

Труды МАИ. 2022. № 126
Trudy MAI, 2022, no. 126

Научная статья
УДК 621.396.96
[DOI: 10.34759/trd-2022-126-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-15)

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Александр Сергеевич Хазов¹, Михаил Юрьевич Ортиков²,

Сергей Николаевич Гусев³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru

Аннотация. Пространственные и временные изменения параметров среды распространения электромагнитных волн оказывают существенное влияние на качественные характеристики радиолокационных изображений, получаемых с помощью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны: приводят к ухудшению разрешающей способности и контраста радиолокационного изображения, а в ряде случаев к его полному разрушению.

В статье представлены результаты моделирования влияния атмосферных искажений на значение разрешающей способности в P - и X -диапазонах частот в процессе цифровой обработки радиолокационной информации, и рассмотрены

значения флуктуаций атмосферных искажений, при которых синтез радиолокационного изображения затруднителен. Предложена методика оценивания разрешающей способности космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны, позволяющая определить поправку к наклонной дальности с учетом совместного влияния искажений тропосферы и ионосферы на этапе формирования опорной функции по азимуту. Учет рефракции электромагнитных волн и коррекция наклонной дальности реализованы с использованием показателя преломления среды и метода приближения геометрической оптики.

Рассмотренная в работе методика позволяет компенсировать влияние атмосферных искажений и повысить качество получаемого радиолокационного изображения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, атмосферные искажения, радиолокационное изображение

Для цитирования: Хазов А.С., Ортиков М.Ю., Гусев С.Н. Методика оценивания разрешающей способности космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны с учетом компенсации атмосферных искажений // Труды МАИ. 2022. № 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-15)

Original article

A METHOD FOR ESTIMATING THE RESOLUTION OF A SPACE RADAR WITH A SYNTHESIZED ANTENNA APERTURE, TAKING INTO ACCOUNT THE COMPENSATION OF ATMOSPHERIC DISTORTIONS

Alexander S. Khazov¹, Mikhail Yu. Ortikov²✉, Sergey N. Gusev³

^{1,2,3}Military Space academy A.F.Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

²vka@mil.ru✉

Abstract. The article proposes the methodical approach allowing to solve a problem of improvement of quality of the radar images received by space synthetic aperture radar radars from the antenna synthesized by an aperture due to accounting of atmospheric distortions.

The purpose of work is improvement of approaches to formation of radar images.

Object of research are methods of estimation of resolution of the s space synthetic aperture radar which is used as the key information indicator and characterizes detail and quality of radar images.

The result of the work is a the technique of estimation of resolution of the space synthetic aperture radar taking into account compensation of atmospheric distortions.

The proposed technique is based on the use of compensation of atmospheric distortions from positions of geometrical optics. The offered technique of estimation of resolution of the space synthetic aperture radar allows to determine the amendment to inclined range taking into account the joint impact of distortions of the troposphere and an ionosphere at a stage of formation of basic function by an azimuth in synthesis algorithms of radar images.

Accounting of a refraction of electromagnetic waves and correction of inclined range are realized with use of index of refraction of the environment and a method of approach of geometrical optics at distribution of radio waves in the non-uniform environment. For use of this approach it is necessary to define a condition of the atmosphere with use of models of the troposphere and an ionosphere in a zone of the review of the synthetic aperture radar taking into account real geophysical conditions.

Results of imitating modeling confirm a possibility of use of the proposed technique for estimation and accounting of the errors brought by the atmosphere of Earth in measurements of radar parameters by means of methods of calculation of trajectories of radio waves at the set index of refraction of the environment.

The developed technique allows to carry out compensation of impact of atmospheric distortions and to increase quality of the received radar image.

The proposed methodical approach can be used for performing synthesis of radar images, for elimination of errors of measurement of coordinates of objects and for improvement of values of resolution and contrast of radar images.

Keywords: remote sensing of the Earth, radar with synthesized antenna aperture, atmospheric distortion, radar image

For citation: Khazov A.S., Ortikov M.Yu., Gusev S.N. A method for estimating the resolution of a space radar with a synthesized antenna aperture, taking into account the compensation of atmospheric distortions. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-15)

Введение

Структура существующей космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), технические характеристики современных радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) позволяют круглосуточно решать задачи мониторинга земной и водной поверхности, обеспечивая эффективное обнаружение и распознавание объектов, а также определение их координат на подстилающей поверхности. Новые режимы радиолокационной съемки и алгоритмы обработки траекторного сигнала при синтезе радиолокационного изображения (РЛИ) позволяют приблизить характеристики получаемых изображений к оптическим снимкам с пространственным разрешением менее одного метра.

Особенно востребованы РЛИ полученные в C -, X -диапазонах частот, пространственное разрешение в которых может достигать менее 0,5 м. Также следует отметить увеличение числа исследовательских работ по повышению пространственного разрешения в P -диапазоне частот [9].

В связи с постоянно растущими требованиями к увеличению пространственного разрешения РЛИ, точности определения географических координат отдельных объектов усложняются и процессы получения и обработки радиолокационных данных. При реализации алгоритмов съемки и обработки информации возникает необходимость учета значительного количества дестабилизирующих факторов: нестабильности траектории движения космического

аппарата (КА), носителя РСА; погрешности, вносимые аппаратурой; искажения сигналов, вносимые средой распространения и другие. Степень и полнота учета таких факторов существенно влияют на качество получаемых РЛИ.

Проблематике повышения качества РЛИ посвящено значительное количество работ [1–4, 6, 8, 15–20]: рассмотрены подходы к решению задачи повышения качества РЛИ путем предварительной фокусировки, методами и алгоритмами автофокусировки, различными подходами к компенсации атмосферных искажений и нестабильностей измеряемых радиолокационных параметров.

Одним из дестабилизирующих факторов, существенно влияющих на качество траекторных сигналов РСА космического базирования, является динамическое состояние атмосферы. Характеристики атмосферных погрешностей измерений обусловлены прохождением электромагнитных волн через тропосферу и ионосферу. Пространственные и временные изменения параметров среды приводят к искажению траекторного сигнала РСА на интервале синтезирования, что, в свою очередь, приводит к ошибкам измерения координат объектов, ухудшению разрешающей способности (наиболее чувствительно в сечении азимута) и контраста РЛИ, а в ряде случаев к полному разрушению РЛИ [1, 3, 8].

Относительно простыми алгоритмами решения задачи компенсации атмосферных погрешностей измеряемых радиолокационных параметров обладают подходы на основе методов коррекции параметров принимаемого сигнала на величину рассчитанного значения поправки. Такую коррекцию целесообразно осуществлять через показатель (коэффициент) преломления среды, являющийся

функцией таких параметров, как температура, давление, влажность, концентрация электронов. При распространении волн в неоднородной среде, где показатель преломления меняется непрерывно, и относительное изменение показателя преломления на отрезке, равном длине волны в среде, пренебрежимо мало, допустимо рассмотрение рефракции с позиций геометрической оптики [5]. Для использования данного подхода необходимо определить состояние атмосферы с использованием моделей тропосферы и ионосферы в зоне обзора РСА.

Данный подход обладает простотой и универсальностью, но недостаточно проработан для решения задач по повышению качества РЛИ при динамически изменяющейся атмосфере.

Анализ влияния атмосферных искажений на качество радиолокационных изображений

Одним из важнейших информационных показателей РСА является разрешающая способность, которая определяет детальность и качество РЛИ. Проведем анализ влияния атмосферных искажений на значение разрешающей способности в P - и X - диапазонах частот, с учетом различного влияния тропосферы и ионосферы на характеристики сигналов в диапазонах длин волн, используемых в современной радиолокации.

Моделирование случайных изменений фазы, приводящих к искажениям при синтезе РЛИ достаточно сложный процесс, однако реализуем путем задания характера искажающей функции. При оценивании влияния атмосферных искажений на качество синтеза РЛИ космического РСА было принято, что фаза

траекторного сигнала на интервале синтезирования изменяется по квадратичному закону [1].

В атмосфере одновременно существуют неоднородности (флуктуации) показателя преломления самых разных параметров – от миллиметров до тысяч километров, и с временными периодами колебаний от сотых долей секунды до годовых [10, 11], поэтому для оценивания влияния атмосферных искажений на качество синтеза РЛИ пространственное распределение значения показателя преломления среды возможно разделить на регулярную и случайную составляющие (в пространстве и во времени). Такое разделение позволяет исследовать влияние флуктуаций показателя преломления различного масштаба.

Для исследования искажений траекторного сигнала моделировалось формирование РЛИ уголкового отражателя, при этом характер изменения фазы сигнала задавался на основе данных по амплитудам флуктуаций (A_V) и их пространственным масштабам (L_V) показателя преломления, приведенных в работах [11, 12].

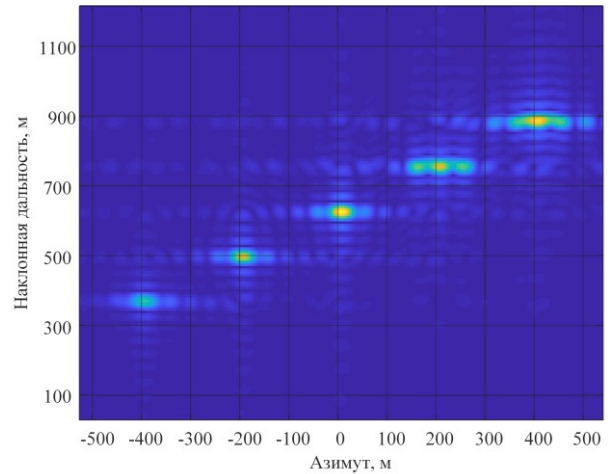
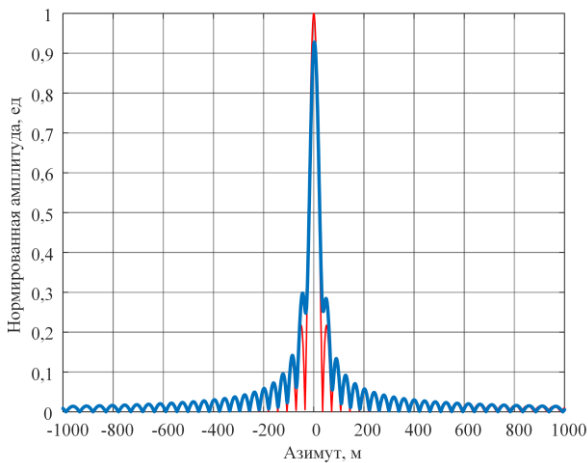
Рассмотрим влияние ионосферных искажений на качество синтеза РЛИ в P -диапазоне частот. На рисунке 1 представлен срез отметки точечного отражателя по азимуту при отсутствии атмосферных искажений на трассе распространения траекторного сигнала цели и при наличии искажений различной степени интенсивности.

Параметры моделирования:

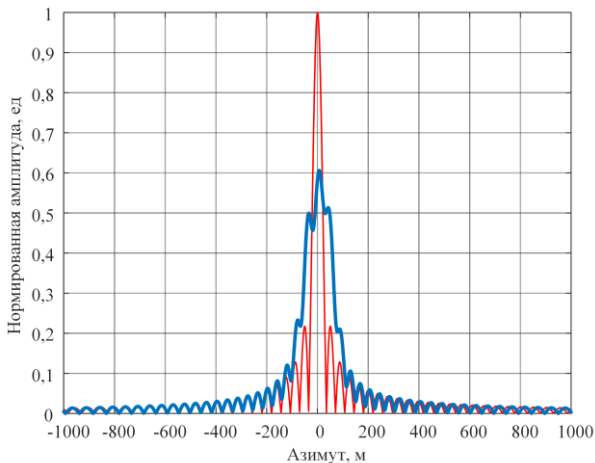
- высота орбиты носителя РСА $h_{РСА} = 420$ км;
- длина волны $\lambda = 0,68965$ м;

- угол визирования $\beta = 40^\circ$;
- ширина спектра зондирующего сигнала $\Delta F = 5$ МГц;
- длительность импульса $\tau_{\text{имп}} = 10$ мкс;
- амплитуда флуктуаций $A_V = 0,06-0,45$;
- масштаб флуктуаций $L_V = 3,0-0,5$ км.

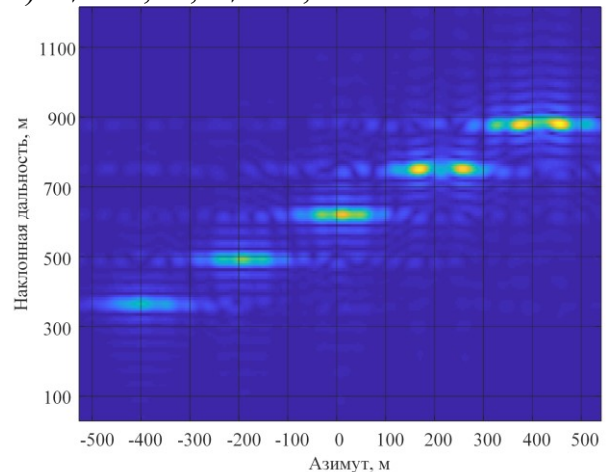
При увеличении степени искажения траекторного сигнала (амплитуда флуктуаций $A_V > 0,45$) синтез РЛИ для заданных исходных данных усложняется.



а) $\delta x_{\text{иск}} = 36,4$ м, $\delta x_{\text{тр}} = 35$ м

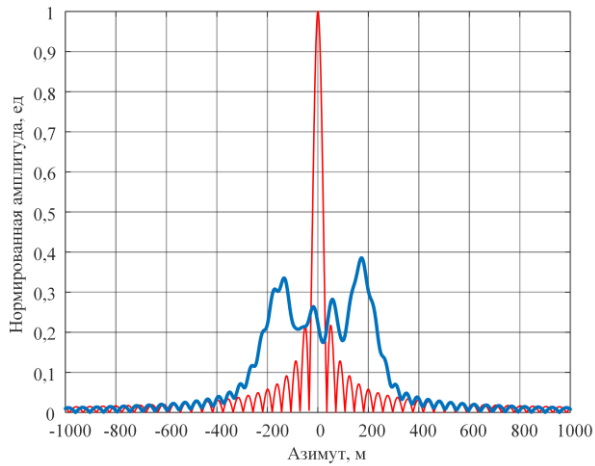


б) $A_V = 0,06$, $L_V = 3,0$ км

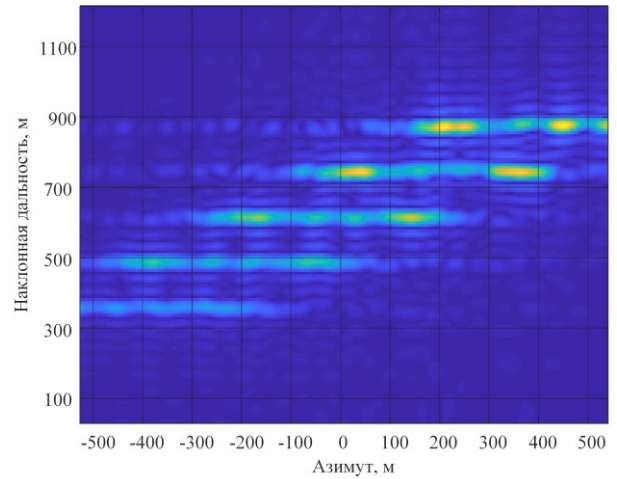


в) $\delta x_{\text{иск}} = 103,1$ м, $\delta x_{\text{тр}} = 35$ м

г) $A_V = 0,15$, $L_V = 5,0$ км



д) $\delta x_{\text{иск}} > 350$ м, $\delta x_{\text{тр}} = 35$ м



е) $A_V = 0,45$, $L_V = 0,5$ км

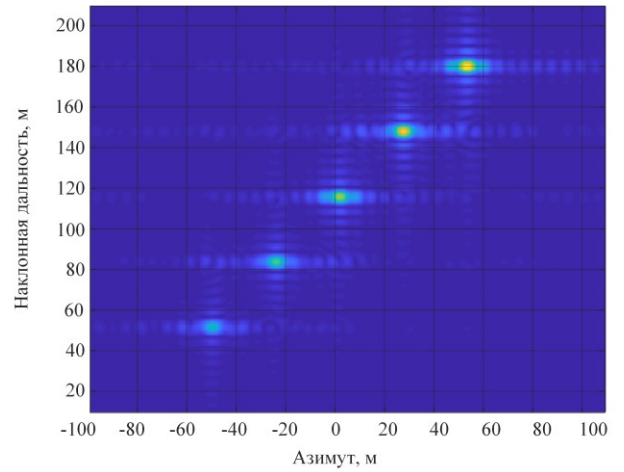
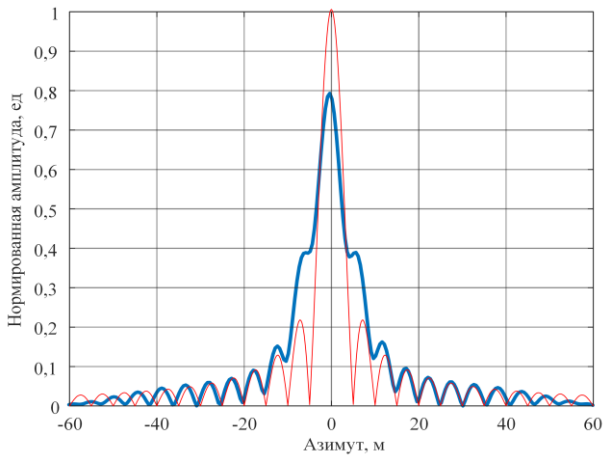
Рисунок 1. Срез РЛИ точечной цели по азимуту (а, в, д) и РЛИ радиолокационной миры при различной степени искажения траекторного сигнала (б, г, е)

Рассмотрим влияние тропосферных искажений на качество синтеза РЛИ в X -диапазоне частот (рисунок 2).

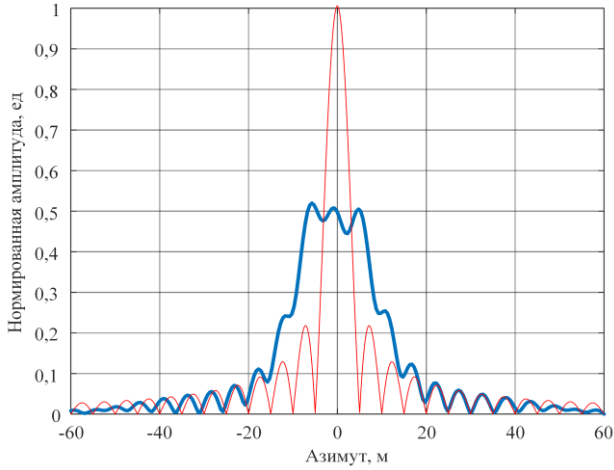
Параметры моделирования:

- высота орбиты носителя РСА $h_{РСА} = 600$ км;
- длина волны $\lambda = 0,03125$ м;
- угол визирования $\beta = 40^\circ$;
- ширина спектра зондирующего сигнала $\Delta F = 30$ МГц;
- длительность импульса $\tau_{\text{имп}} = 10$ мкс;
- амплитуда флуктуаций $A_V = 0,07-0,32$;
- масштаб флуктуаций $L_V = 50,0-10,0$ м.

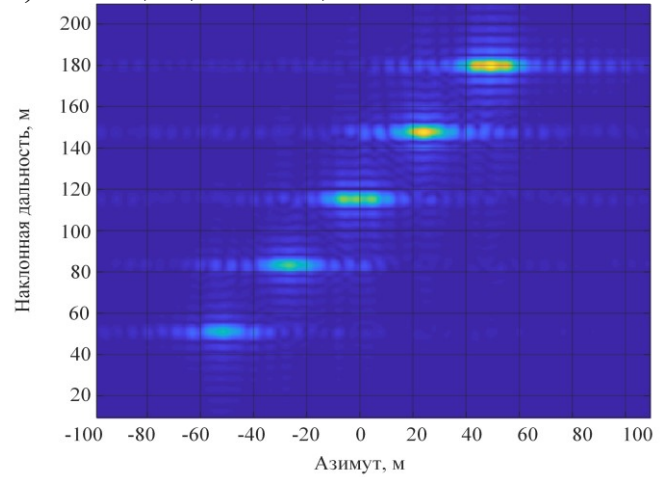
При увеличении степени искажения траекторного сигнала (амплитуда флуктуаций $A_V > 0,32$) синтез РЛИ для заданных исходных данных существенно затруднен.



а) $\delta x_{иск} = 5,3$ м, $\delta x_{тр} = 5$ м

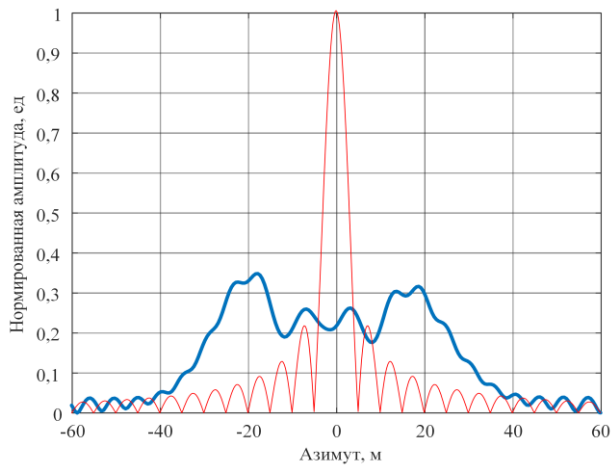


б) $A_V = 0,07$, $L_V = 50,0$ м

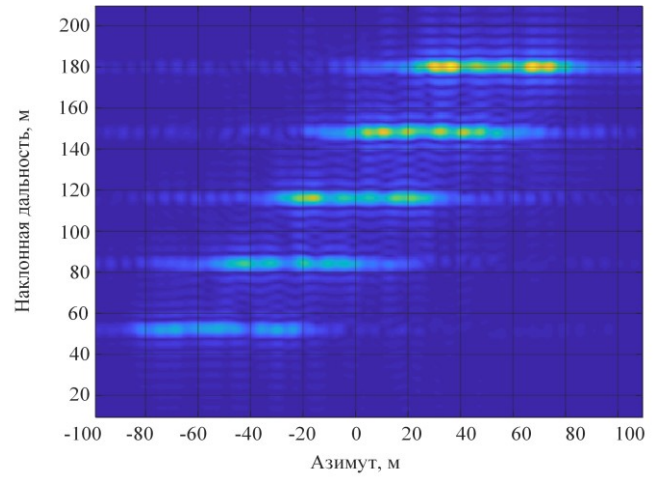


в) $\delta x_{иск} = 15,9$ м, $\delta x_{тр} = 5$ м

г) $A_V = 0,16$, $L_V = 30,0$ м



д) $\delta x_{иск} = 48,7$ м, $\delta x_{тр} = 5$ м



е) $A_V = 0,32$, $L_V = 10,0$ м

Рисунок 2. Срез РЛИ точечной цели по азимуту (а, в, д) и РЛИ радиолокационной миры при различной степени искажения траекторного сигнала (б, г, е)

Из анализа полученных результатов видно, что атмосферные искажения приводят к существенному ухудшению разрешающей способности по азимуту, что вызвано рассогласованием используемой в системе цифровой обработки траекторного сигнала опорной функции по азимуту с реальным законом изменения дальности до цели на интервале синтезирования, который в силу наличия атмосферных искажений отличается от закона, используемого при формировании опорной функции по азимуту.

Постановка задачи

Для оценивания значения разрешающей способности в условиях влияния атмосферных искажений требуется следующий перечень исходных данных:

1) для расчета вектора положения КА (носителя РСА):

– $\langle \vec{X}, \vec{V}, t_0 \rangle$ – вектор координат ($\vec{X} = \{x, y, z\}$) и скорости ($\vec{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$)

КА на момент времени t_0 ;

– t_1, t_2 – время начало и окончания расчетов;

2) для расчета положения объекта зондирования:

– $X_0 = \{\lambda, \varphi, h\}$ – координаты положения (широта, град.; долгота, град.;

высота, м);

3) для расчета показателя преломления:

– I – данные о полном электронном содержании по данным спутниковых радионавигационных систем;

- W – индекс солнечной активности;
- $N(z)$ – данные восстановления вертикального профиля по космическим

данным;

- $N'(z)$ – данные восстановления вертикального профиля по данным

радиозондирования;

- f – рабочая частота зондирующего сигнала РСА, Гц;

- t – время излучения сигнала, с.

4) для оценивания пространственного разрешения (качества РЛИ):

- t_c – время синтезирования, с.

Найти:

1) δr – пространственное разрешение по дальности, м.

2) δx – пространственное разрешение по азимуту, м.

Методика оценивания разрешающей способности радиолокатора с синтезированной апертурой антенны с учетом компенсации атмосферных искажений

Повышение качества радиолокационных изображений рассмотрим на основе подхода к компенсации атмосферных искажений, позволяющего сформировать поправку к наклонной дальности с учетом совместного влияния искажений тропосферы и ионосферы на этапе формирования опорной функции [6].

На первом этапе, на основании численного интегрирования уравнений движения КА определяются на каждый момент времени:

- координаты положения КА $X_{КА} = \{\lambda, \varphi, h\}$ (широта, град.; долгота, град.; высота, км);
- V_o – орбитальная скорость, м/с;
- V – путевая скорость, м/с.

На втором этапе, с помощью моделей [11, 21], определяется вертикальное распределение показателя преломления с учетом тропосферы и ионосферы, которое задается выражением:

$$n = n_0(z) [1 + A_V n_V], \quad (1)$$

где n – показатель преломления неоднородной среды; $n_0(z)$ – показатель преломления невозмущенной среды; n_V – показатель преломления возмущенной среды в виде локальных квазипериодических структур; z – высота вертикального профиля, км;

$$n_V = \sin \left[2\pi \frac{x}{L_V} \right] \exp \left[- \left(\frac{x}{L_V} \right)^2 - \left(\frac{z - z_c}{L_z} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где L_z – масштаб флуктуаций по вертикали, км; z_c – вертикальная координата центра возмущения, км; x – горизонтальная координата от центра возмущения, км;

$$n_0(z) = 1 + \left(k_1 \frac{P}{T} + k_2 \frac{P_W}{T} + k_3 \frac{P_W}{T^2} \right) 10^{-6} e^{(-bz)} - \frac{40,3}{f^2} N_e(z), \quad (3)$$

где k_1-k_2 – эмпирические коэффициенты, отвечающие за учёт ультрафиолетового электронного перехода соответственно для сухого и влажного воздуха;

k_3 – эмпирический коэффициент, возникающий из-за постоянных дипольных инфракрасных вращательных переходов паров воды;

P – атмосферное давление, гПа;

T – температура воздуха, К;

P_w – парциальное давление водяного пара, гПа;

b – параметр, характеризующий скорость убывания индекса рефракции по высоте (0,128–0,165), м⁻¹;

$N_e(z)$ – концентрация электронов, Эл/м³.

Для описания пространственно-временного распределения электронов N_e в работе использовалась глобальная эмпирическая модель ионосферы *IRI-Plas* [13] с возможностью корректировки по текущим индексам солнечной и магнитной активности. Для описания вертикального распределения параметров тропосферы использовалась модель Саастамойнена [14] и параметр, характеризующий скорость убывания индекса рефракции по высоте $b = 0,14$, что соответствует условиям стандартной атмосферы.

Для расчета траектории радиоволн используется система дифференциальных уравнений, описывающих положения волнового фронта, модели ионосферы и вертикального профиля индекса преломления тропосферы, которая имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \left(\frac{c}{\omega^2 n} - \frac{\partial n}{\partial k} \right) / \left(\frac{n}{\omega} - \frac{\partial n}{\partial \omega} \right), \\ \frac{\partial \vec{k}}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial \vec{r}} / \left(\frac{n}{\omega} - \frac{\partial n}{\partial \omega} \right). \end{cases} \quad (4)$$

где \vec{r} – пространственные координаты ($\langle \lambda, \varphi, h \rangle$); c – скорость света; \vec{k} – волновой вектор ($\langle k_\lambda, k_\varphi, k_h \rangle$); ω – угловая частота; n – показатель преломления.

На третьем этапе, с учетом выражений (1–4) и на основании данных X_O и X_{KA} , осуществляется определение R'_n – наклонной дальности (значение, скорректированное с учетом компенсации искажений):

$$R'_n = \int_{X_{KA}}^{X_O} n dr.$$

На четвертом этапе, в соответствии выражениями (5) и (6), осуществляется определение пространственного разрешения по дальности и азимуту:

$$\delta r = \frac{c}{2\Delta F \sin(90 - \beta)}, \quad (5)$$

$$\delta x = \frac{\lambda R'_n}{2V_0 t_c}. \quad (6)$$

На основе разработанной методики проведем оценивание значений пространственного разрешения для P - и X -диапазонов частот при различных вариантах искажений траекторного сигнала.

Оценивание значений пространственного разрешения радиолокатора с синтезированной апертурой антенны для P - и X - диапазонов частот

Оценивание значений поправок к наклонной дальности (погрешностей, вносимых атмосферой) для P - и X - диапазонов частот производится в соответствии с выражением:

$$\Delta R = \int_{X_{KA}}^{X_O} n dr - \int_{X_{KA}}^{X_O} dr.$$

В качестве исходных данных в ходе моделирования было принято:

- вектор положения КА X_{KA} (координаты: широта $\lambda = 55,0$, долгота $\varphi = 37,5$, высота $h = 420$ км);
- вектор положения объекта зондирования X_O (координаты вычисляются для значений угла локации в диапазоне 30–80 градусов, $h = 0$ км);
- стандартные значения температуры и давления на уровне земной поверхности ($P = 1013,25$ гПА, $T = 288,15$ К);
- индекс солнечной активности (число Вольфа $W = 250$).

Для углов локации в диапазоне от 30 до 80 градусов величина поправки по наклонной дальности составила: в P - диапазоне частот $\Delta R = 260,51 \div 808,82$ м; в X - диапазоне частот $\Delta R = 1,82 \div 7,31$ м (рисунок 3).

Указанные поправки к наклонной дальности, рассчитанные аналитическим путем, не всегда точно отображают реальное состояние атмосферы и являются

оценочными значениями, определенными с некоторой относительной погрешностью

$$\delta R = |\Delta R_P - \Delta R_I| / \Delta R_I$$

где ΔR_I – истинное значение поправки, м;

ΔR_P – расчетное значение поправки, м.

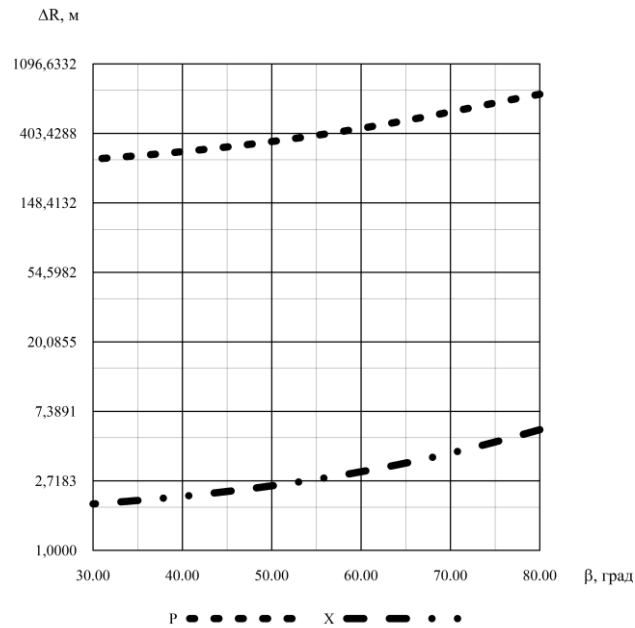


Рисунок 3. Зависимость ошибки измерения дальности от угла локации для P - и X - диапазонов частот

На рисунке 4 представлены результаты расчетов пространственного разрешения по азимуту для трех вариантов искажения траекторного сигнала P – диапазона, при $z_c = 300,0$ км и $L_z = 10,0$ км:

- вариант 1 – $A_V = 0,06$, $L_V = 3,0$ км;
- вариант 2 – $A_V = 0,15$, $L_V = 5,0$ км;

- вариант 3 – $A_V = 0,45$, $L_V = 0,5$ км.

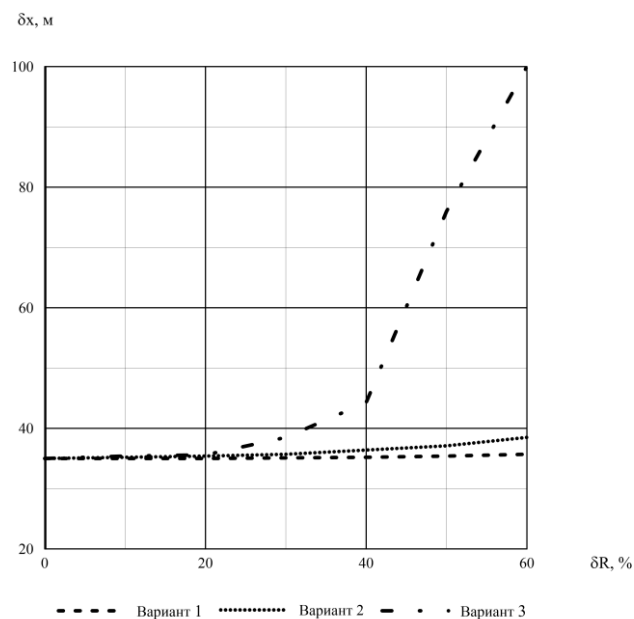


Рисунок 4. Зависимость разрешающей способности по азимуту от относительной погрешности определения поправки к дальности для Р - диапазона частот

На рисунке 5 представлены результаты расчетов пространственного разрешения по азимуту для трех вариантов искажения траекторного сигнала X-диапазона, при $z_c = 2,5$ км и $L_z = 1,0$ км:

- вариант 1 – $A_V = 0,07$, $L_V = 50,0$ м;
- вариант 2 – $A_V = 0,16$, $L_V = 30,0$ м;
- вариант 3 – $A_V = 0,32$, $L_V = 10,0$ м;

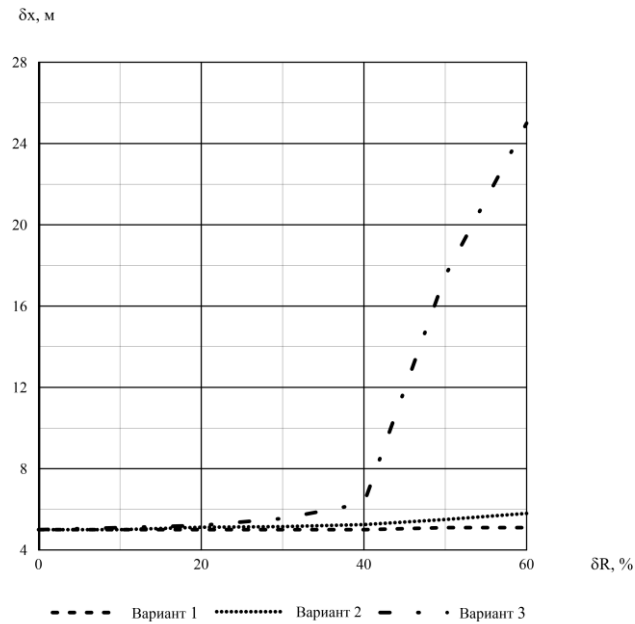


Рисунок 5. Зависимость разрешающей способности по азимуту от относительной погрешности определения поправки к дальности для X - диапазона частот

По результатам моделирования можно сделать вывод, что улучшение качества РЛИ, определяемого значением разрешающей способности по азимуту наблюдается при различных интенсивностях искажений радиосигнала. При этом существенное улучшение качества РЛИ обеспечивается при $\delta R \leq 0,4$ для P - диапазона частот и для X - диапазона частот.

Заключение

Из анализа полученных результатов видно, что фазовые флуктуации траекторного сигнала, вызванные атмосферными неоднородностями, существенно влияют на качество формируемых РЛИ, в частности, ухудшают разрешающую

способность по азимуту, а при достижении некоторого значения интенсивности флуктуаций синтез РЛИ становится затруднителен.

Рассмотренная в работе методика, учитывающая рассогласование используемой в системе цифровой обработки траекторного сигнала опорной функции по азимуту с реальным законом изменения дальности до цели, позволяет компенсировать влияние атмосферных искажений и повысить качество РЛИ.

Список источников

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. - 368 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б, Осипов В.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. - 675 с.
3. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Техносфера, 2019. - 482 с.
4. Фомин А.Н., Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. - 292 с.
5. Иванов В.Ф., Мысливцев Т.О., Ткачев Е.А., Троицкий Б.В. Ионосферное обеспечение средств локации, навигации и связи. – СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, 2011. - 235 с.

6. Хазов А.С., Ортиков М.Ю. Методический подход к компенсации атмосферных искажений при формировании изображений, получаемых с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны космического базирования // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18. № 4. С. 465-473.
7. Коростылев В.И. Алексеев М.Ю. Влияние неоднородности тропосферы на пространственно-временную обработку сигналов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2010. № 2. С. 252-260.
8. Горячкин О.В. Компенсация искажений радиоимпульса в трансионосферных РСА УКВ диапазона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. Т. 9. № 6. С. 38-45.
9. Горячкин О.В., Женгуров Б.Г., Маслов И.В. Моностатический радиолокационный комплекс *P*-диапазона для перспективного малого космического аппарата // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2016. Т. 15. № 1. С. 38-45.
10. Thompson M.C., Janes H.B., Kirkpatrick A.W. An analysis of time variation in tropospheric refractive index and apparent radio path length // Journal of Geophysical Research, 1960, vol. 65, no. 1, pp. 193-201.
11. Троицкий Б.В. Отклик сигнала радиозондирования на ионосферные неоднородности. - Алма-Ата: Наука, 1983. - 163 с.

12. Киселёв О.Н. Мезомасштабные неоднородности коэффициента преломления в тропосфере и их влияние на распространение радиоволн УКВ-диапазона. - Томск: ТУСУР, 2007. - 199 с.
13. Gulyaeva T.L., Huang X, Reinich B. Wetica. The ionosphere-plasmasphere model software for ISO // Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 143-152. DOI:[10.1556/AGeod.37.2002.2-3.3](https://doi.org/10.1556/AGeod.37.2002.2-3.3)
14. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellite // in Proceedings Int. Sympos. on the Use of Artificial Satellite. Washington, DC, 1972, pp. 247-251. URL: <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>
15. Калинин А.А., Кутуза Б.Г., Манаков В.Ю., Масюк В.М., Плющев В.А. О компенсации влияния ионосферы Земли на качество синтезированных радиолокационных изображений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. № 674. С. 39-43.
16. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Малютина О.А. Моделирование траекторного сигнала в радаре с синтезированием апертуры на основе оптических изображений земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-12)
17. Занин К.А. Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85931>.

18. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Радиотехника и электроника. 1992. № 1. С. 90-95.
19. Гусев С.Н., Ортиков М.Ю., Хазов А.С. Методика формирования радиолокационных изображений, получаемых с учетом компенсации влияния атмосферных искажений // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. Радиолокационное исследование природных сред. 2021. № 680. С. 224-230.
20. Горячкин О.В. Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С.177-183.
21. Кирьянова К.С., Крюковский А.С. Математические модели возмущений ионосферы природного и техногенного характера // Вестник Российского нового университета. Серия «Математическое моделирование физических, химических и биологических процессов. 2012. № 3. С.27-33.

References

1. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio vision. Radar systems of remote sensing of the Earth), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 368 p.

2. Verba V.S., Neronskii L.B, Osipov B.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Radar systems of space-based earth survey), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 675 p.
3. Gruzdov V.V., Kolkovskii Yu.V., Krishtopov A.V., Kudrya A.I. *Novye tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (New technologies of remote sensing of the Earth from space), Moscow, Tekhnosfera, 2019, 482 p.
4. Fomin A.N., Tyapkin V.N., Dmitriev D.D. *Teoreticheskie i fizicheskie osnovy radiolokatsii i spetsial'nogo monitoring* (Theoretical and physical foundations of radar and special monitoring), Krasnoyarsk, Sibirskii federal'nyi universitet, 2016, 292 p.
5. Ivanov V.F., Myslivtsev T.O., Tkachev E.A., Troitskii B.V. *Ionosfernoe obespechenie sredstv lokatsii, navigatsii i svyazi* (Ionospheric provision of means of location, navigation and communication), Saint Petersburg, Voenno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F.Mozhaiskogo, 2011, 235 p.
6. Khazov A.S., Ortikov M.Yu. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 465-473.
7. Korostylev V.I. Alekseev M.Yu. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika*, 2010, no. 2, pp. 252-260.
8. Goryachkin O.V. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2004, vol. 9, no. 6, pp. 38-45.
9. Goryachkin O.V., Zhengurov B.G., Maslov I.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 38-45.

10. Thompson M.C., Janes H.B., Kirkpatrick A.W. An analysis of time variation in tropospheric refractive index and apparent radio path length, *Journal of Geophysical Research*, 1960, vol. 65, no. 1, pp. 193-201.
11. Troitskii B.V. *Otklik signala radiozondirovaniya na ionosfernye neodnorodnosti* (Response of the radiosounding signal to ionospheric inhomogeneities), Alma-Ata, Nauka, 1983, 163 p.
12. Kiselev O.N. *Mezomasshtabnye neodnorodnosti koeffitsienta prelomleniya v troposfere i ikh vliyanie na rasprostranenie radiovoln UKV-diapazona* (Mesoscale inhomogeneities of the refractive index in the troposphere and their influence on the propagation of VHF radio waves), Tomsk, TUSUR, 2007, 199 p.
13. Gulyaeva T.L., Huang X, Reinich B. Wetica. The ionosphere-plasmasphere model software for ISO, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 143-152. DOI: [10.1556/AGeod.37.2002.2-3.3](https://doi.org/10.1556/AGeod.37.2002.2-3.3)
14. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellite, in *Proceedings Int., Sympos. on the Use of Artificial Satellite*, Washington, DC, 1972, pp. 247-251. URL: <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>
15. Kalinkevich A.A., Kutuza B.G., Manakov V.Yu., Masyuk V.M., Plyushchev V.A. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2020, no. 674, pp. 39-43.
16. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V., Malyutina O.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-12)

17. Zanin K.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85931>.
18. Kretov N.V., Ryzhkina T.E., Fedorova L.V. *Radiotekhnika i elektronika*, 1992, no. 1, pp. 90-95.
19. Gusev S.N., Ortikov M.Yu., Khazov A.S. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F.Mozhaiskogo*, 2021, no. 680, pp. 224-230.
20. Goryachkin O.V. *Komp'yuternaya optika*, 2002, no. 24, pp. 177-183.
21. Kir'yanova K.S., Kryukovskii A.S. *Vestnik Rossiiskogo novogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh, khimicheskikh i biologicheskikh protsessov*, 2012, no. 3, pp. 27-33.

Статья поступила в редакцию 18.07.2022

Статья после доработки 22.07.2022

Одобрена после рецензирования 04.08.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 18.07.2022; approved after reviewing on 04.08.2022; accepted for publication on 12.10.2022