и выполнять специфические функции. Необходимо отметить, что функциональные особенности уголкового отражателя и активного калибратора для Р-диапазона разные. В частности, можно отметить, что для круговой поляризации при отражении от ровной поверхности меняется направление вращения плоскости поляризации на противоположное. Для обычного активного калибратора

направления вращения плоскости поляризации не изменяется, т.е. при распространении ЭМИ на участке Земля-спутник фарадеевский угол поворота будет скомпенсирован. В этом случае РСА Р-диапазона и наземный сегмент функционируют как единый комплекс.

### **Требования к аппаратуре наземного сегмента**

В данном эксперименте активный калибратор предназначен:

а) для приема от передатчика РСА (Р) сигналов, формирование на их основе пачки отраженных сигналов, имитирующих отражение от точечной цели (изменение по амплитуде и по времени задержки);

б) для изменения времени задержки от 1,2 до 6 длительности импульса (длительность ЛЧМ импульса 50 мксек);

в) обеспечивать излучение нескольких импульсов в течение времени повторения зондирующего импульса;

г) обеспечивать режим, когда поляризация сигнала на выходе активного калибратора та же, что и на входе, или повернутая на задаваемый по программе угол.

При пролете над полигоном для каждого зондирующего импульса РСА V/Н поляризации определяется форма огибающей сигнала на поверхности Земли на V и Н поляризациях. В результате для каждого импульса на трассе спутник-земля, а также на трассе земля-спутник имеется возможность измерять его длительность, огибающую, закон частотного заполнения, значение фарадеевского угла поворота плоскости поляризации, изучить интервал времени, при котором соблюдается принцип взаимности.

Полученных данных за время пролета МКС над данным устройством позволяют определить интенсивность флуктуаций угла поворота плоскости поляризации, оцениваются флуктуации параметров сигнала, вызванные прохождением ЭМИ как на трассе спутник-земля, так и на трассе земля-спутник.

При отражении от поверхности земли происходит изменение поворота плоскости поляризации отраженного сигнала. Возможность изменение плоскости поляризации на выходе активного калибратора дает возможность изучить влияние поворота на качество РЛИ.

### **Заключение**

Анализ влияния ионосферы на работу космического РСА Р-диапазона показал необходимость создания специализированного наземного полигона, оборудованного не только трехгранными уголковыми отражателями, но и модифицированным транспондером с аппаратно-программным комплексом обработки информации., работающего совместно с оборудованием на МКС. Совместное согласованное функционирование РСА Р-диапазона с наземным сегментом позволяет проводить исследования, имеющие двойное значение: 1) изучение параметров ионосферы и 2) отработка методики обработки голографических данных РСА для получения качественных РЛИ, необходимых для интерпретации отражательных свойств поверхности.

### **Литература**

1. Материалы доклада Калинкевича А.А., Кутузы Б.Г., Манакова В.Ю. и др. « Влияние ионосферы Земли на работу РСА Р-диапазона» на данной конференции.
2. Штейншлейгера Ф.Б., Дзенкевича А.В., Манакова В.Ю. и др. //Радиотехника и электроника 1997, том 42, №6, с.725-732

3. Штейншлейгера Ф.Б., Дзенкевича А.В., Манакова В.Ю. и др. //Радиотехника 1998, №10, с.101-104, с.725-732
4. V. Shteinshleiger, A. Dzenkevich V. Manakov, L. Melnikov, G. Misezhnikov: “EUSAR-98” Conference Proc., 1998, pp.157-161
5. E. Fremouw et al.:// Radio Science: Vol.13, №1, 1978, pp.167-187
6. Rogers N.C., S. Quegan S., Kim J.S., and Papathanassiou K.P. // IEEETrans. Remote Sens., vol. 52, no. 3, pp. 1856–1868, Mar. 2014.
7. Zhuo Li, Shaun Quegan, Jie Chen, Neil C. Rogers // IEEE Geoscience and Remote sensing Letters , Vol.12, NO 6, June 2015