

К вопросу компенсации влияния ионосферы на результаты радиолокационной съемки Земли с помощью РСА метрового диапазона

А.А.Калинкевич¹, В.А.Плющев², А.А.Черниенко²

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

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

² Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»»

121170, г. Москва, Кутузовский проспект, 34.

E-mail: e-mail@vega.su

В докладе рассматриваются вопросы компенсации влияния ионосферы для получения радиолокационных изображений поверхности Земли с высокой разрешающей способностью с помощью радиолокационных станций бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА), работающей в диапазонах длин волн $\lambda \approx 0,7 - 2$ метров. Методика по компенсации влияния ионосферы Земли основывается на построении карты интегрального значения электронной концентрации над местом радиолокационной съемки (РС) непосредственно при ее выполнении. Из-за отсутствия космических экспериментов с РСА Р-диапазона рассмотрение возможной реализации предлагаемого метода выполнено на базе материалов самолетных экспериментов. Ключевые слова: радиолокационная станция с синтезированной апертурой Р-диапазона длин волн, ионосфера, интегральная электронная концентрация, ступенчатый ЛЧМ сигнал.

On the issue of compensating for the influence of the ionosphere on the results of radar imaging of the Earth using meter range SAR

A.A.Kalinkevich¹, V.A.Plyushchev², A.A.Cherniyenko²

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

² Aktsionernoeye obshchestvo «Kontsern radiostroyeniya "Vega"»

The report discusses ionospheric compensation for obtaining high-resolution radar images of the Earth's surface using side-scan synthetic aperture radar (SAR) operating in the wavelength ranges $\lambda \approx 0,7 - 2m$. The technique for compensating for the influence of the Earth's ionosphere is based on constructing a map of the integral value of the electron concentration over the location of the radar survey (RS) directly during its implementation. Due to the lack of space experiments with P-band SAR, consideration of the possible implementation of the proposed method was carried out on the basis of materials from aircraft experiments.

Keywords: P-band synthetic aperture radar, ionosphere, integral electron density, step 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. Так как проникающая способность электромагнитных волн в растительные и почвенные покровы зависит от длины волны, то для самолетного базирования используются РСА в различных диапазонах длин волн, начиная с сантиметрового диапазона до метрового. Использование РСА в различных диапазонах длин волн показали, что использования РСА, работающих в диапазоне длин волн $\lambda \approx 1 - 5$ метров, очень перспективно (рис.1).

Однако влияние ионосферы не позволяет получение радиолокационных изображений с хорошей разрешающей способностью для РСА космического базирования. Это является основной причиной, почему до настоящего времени нет попыток реализации космического проекта с РСА Р-диапазона.

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, мелкомасштабные неоднородности непредсказуемы (особенно в полярных областях). Проблемы получения радиолокационных изображений связаны именно с мелкомасштабными неоднородностями. Таким образом, для эффективного использования РСА дециметрового $\lambda = 0,68\text{метра}$ (тем более длинноволнового) диапазона длин волн необходимо знание флюктуации неоднородностей ионосферы на участке трассы синтезирования.

В настоящее время рассматривается проект по созданию новой РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ. Предполагается, что уже на первом этапе она 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.

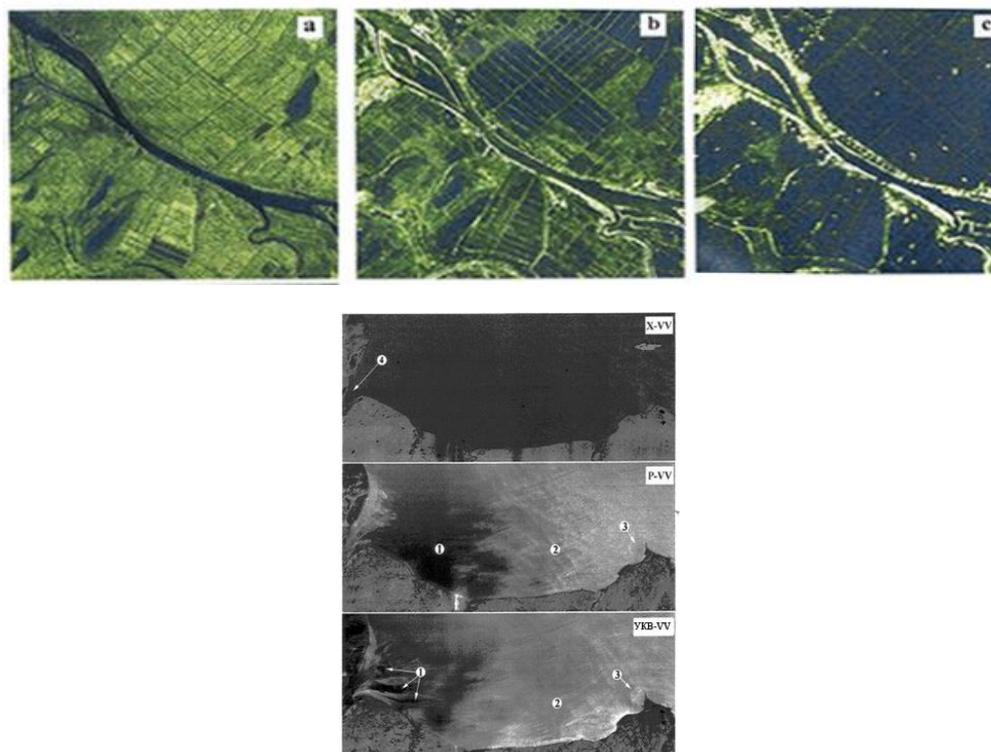


Рис.1. Примеры радиолокационных изображений полученных с помощью самолетной аппаратуры в диапазоне длин волн: а) $\lambda = 3,9\text{ см}$; б) $\lambda = 68\text{ см}$; в) $\lambda = 1,2\text{ м}$

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 6-10 сек. см. Рис.2.

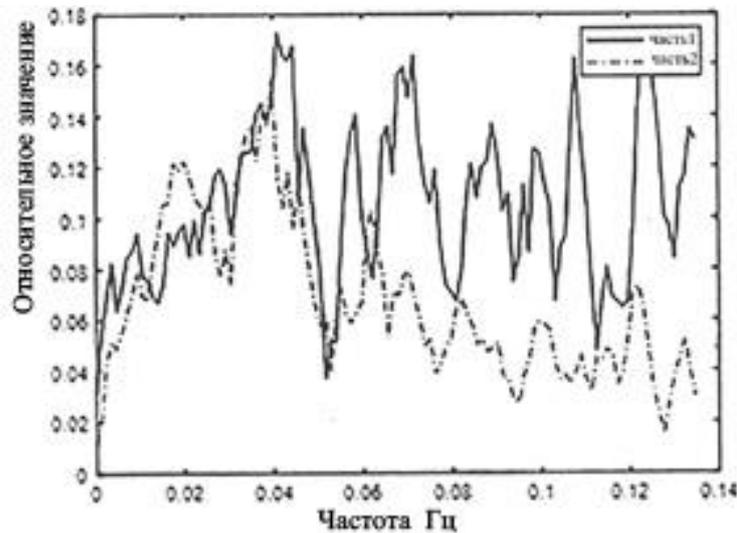


Рис.2. Спектр флюктуации фазы при прохождении ЭМ-излучения с частотой 417 МГц через ионосферу на временном интервалах 0-5 сек. и 6-10 сек.

Анализ экспериментальных результатов, полученных в работе [4], показал, что на интервале времени 10 сек. (данный временной интервал соизмерим со временем необходимым для получения синтезированного РСА изображения), 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 низкочастотные участки 0-0,05 Гц практически совпадают, что соответствует крупномасштабным неоднородностям ионосферы. Виды высокочастотных 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 З и УКВ диапазонов маловероятно. Необходимо каким-то способом совмещать результаты радиолокационной съемки с параметрами ионосферы.

В настоящее время в РСА самолетного и космического исполнения применяются ЛЧМ сигналы, точнее сигналы со ступенчатой частотной модуляцией (СИЧ), Виды СИЧ сигналов могут быть многообразными [5]. В частности, они могут быть с нелинейной частотной модуляцией (предполагается, что они для использования в радиолокации будут более перспективными). На рис.3 представлена 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 $f_0 (КГц) = \sqrt{80,6 \cdot N(x, y)(см^{-3})}$ - критическая частота, определяемая электронной концентрацией ионосферы. Величина $f_0 \leq 10 МГц$ и значительно меньше частоты

используемого радио излучения. Поэтому значение групповой скорости можно представить в виде

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

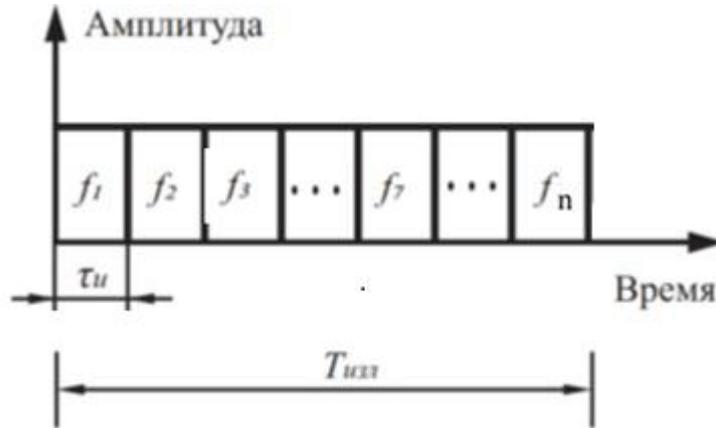


Рис.3. Частотная структура СИЧ сигнала

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

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

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

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

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. Характер искажений прямоугольного импульса изображен на рис. 4.

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.

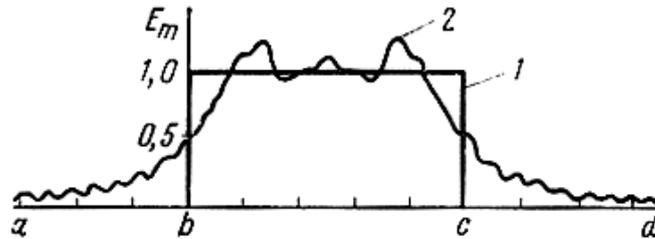


Рис. 4. Искажение прямоугольного импульса при прохождении радиоволн через слой ионосферы: 1 - первоначальная форма импульса; 2 - форма импульса после прохождения через ионосферу

2) Каждый подымпульт (см. выражение 4) распространяется со своей групповой скоростью. При использовании ступенчатого ЛЧМ сигнала, в котором предполагается начало излучения с более низкочастотных подымпультсов, 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

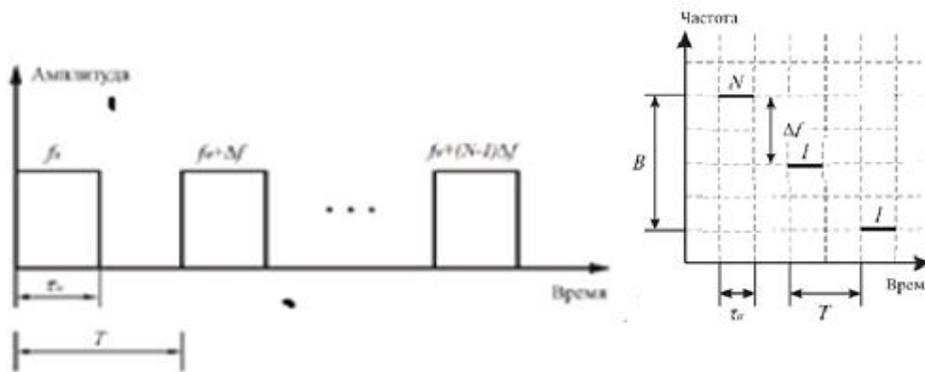


Рис.5. Структура предлагаемого СИЧ радиолокационного сигнала для исключения непредсказуемых эффектов

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 подымпультсов 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 флюктуаций 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 u – направление движения самолета. Время распространения основная часть энергии каждого подымпульса с частотой f_i от носителя до элемента поверхности и обратно будет

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

Здесь величина $V = \int_s^0 N(s) \cdot ds$ является величиной интегральной электронной концентрации ионосферы в указанном направлении. Для любого направления зондирования можно задать значения V_i и по строится структуру принимаемого СИЧ. Полученная структура используется для свертки эхо-сигнала по дальности. 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. некоторую проверку путем изменения способов получения синтезированных радиолокационных изображений. Разрешающая способность РСА по дальности

$\Delta s = \frac{cT}{2}$ определяется длительностью импульса. Однако реально разрешающая способность по поверхности $\Delta s = \frac{cT}{2\sin\theta}$, где θ -угол визирования элемента разрешения (в случае с ионосферой изменение длительности импульса определяется интегральной электронной концентрацией). В пределах зоны обзора угол визирования θ 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.

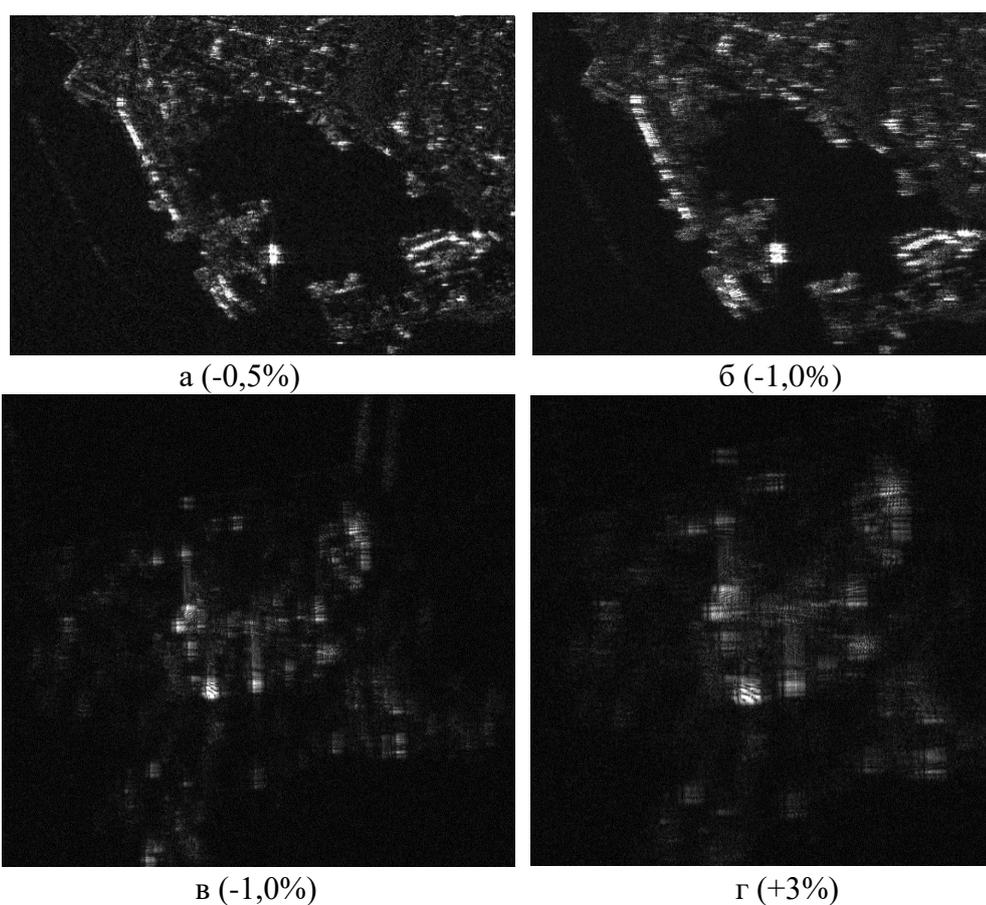


Рис.6. Влияние рассогласования оптимальной обработки (по длительности импульса) на качество радиолокационного изображения

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 Р и УКВ диапазонах. Рассмотрение выполнено для случая, когда используется ступенчатый линейный частотно модулированный зондирующий сигнал (СИЧ). Получение радиолокационных изображений предполагает по первичным результатам съемки предварительно построить карту интегральной электронной концентрации над выбранным участком поверхности. Рассматривается структура СИЧ сигнала. Предлагается внести дополнительный этап обработки. Метод основывается на

том, чтобы перед получением радиолокационного изображения предварительно выполнить обработки первичных результатов измерения с целью получения карт интегральной электронной концентрации над участком радиолокационной съемки.

Литература

1. Кретов Н.В., Рыжкова Т.Е., Федорова Л.В. // Радиотехника и электроника. 1992. №1. стр. 90-95
2. Штейншлейнер В.Б., Дзенкевич А.В. и др. // 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 // Радиоэлектроника. ISSN 1684-1719, №6, 2021 2021. №6, 2021