

## **Разработка методики по компенсации деструктивного влияния ионосферы на результаты радиолокационной съемки Земли с помощью РСА метрового диапазона**

А.А.Калинкевич<sup>1</sup>, В.А.Плющев<sup>2</sup>, А.А.Черниенко<sup>2</sup>

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

E-mail: [e-mail@compute.su](mailto:e-mail@compute.su), [kutuza@cplire.ru](mailto:kutuza@cplire.ru)

<sup>2</sup> Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»»

121170, г. Москва, Кутузовский проспект, 34.

E-mail: [e-maill@vega.su](mailto:e-maill@vega.su)

В докладе рассматриваются вопросы преодоления деструктивного влияния ионосферы для получения космических радиолокационных изображений поверхности Земли с высокой разрешающей способностью с помощью космических радиолокационных станций бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА), работающей в метровом диапазоне длин волн. Предложенная ранее методика по компенсации влияния ионосферы Земли предполагала адаптивную обработки участка поверхности Земли и позволяет компенсировать влияние крупномасштабных неоднородностей ионосферы. Мелкомасштабных неоднородности ионосферы оказывают большое влияние как на сжатие сигнала по дальности, так и на синтез сигналов по азимуту. В работе адаптивная методика по компенсации влияния ионосферы предлагается на этапе регистрации каждого отраженного сигнала, т.е. учесть влияние мелкомасштабных неоднородностей. Дальнейшая обработка по формированию синтезированного по азимуту изображению выполняется стандартными разработанными методами. Влияние ионосферы проявляется на как на структуре зондирующего импульса, так и на его длительности. При этом необходимо учитывать, что разрешающая способность на местности  $\Delta_l = \frac{c\tau}{2\sin\alpha}$  не соответствует

разрешающей способности радиоимпульса  $\Delta = \frac{c\tau}{2}$ . Дополнительно необходимо учитывать, что

структура зондированного сигнала при распространении его в ионосфере меняется, меняется также его длительность. На данном этапе исследований рассматривается только влияние изменения длительности. Из-за отсутствия космических экспериментов с РСА метрового диапазона длин волн рассмотрение возможной реализации предлагаемого метода выполнено на базе материалов самолетных экспериментов.

Ключевые слова: радиолокационная станция с синтезированной апертурой метрового диапазона длин волн, ионосфера, интегральная электронная концентрация, ступенчатый ЛЧМ сигнал.

## **Development of a methodology for compensating for the destructive influence of the ionosphere on the results of radar surveys of the Earth using meter-range SAR**

A.A.Kalinkevich<sup>1</sup>, V.A.Plyushchev<sup>2</sup>, A.A.Cherniyenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.

<sup>2</sup> Aktsionernoeye obshchestvo «Kontsern radiostroyeniya "Vega"»

The report considers the issues of overcoming the destructive influence of the ionosphere to obtain high-resolution space radar images of the Earth's surface using space side-looking synthetic aperture radars (SAR) operating in the meter wavelength range. The previously proposed technique for compensating for the influence of the Earth's ionosphere assumed adaptive processing of a section of the Earth's surface and allows compensating for the influence of large-scale ionospheric inhomogeneities. Small-scale ionospheric inhomogeneities have a great influence both on signal compression by range and

on signal synthesis by azimuth. In this paper, an adaptive technique for compensating for the influence of the ionosphere is proposed at the stage of recording each reflected signal, i.e. to take into account the influence of small-scale inhomogeneities. Further processing to form an image synthesized by azimuth is performed using standard developed methods. The influence of the ionosphere is manifested both on the structure of the probing pulse and on its duration. It should be taken into account that the resolution on the

ground  $\Delta s = \frac{c\tau}{2\sin\alpha}$  does not correspond to the resolution of the radio pulse  $\Delta = \frac{c\tau}{2}$ . Additionally, it is

necessary to take into account that the structure of the probed signal changes during its propagation in the ionosphere, and its duration also changes. At this stage of the research, only the effect of duration change is considered. Due to the lack of space experiments with SAR in the meter wavelength range, the consideration of the possible implementation of the proposed method is performed on the basis of aircraft experiment materials.

**Key words:** radar with a synthetic aperture in the meter wavelength range, ionosphere, integral electron density, stepped chirp signal.

## **Введение**

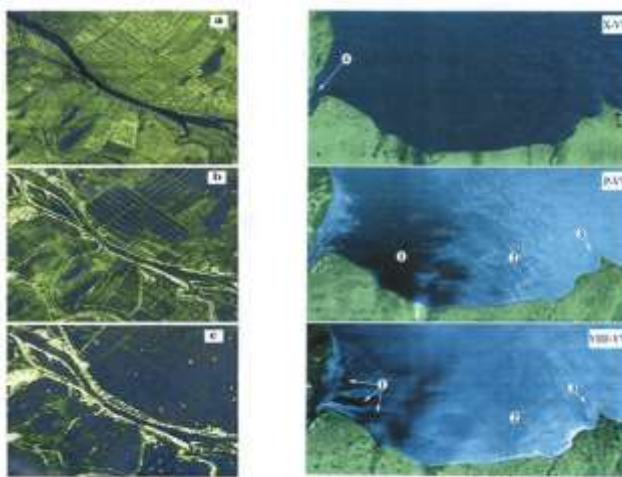
Радиолокаторы бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА) самолетного и космического базирования стали давно использоваться для дистанционного изучения природных ресурсов Земли, а также для решения прикладных задач. Проникающая способность электромагнитных волн метрового диапазона длин волн в растительные и почвенные покровы возрастает с увеличением длины волны электромагнитного излучения. В результате применение РСА метрового диапазона целях подповерхностного и покрова под растительностью представляет большой интерес. Экспериментальные результаты по применению РСА, работающих в метровом диапазоне длин волн, показали перспективность использования (см. Рис.1) таких систем. Однако влияние ионосферы (особенно ее неоднородностей) не позволяет получение качественных радиолокационных изображений с хорошей разрешающей способностью для РСА космического базирования. Это является основной причиной, почему до настоящего времени нет попыток реализации космических проектов с РСА метрового диапазона длин волн.

Более 50 лет делаются попытки предложить методы компенсации влияния ионосферы на радиолокационные изображения, но надежности их применения по существу не доказана. Связано это с тем, что параметры ионосферы зависят от солнечной активности, от сезонного и суточного времени наблюдения, от широты наблюдения и т.д. Ионосфера неоднородна, масштабы пространственных неоднородностей от метров и более. Кроме того, поведение неоднородностей (особенно мелкомасштабных) непредсказуемы. Проблемы получения радиолокационных изображений связаны именно с мелкомасштабными неоднородностями. Таким образом, для эффективного использования РСА метрового диапазона длин волн необходимо знание флуктуации неоднородностей ионосферы на участке трассы синтезирования.

В настоящее время рассматривается проект по созданию новой РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ (РОС). Предполагается, что уже на первом этапе РОС будет оснащена РСА диапазона  $\lambda = 0,68 \text{ метра}$ .

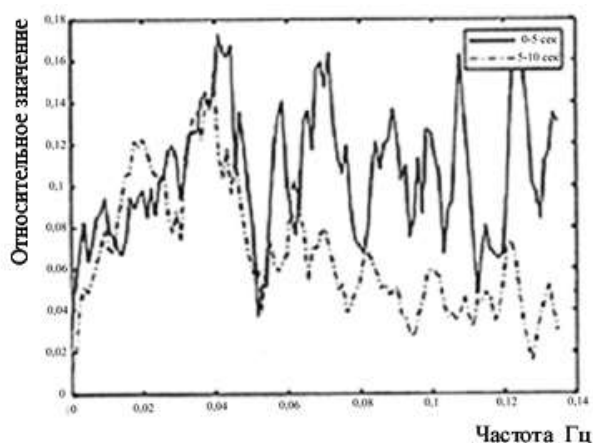
## **Проблемы при использовании РСА Р и УКВ диапазонов длин волн с борта ИСЗ**

Анализ радиолокационных изображений морской, поверхности Земли, ледовых покровов (для примера, см. Рис.1) показывает перспективность использования РСА Р и УКВ диапазонов длин волн в исследованиях природных ресурсов Земли и для прикладных задач. Однако влияние ионосферы на распространение радиоволн этих диапазонов не позволяет получить изображения с высоким разрешением.



**Рис.1 Примеры радиолокационных изображений, полученных с помощью самолетной аппаратуры в диапазоне длин волн: а)  $\lambda = 3,9$  см; б)  $\lambda = 68$  см; в)  $\lambda = 2$  м**

Используя 10-секундные экспериментальные результаты американских ученых [1] при пролете ИСЗ с передатчиком и наземной приемной аппаратурой с использованием спутниковой и наземной приемной аппаратурой были получены спектры флюктуации фазы на интервале 0-5сек. и 5-10 сек. см. Рис.2.



**Рис.2 Спектр флюктуации фазы при прохождении ЭМ-излучения с частотой 417 МГц через ионосферу на временных интервалах 0-5 сек. и 6-10 сек.**

Анализ экспериментальных результатов, полученных в работе [4], показал, что на интервале времени 10 сек. (данный временной интервал соизмерим с интервалом необходимым для выполнения синтеза), флюктуации фазы двух соприкасающихся 5-секундных части отличаются. На рис.3 представлены спектры флюктуаций фаз двух участков, соответствующих временным интервалам 0-5 сек. и 6-10 сек. Следует отметить, что низко-частотные участки 0-0,05 Гц практически совпадают, что соответствует крупномасштабным неоднородностям ионосферы. Виды высоко-частотных спектров в области 0,05-0,14 Гц (ответственные за качество синтезированного изображения) значительно различаются. Полученные результаты указывают на то, что попытки получения качественных радиолокационных изображений с помощью РСА Р и УКВ диапазонов маловероятно. Необходима разработка способа по компенсации влияния ионосферы на качество радиолокационных изображений. В настоящее время в РСА самолетного и космического исполнения применяются ЛЧМ сигналы, точнее сигналы со ступенчатой частотной модуляцией (СИЧ). Виды СИЧ сигналов могут быть много-образными [5]. В

частности, они могут быть с нелинейной частотной модуляцией (предполагается, что они для использования в радиолокации будут более перспективными). На рис.3 представлен наиболее простой вид СИЧ. При этом полагается, что длительности подымпульсов одинаковы, а изменение частоты от одного подымпульса к другому равно  $\Delta f = |f_{i+1} - f_i|$ . Каждый подымпульс с частотой  $f_i$  распространяется в ионосфере со своей групповой скоростью

$$v_{групп} = cn(f_i) = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f_i}\right)^2} < c \quad (1)$$

где  $f_0 (KГц) = \sqrt{80,6 \cdot N(x, y)(см^{-3})}$  - критическая частота, определяемая электронной концентрацией ионосферы. Величина  $f_0 \leq 10 MГц$  и значительно меньше частоты используемого радио излучения. Поэтому значение групповой скорости можно представить в виде

$$v_{групп} = cn(f_i) = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f_i}\right)^2} \approx c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_0}{f_i}\right)^2\right] = c \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{80,6 \cdot N(s)}{f_i^2}\right] \quad (2)$$

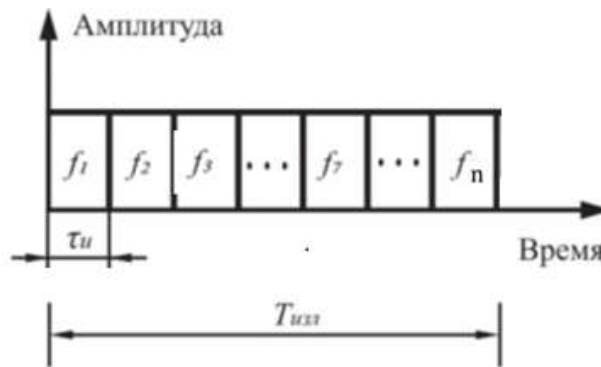


Рис.3. Частотная структура СИЧ сигнала

При этом полагается, что длительности подымпульсов одинаковы, а изменение частоты от одного подымпульса к другому равно  $\Delta f = |f_{i+1} - f_i|$ . Каждый подымпульс с частотой  $f_y$  распространяется в ионосфере со своей групповой скоростью

$$v_{групп} = cn(f_i) = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f_i}\right)^2} < c \quad (3)$$

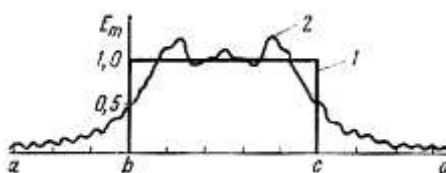
Здесь  $f_0 (KГц) = \sqrt{80,6 \cdot N(x, y)(см^{-3})}$  - критическая частота, определяемая электронной концентрацией ионосферы. Величина  $f_0 \leq 10 MГц$  и значительно меньше частоты используемого радио излучения. Поэтому значение групповой скорости можно представить в виде

$$v_{групп} = cn(f_i) = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_0}{f_i}\right)^2} \approx c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_0}{f_i}\right)^2\right] = c \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{80,6 \cdot N(s)}{f_i^2}\right] \quad (4)$$

т.е. групповая скорость распространения подымпульсов с большей частотой распространяется с большей скоростью. В результате возникают два эффекта.

1) Если подымпульс не очень короткий и спектр его не широк, то есть разница в групповых скоростях отдельных гармоник подымпульса невелика, можно считать, что

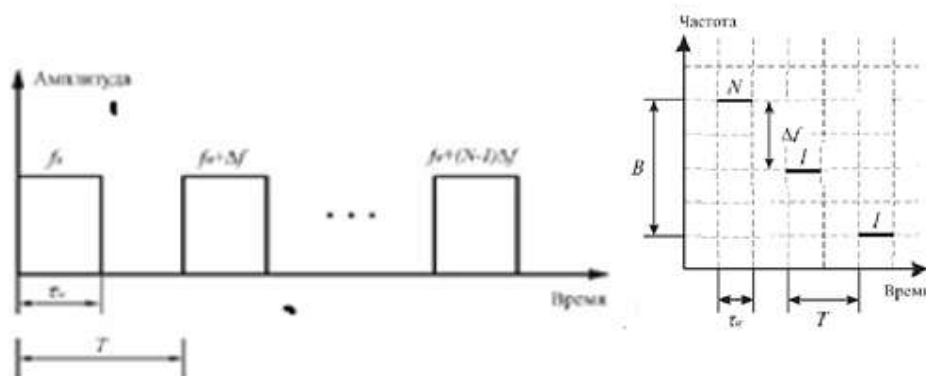
весь импульс распространяется со скоростью, соответствующей групповой скорости несущей частоты. Однако подымпульсы при прохождении через ионосферу искажаются. Ориентировочный характер искажений прямоугольного импульса изображен на рис. 4.



**Рис. 4. Искжение прямоугольного импульса при прохождении радиоволн через слой ионосферы: 1 - первоначальная форма импульса; 2 - форма импульса после прохождения через ионосферу**

Группа высоких гармоник распространяется с большой групповой скоростью и создает сигнал - предвестник (часть a-b). Основная часть энергии - "тело" импульса (часть b-c) распространяется со скоростью, соответствующей несущей частоте. Группа низких гармоник распространяется с меньшей групповой скоростью и создает запаздывающий сигнал (часть c-d). Сам подымпульс оказывается "размытым". «Размытость» определяется характеристиками ионосферы - возникает возможность перекрытия соседних подымпульсов и непредсказуемых эффектов.

2) Каждый подымпульс (см. выражение 4) распространяется со своей групповой скоростью. При использовании ступенчатого ЛЧМ сигнала, в котором предполагается начало излучения с более низкочастотных подымпульсов, при распространении в ионосфере, будут наблюдаться их перекрытия и непредсказуемые эффекты. С учетом вышесказанного следует использовать не непрерывный СИЧ, а СИЧ с разрывами. Вид структуры представлен на рис.5



**Рис.5. Структура предлагаемого СИЧ радиолокационного сигнала для исключения непредсказуемых эффектов**

При распространении предлагаемого плоско-поляризованного СИЧ радиолокационного сигнала через ионосферу плоскость поляризации его будет меняться, одновременно меняется общая длительность зондируемого радиолокационного сигнала, кроме того из-за зависимости скорости распространения подымпульсов меняется структура СИЧ сигнала представленной. Непредсказуемые изменения структуры зондируемого СИЧ сигнала не позволяют получать синтезированные радиолокационные изображения Земной поверхности с высокой разрешающей способностью. Данную ситуацию с учетом непредсказуемости поведения неоднородностей ионосферы особенно в области больших широт для эффективного использования РЛИ в диапазоне Р и УКВ можно компенсировать

знанием параметров ионосферы (в частности, флуктуаций интегральной концентрации электронов). Основная задача заключается в необходимости в момент проведения радиолокационной съемки одновременно измерять флуктуации интегральной концентрации электронов на трассе ИСЗ-Земля-ИСЗ во всей полосе радиолокационного обзора с высокой разрешающей способностью.

**Предполагаемая методика для получения карты интегральной электронной концентрации над участком радиолокационной съемки.**

Процесс получения радиолокационных изображений основывается на сжатии эхо-сигнала по дальности и синтезировании апертуры в азимутальной плоскости путем когерентной обработки последовательности отраженных сигналов от выбранного элемента поверхности. Основная задача заключается в необходимости в момент проведения радиолокационной съемки одновременно получать карту флуктуаций интегральной концентрации электронов на трассе ИСЗ-Земля-ИСЗ во всей полосе радиолокационного обзора с высоким разрешением. В дальнейшем рассмотрение выполняется в координатах  $s$  – расстояние по направлению зондирования и  $y$ -направление движения самолета. Время распространения основная часть энергии каждого подымпульса с частотой  $f_i$  от носителя до элемента поверхности и обратно будет

$$t_i = 2 \int_s^0 \frac{ds}{c \cdot n_i} = \frac{2}{c} \int_s^0 \frac{ds}{[1 - (\frac{f_0}{f_i})^2]^{\frac{1}{2}}} = \frac{2}{c} \cdot \int_s^0 \frac{ds}{(1 - \frac{80,6 \cdot N(s)}{f_i^2})^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{2}{c} \cdot (S + \frac{40,3}{f_i^2} \int_s^0 N(s) \cdot ds) \quad (3)$$

Здесь величина  $V = \int_s^0 N(s) \cdot ds$  является величиной интегральной электронной концентрации ионосферы в указанном направлении.

При выполнении обработки по сжатию отраженного сигнала можно задать произвольное значение  $V_i$  и по этому значению построить ожидаемую структуру принимаемого СИЧ, которая используется для сжатия СИЧ сигнала по дальности. Такая процедура (адаптивная обработка сигнала выполняется для ряда значений  $V_i$ ). По анализу сжатых отраженных импульсов по дальности для разных значений  $V_i$  появляется возможность выполнить определить зависимость значений  $V_i$  от угла визирования, т.е. выполнить компенсацию влияния ионосферы на значение отраженного сигнала от угла зондирования. Таким образом, адаптивная обработка каждого зондирующего сигнала по дальности позволяет на начальном этапе получения отраженного радиолокационного сигнала выполнить компенсацию влияния ионосферы. Полученная структура используется для свертки эхо-сигнала по дальности и позволяет для каждого зондирующего импульса получить после этой процедуры находятся элементы по дальности, которые оптимально соответствуют значению  $V_i$ . При варьировании значением  $V_j$  определяется изображение строки в формате интегральной электронной концентрации. Следует отметить, что данная строка формируется не по одному направлению, т.к. диаграмма направленности РСА в азимутальном направлении широкая. Принимаемый РСА сигнал, формируемый суммой отражений с разных направлений, определяемым ДНА. При этом с каждого направления отражение будет (может) определяться своим значением интегрального электронного содержания. Выполняя указанную операцию для каждого импульса зондирования, по аналогии с работой РСА появляется возможность получения голограммы в формате интегральной электронной концентрации. Следующий этап необходимый для получения карты интегральной электронной концентрации над территорией радиолокационной

съемки соответствует синтезированию апертуры в азимутальной плоскости путем когерентной обработки последовательности отраженных сигналов от выбранного элемента поверхности, но в формате интегральной электронной концентрации над участком радиолокационной съемки.

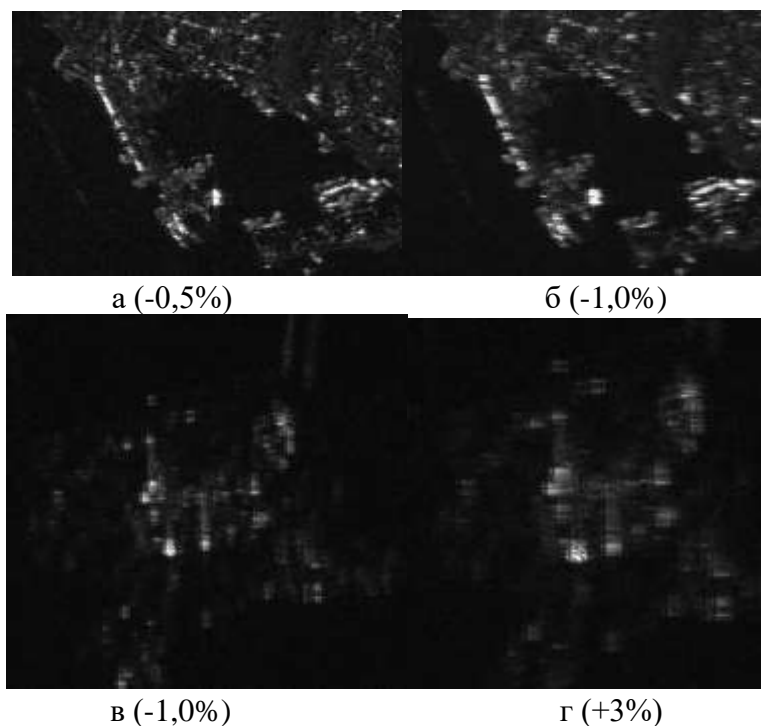
#### **Оценки возможного влияния нарушения структуры принимаемого сигнала на качество радиолокационного изображения.**

Отсутствие каких-либо экспериментальных данных вынуждает выполнить некоторую проверку путем изменения способов получения синтезированных радиолокационных изображений. Для этого были использованы данные РСА Р-диапазона.

Разрешающая способность РСА по дальности  $\Delta = \frac{cT}{2}$  определяется длительностью

импульса. Однако реально разрешающая способность по поверхности  $\Delta s = \frac{cT}{2\sin\theta}$ , где  $\theta$  -

угол визирования элемента разрешения (в случае с ионосферой изменение длительности импульса дополнительно определяется интегральной электронной концентрацией). В пределах зоны обзора угол визирования  $\theta$  меняется. При обработке во время сворачивания импульса до дальности полагалось, что длительность изменяется на некоторую величину (на некоторый процент %). На рис.6. представлены результаты влияния этой обработки при изменении предполагаемого изменения длительности импульса.



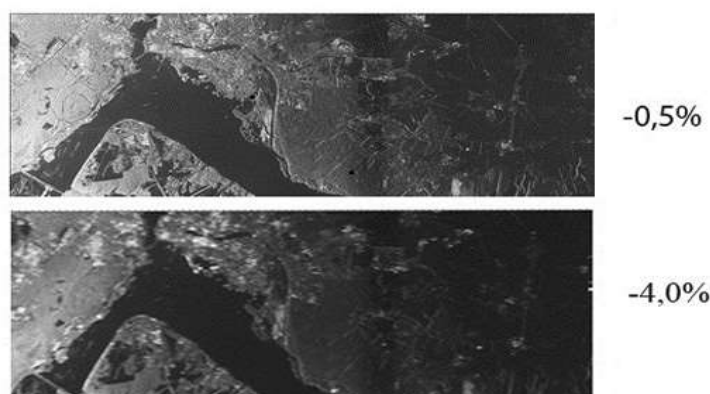
**Рис.6. Влияние рассогласования оптимальной обработки (по длительности импульса) на качество радиолокационного изображения**

#### **Предложение по обработке исходных радиолокационных данных для компенсации влияния ионосферы.**

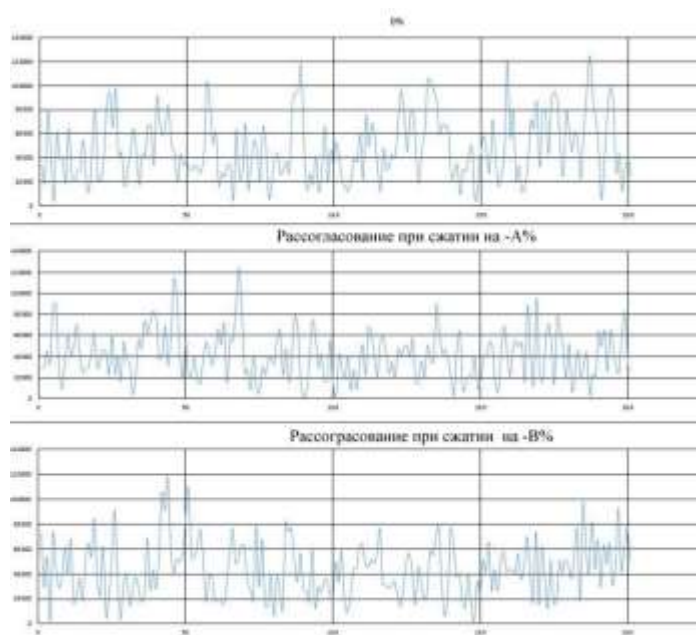
В работе [2] в качестве критерия оптимальной обработки для компенсации влияния ионосферы использовались максимальные значения интенсивности, а также визуальные оценки РЛИ. На рис.7 представлены для сравнения изображения одного и того же участка поверхности земли, полученные при оптимальной обработке по длительности Рис.7а, и при

предполагаемым изменением (уменьшением) длительности сигнала рис.7б. Действительно качество (фокусировка) изображения меняется, нарушается масштаб, наблюдаемый размер длительности отдельных объектов, происходит смещение расположения наблюдаемых объектов, меняется интенсивность отраженных сигналов. Увеличение длительности импульса обработки приводит к противоположным эффектам. В качестве примера можно привести случай, когда длительность импульса обработки оптимально соответствует середине полосы обзора. При углах наблюдения меньше этого угла разрешающая способность по поверхности больше  $\Delta = \frac{cT}{2}$ , а при углах наблюдения больше этого угла

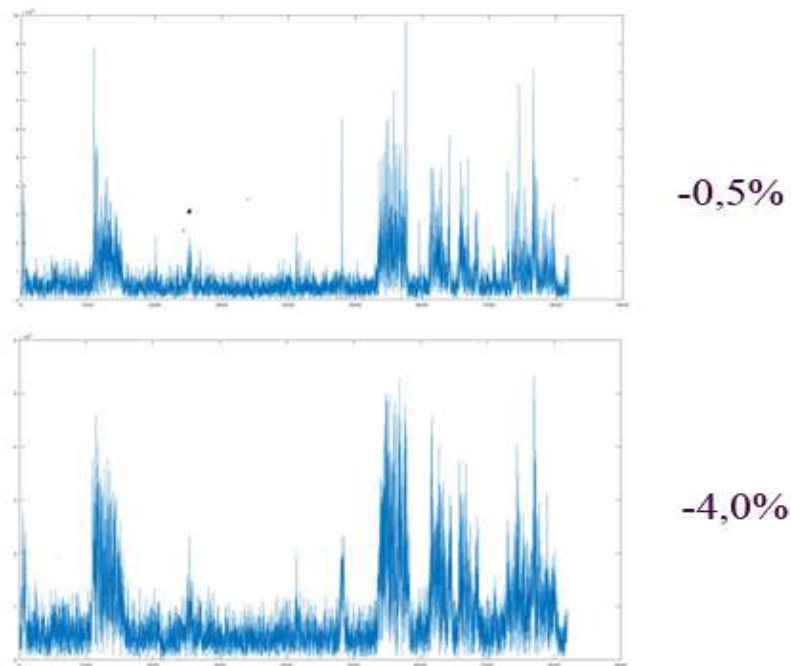
меньше. В случае космических систем метрового диапазона оптимальная длительность импульса обработки РСА должна меняться не только по углу наблюдения, но также от импульса к импульсу за счет мелкомасштабных неоднородностей ионосферы. В качестве примера на Рис.8 представлен пример, на какие параметры изображения отраженного импульса скажется изменения длительности импульса обработки. Влияние мелкомасштабных неоднородностях ионосферы будет наблюдаться не только от одного импульса зондирования к другому, но и внутри изображения одной строки.



**На рис.7 Влияние рассогласования оптимальной обработки (по длительности импульса  $\Delta$ ) на качество радиолокационного изображения.**



а



б



в

**Рис.8 Влияние рассогласования разрешающей способности длительности обработки сигнала  $\Delta = \frac{cT}{2}$  от разрешающей способности на поверхности Земли  $\Delta s = \frac{cT}{2\sin\theta}$  для одной строки отраженного сигнала по дальности.**

Рассмотрение показывает, что происходят качественные изменения вида отраженного сигнала, смещение изображения по дальности, масштаб изображения меняется. При смене знака изменения длительности импульса обработки направление этого влияния меняется на противоположное. Отметим, что даже такое рассмотрение (учитывается только изменение длительности импульса, но не принимается во внимание изменение его структуры при

прохождении через ионосферу) указывает на то, что для компенсации влияния ионосферы на результаты радиолокационной съемки необходимо выполнять ее на этапе регистрации каждой строки. Авторы данной работы предлагают выполнять компенсации влияния ионосферы для каждого отраженного импульса, соответствующего разным углам зондирования, используя адаптивную методику. При этом в качестве критерия использовать минимальные величины длительности отраженного сигнала по дальности для ряда углов зондирования. Такой подход позволяет дальнейшую обработку для получения синтезированного изображения осуществлять стандартными методами, разработанными для высокочастотных РСА. Смысл такого подхода заключается в том, что изображение каждого элемента поверхности формируется за счет когерентной обработки сигналов при пролете над участком поверхности, над которой случайным образом непрерывно меняется значение интегральной электронной концентрации (см. рис.1). Следует отметить, что частота этих флуктуаций для разных углов зондирования может быть разной.

Рассмотрим тонкую структуру радиолокационного изображения рис. Вид этой структуры представлен на рис. и определяется построением и обработкой радиолокационной системы и не зависит от условий и объектов съемки. Поэтому на этапе получения реальных и мнимых изображений возможно усреднение в пределах времени, определяемой максимальной доплеровской частотой. Адаптивная обработка позволяет получить радиолокационное изображение одной строки.

### **Заключение**

Рассмотрен метод компенсации влияния ионосферы на качество (повышение разрешающей способности РСА) радиолокационных изображений поверхности Земли, получаемых с помощью спутниковых радиолокационных станций бокового обзора, работающих в метровом диапазоне длин волн. Предлагается внести дополнительный этап обработки - предложено для компенсации влияния ионосферы Земли выполнять построчную адаптивную обработку, позволяющую учесть влияние мелкомасштабных неоднородностей ионосферы. Отмечается, что при выполнении адаптивной обработки возникают особенности, требующие дорабатывать методику обработки. Рассмотрение выполнено для случая, когда ионосфера влияет только на длительность принимаемого сигнала. Предполагается, что используется линейно частотно модулированный импульсный сигнал с разрывами. Однако влияние нарушения структуры зондирующего импульса при распространении на данном этапе исследования не учитывается. Получение радиолокационных изображений предполагает по первичным результатам съемки можно построить карту интегральной электронной концентрации над выбранным участком поверхности с высоким пространственным разрешением.

### **Литература**

1. Кретов Н.В., Рыжкова Т.Е., Федорова Л.В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой // Радиотехника и электроника. 1992. №1. стр. 90-95
2. Штейншлейнер В.Б., Дзенкевич А.В. и др. О разрешающей способности трансionoсферной РЛС с синтезированной апертурой для дистанционного зондирования Земли в УКВ диапазоне волн // Радиотехника и электроника. 1998. №10. стр. 101-104
3. Fremouw E.J., R.L. Leadabrand et al Early results from DNA Wideband satellite experiment – Complex-signal scintillation. //Radio Science. 1978. V.13, N 1, P. 167-187
4. Галкин Н.К., Голов Н.А. Методы синтеза зондирующих сигналов со ступенчатым изменением частоты // Радиотехника. ISSN 1684-1719, N6, 2021. N6, 2021