

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОМПЕНСАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Хазов А.С., Ортиков М.Ю.

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

E-mail: aleksandr1979-h@mail.ru, mort1964@rambler.ru

В статье рассматривается влияние атмосферных искажений на значения параметров сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой антенны космического базирования. Значительные фазовые искажения траекторного сигнала в системах дистанционного зондирования Земли приводят к нарушению его когерентной структуры и могут привести к полному разрушению радиолокационного изображения. Одним из предпочтительных способов решения данной проблемы является совершенствование алгоритмов формирования опорной функции. Предложен новый методический подход к компенсации атмосферных искажений при формировании изображений, позволяющий повысить качество синтеза радиолокационных изображений, отличающийся совместным учетом влияния искажений тропосферы и ионосферы на этапе формирования опорной функции. Получены зависимости ошибки измерения дальности от угла локации для различных уровней солнечной активности и приведены результаты оценивания уровня атмосферных погрешностей на основе рассмотренного подхода.

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

Введение

Системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования, построенные на основе применения радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), в последнее десятилетие приобрели ведущую роль в оперативном информационном обеспечении потребителей [1–4]. Новые технологии радиолокационного обзора в настоящее время позиционируются как эффективное средство оценивания состояния морской поверхности, лесных массивов, сельскохозяйственных угодий, решения задач военного характера.

Актуальными являются вопросы реализации космических РСА ДЗЗ, работающих в диапазонах частот, на данный момент мало используемых в космической радиолокации. Особенно интересно использование P (VHF) диапазона, поскольку радиолокационные изображения (РЛИ) в этом диапазоне несет в себе информацию о распределении коэффициента отражения в толще растительности и почвы.

Получаемая радиолокационная информация в цифровом виде представляет собой комплексные радиолокационные изображения, каждый элемент которых характеризуется амплитудой и фазой, определяющими параметры отраженного сигнала от сегмента подстилающей поверхности. Важнейшей характеристикой получаемых РЛИ является пространственное разрешение, улучшение значений которого позволяет повысить эффективность решения задач по обнаружению и распознаванию объектов.

В реальных условиях работы РСА всегда имеют место искажения траекторного сигнала, обусловленные различными дестабилизирующими факторами. К ним в первую очередь следует отнести преломляющие, отражающие и поглощающие свойства атмосферы Земли, среды распространения радиоволн, формируемых РСА. Влияние атмосферных нестабильностей на характеристики сигналов в космических РСА различно на сантиметровых, дециметровых и метровых волнах. В сантиметровых диапазонах длин волн наиболее ощутимы пространственные нестабильности, вызванные турбулентностью тропосферы, а в дециметровом и особенно в метровом диапазонах – ионосферы [5; 6].

Амплитудные искажения траекторного сигнала обусловлены в основном ошибками стабилизации диаграммы направленности антенны и изменением значения эффективной поверхности рассеивания цели за время синтезирования. Они носят медленный характер, как правило, за время синтезирования невелики, и их влиянием можно пренебречь [3].

Следствием фазовых искажений траекторного сигнала в системе обработки являются [2; 3]:

- случайные изменения электродинамических свойств атмосферы на трассе распространения зондирующего сигнала;
- ошибки определения закона изменения расстояния между фазовым центром антенны РСА и центром зоны обзора на интервале синтезирования вследствие неточности навигационных данных;

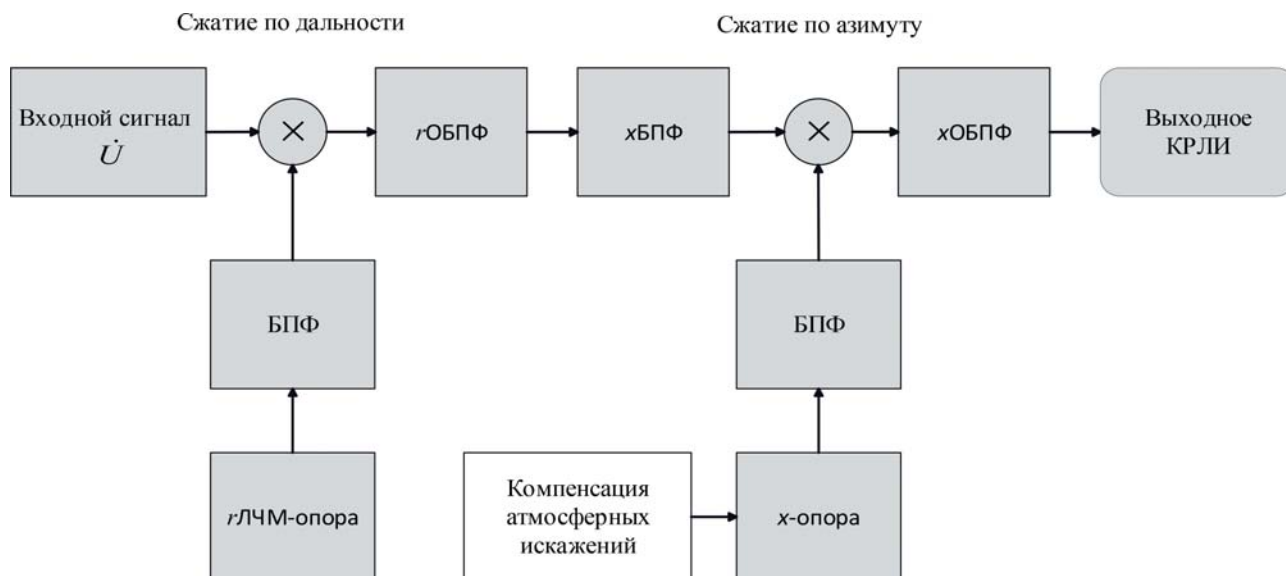


Рисунок 1. Алгоритм быстрой свертки с компенсацией атмосферных искажений

– движение объектов съемки в течение интервала синтеза;

– фазовые нестабильности приемо-передающего тракта РСА.

Влияние фазовых искажений на пространственное разрешение проявляется в виде [3]:

– смещения максимума диаграммы направленности (ДН) основного лепестка по азимутальной координате, приводящего к ошибке местоопределения объекта;

– уменьшения максимума ДН основного лепестка, приводящего к снижению отношения «сигнал/шум»;

– увеличения интегрального уровня боковых лепестков, уменьшающего динамический диапазон РЛИ.

Значительные фазовые искажения приводят к разрушению когерентной структуры траекторного сигнала и могут привести к полному разрушению РЛИ. Одним из предпочтительных способов решения данной проблемы является совершенствование алгоритмов формирования опорной функции, что будет способствовать к улучшению пространственной разрешающей способности.

Схема методического подхода к компенсации атмосферных искажений при формировании радиолокационных изображений

Обработка сигналов РСА основывается на согласовании опорной функции с сигналом от одиночной точечной цели [3; 4]. В качестве опорной функции выбирается функция, комплексно сопряженная с сигналом от одиночной точечной цели [3]:

$$h_i(t) = W(t) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[Vt \cos(\theta_i + \theta_h) - \frac{V^2 t^2}{2R_h + r_i} \sin^2(\theta_h + \theta_i) \right] \right\}, \quad (1)$$

где $W(t)$ – действительная весовая функция синтезированной апертуры; λ – длина волны, м; V – путевая скорость, м/с; t – момент времени, с; θ_h – угол наблюдения относительно азимута, град; θ_i – угол наблюдения относительно угла места, град; R_h – наклонная дальность наблюдения, м.

Одним из самых распространенных и производительных алгоритмов синтеза РЛИ является алгоритм быстрой свертки [4]. Он основан на использовании известного свойства преобразования Фурье – свертке сигналов во временной области соответствует произведение спектров в частотной области (см. рисунок 1).

Следует отметить, что учет и компенсацию атмосферных искажений целесообразно проводить на этапе свертки сигнала по азимуту. Выходной сигнал после быстрой свертки формируется в виде последовательности процедур [4]:

$$\dot{U}_{out}(t) = F^{-1} [\dot{S}_U(f) \dot{S}_h(f)], \quad (2)$$

где F^{-1} – обратное преобразование Фурье; $\dot{S}_U(f)$ – спектр входного сигнала; $\dot{S}_h(f)$ – спектр опорной функции.

Эффекты, возникающие при рассмотрении распространения радиосигнала в атмосфере, традиционно разделяют на эффекты в тропосфере и эффекты в ионосфере, которые тесно связаны с физическими свойствами, в частности с нали-

чием и отсутствием ионизирующих слоев. Обобщенным параметром, характеризующим влияние атмосферы на характеристики радиосигнала, является показатель преломления n .

В реальных условиях коэффициент преломления в тропосфере вдоль трассы распространения зондирующего сигнала РЛС определить крайне сложно. На практике для расчетов используют различные упрощенные модели вертикального профиля индекса преломления, которые основаны на условии однородности тропосферы вдоль поверхности Земли [3]. Наиболее распространенной математической моделью, используемой при описании показателя преломления в тропосфере, является экспоненциальная модель. Анализ отклонений реальных профилей от этой модели показал, что она достаточно хорошо описывает структуру средней диэлектрической проницаемости в самых различных условиях [6].

Как известно, в неоднородной магнито-активной плазме волновое уравнение не имеет строгих решений, поэтому для описания связи сигнальных характеристик с параметрами ионосферы необходимо использовать приближения (упрощения) волнового уравнения. В приближении геометрической оптики длину фазового пути сигнала представим в виде [7]:

$$L = \int_{X_1}^{X_2} n(S) ds, \quad (3)$$

где X_1 и X_2 – точки расположения фазового центра антенны и центра зоны обзора; $n(S)$ – показатель преломления; ds – элемент длины радиолуча.

Оптический путь (в приближении $n=1$) обозначим как

$$L_0 = \int_{X_1}^{X_2} ds_0, \quad (4)$$

где ds_0 – элемент прямого пути от X_1 к X_2 . Введем обозначение

$$L = L_0 + S_1 + S_2, \quad (5)$$

где

$$S_1 = \int_{X_1}^{X_2} n ds_0 - \int_{X_1}^{X_2} ds_0, \text{ а } S_2 = \int_{X_1}^{X_2} n ds - \int_{X_1}^{X_2} n ds_0.$$

Очевидно, что S_1 определяет разность фазового пути от оптической длины, обусловленную отличием фазовой скорости волны от скорости света, а S_2 – обусловленную рефракцией. С учетом упрощений и ограничений S_1 можно представить в виде

$$S_1 = \int_{T_1}^{T_2} n ds_0 - \int_{T_1}^{T_2} ds_0 \approx \quad (6)$$

$$\approx \int_{X_1}^{X_2} \frac{80,6 N_e}{2 f^2} ds_0 + \int_{X_1}^{X_2} \frac{80,6 N_e f_g'}{2 f^3} ds_0,$$

где f_p – плазменная частота; f_g – гирочастота электронов; N_e – концентрация электронов.

Основная сложность с компенсацией ионосферных искажений заключается в том, что необходимо знать характеристики ионосферы на трассе распространения радиосигнала.

Для описания пространственно-временного распределения электронов N_e используются различные модели ионосферы. При описании распространения электромагнитных волн удобны в применении эмпирические модели ионосферы IRI (International Reference Ionosphere) и NeQuick, которые позволяют определить характеристики ионосферы для заданных координат и времени при заданном индексе солнечной активности. К настоящему времени разработаны различные методы адаптации моделей ионосферы к текущим геофизическим условиям [8–13].

Одним из наиболее информативных источников корректирующей информации для адаптации моделей ионосферы являются данные измерений глобальных спутниковых радионавигационных систем и их дифференциальных дополнений. Например, в работе [8] предложен метод адаптации модели ионосферы индексом солнечной активности, рассчитанным по измерениям сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), который получил дальнейшее развитие в работах [10; 13].

Применительно к решению задачи моделирования радиолокационных измерений с использованием метода расчета лучевых траекторий распространения радиоволн необходимо определить систему дифференциальных уравнений, описывающих положение волнового фронта, модели ионосферы и вертикального профиля индекса преломления тропосферы. В общем случае траектория радиоволны в атмосфере Земли описывается дифференциальными уравнениями [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \left(\frac{C^2 \vec{k}}{\omega^2 n} - \frac{\partial n}{\partial k} \right) / \left(\frac{n}{\omega} - \frac{\partial n}{\partial \omega} \right), \\ \frac{\partial \vec{k}}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial \vec{r}} / \left(\frac{n}{\omega} - \frac{\partial n}{\partial \omega} \right), \end{cases} \quad (7)$$

где \vec{k} – волновой вектор; \vec{r} – пространственные координаты; n – показатель преломления; C – скорость света; ω – угловая частота.

В рамках выбранной системы уравнений фаза и время распространения сигнала будут определяться интегральными выражениями вдоль

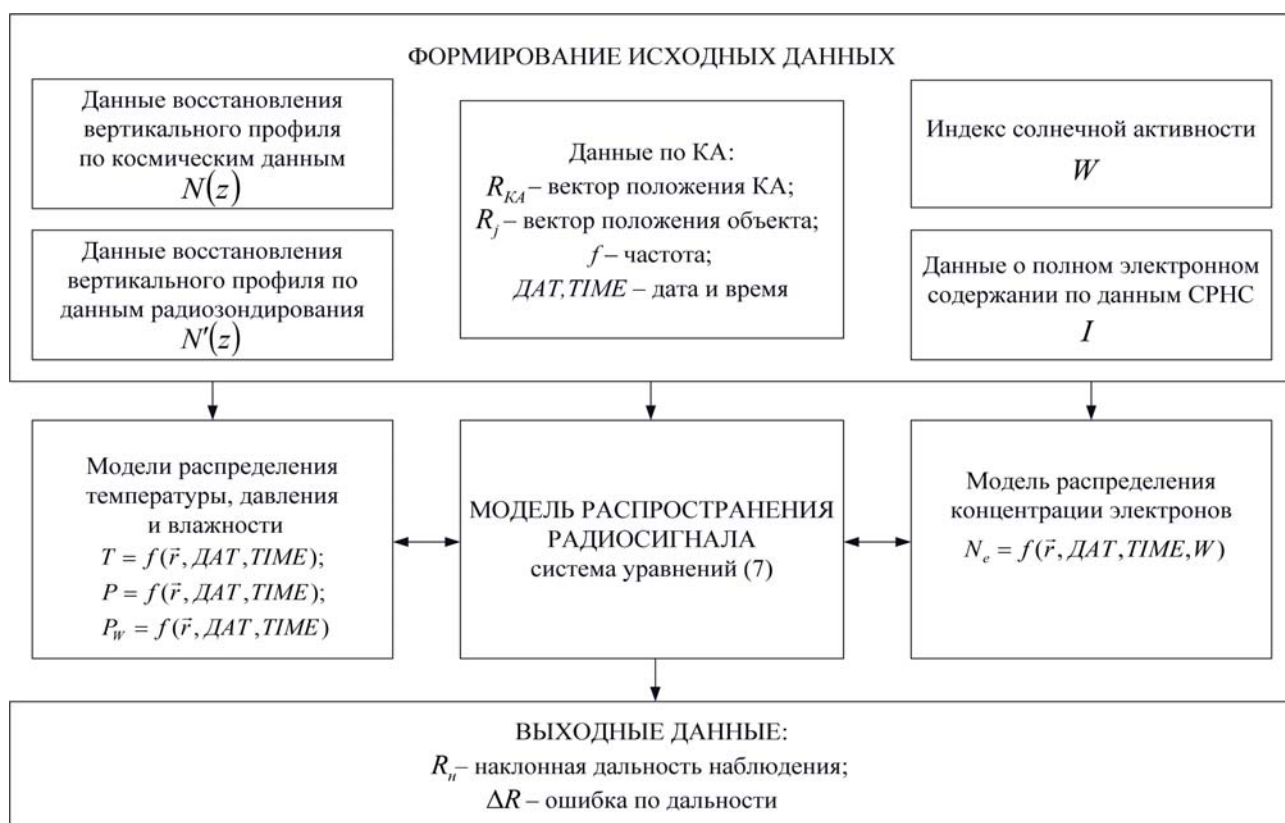


Рисунок 2. Обобщенная структурно-функциональная схема методического подхода к компенсации атмосферных искажений

траектории распространения. Вертикальное распределение показателя преломления с учетом тропосферы и ионосферы зададим выражением:

$$n(z) = 1 + \left(k_1 \frac{P}{T} + k_2 \frac{P_w}{T} + k_3 \frac{P_w}{T^2} \right) \times 10^{-6} e^{(-b \cdot z)} - \frac{40,3}{f^2} N_e(z), \quad (8)$$

где $b = 0,128 \dots 0,135 \text{ м}^{-1}$ – параметр, характеризующий скорость убывания индекса рефракции по высоте; T – температура воздуха, K° ; P – атмосферное давление, гПа; P_w – парциальное давление водяного пара, гПа; $k_1 \dots k_3$ – эмпирические коэффициенты.

Обобщенная структурно-функциональная схема методического подхода к компенсации атмосферных искажений представлена на рисунке 2.

Предложенный методический подход включает три этапа. Первый этап предусматривает формирование исходных данных: вектор положения приемника сигнала, вектор положения передатчика сигнала, частоту излучения, время, данные для расчета показателя преломления. На втором этапе с помощью моделей, позволяющих учесть влияние тропосферы и ионосферы, осуществляется формирование вертикального распределения показателя преломления. Заключительный этап позволяет рассчитать

траектории радиоволн с учетом полученного показателя преломления.

На основе интегрирования уравнения (6) с учетом выражения (8) представляется возможным определить групповую задержку сигнала, которая будет определять вносимую средой распространения ошибку по дальности $\Delta R = S_1$, вследствие отличия скорости распространения от скорости света в вакууме. При таком подходе точность учета атмосферных искажений будет определяться точностью описания показателя преломления n .

Для анализа точности восстановления показателя преломления в атмосфере можно воспользоваться результатами, полученными при компенсации атмосферных погрешностей в СРНС ГЛОНАСС, GPS, Galileo [14; 15].

Сравнение точности оценки времени задержки сигналов в СРНС GPS при использовании различных моделей высотного профиля индекса преломления тропосферы показывает, что при углах возвышения более 10 градусов все перечисленные модели профиля дают ошибки величиной до 1 нс, а экспоненциальная модель – до 0,5 нс. Если полученное значение точности удовлетворяет заданным требованиям, то достаточно воспользоваться справочными данными по темпера-

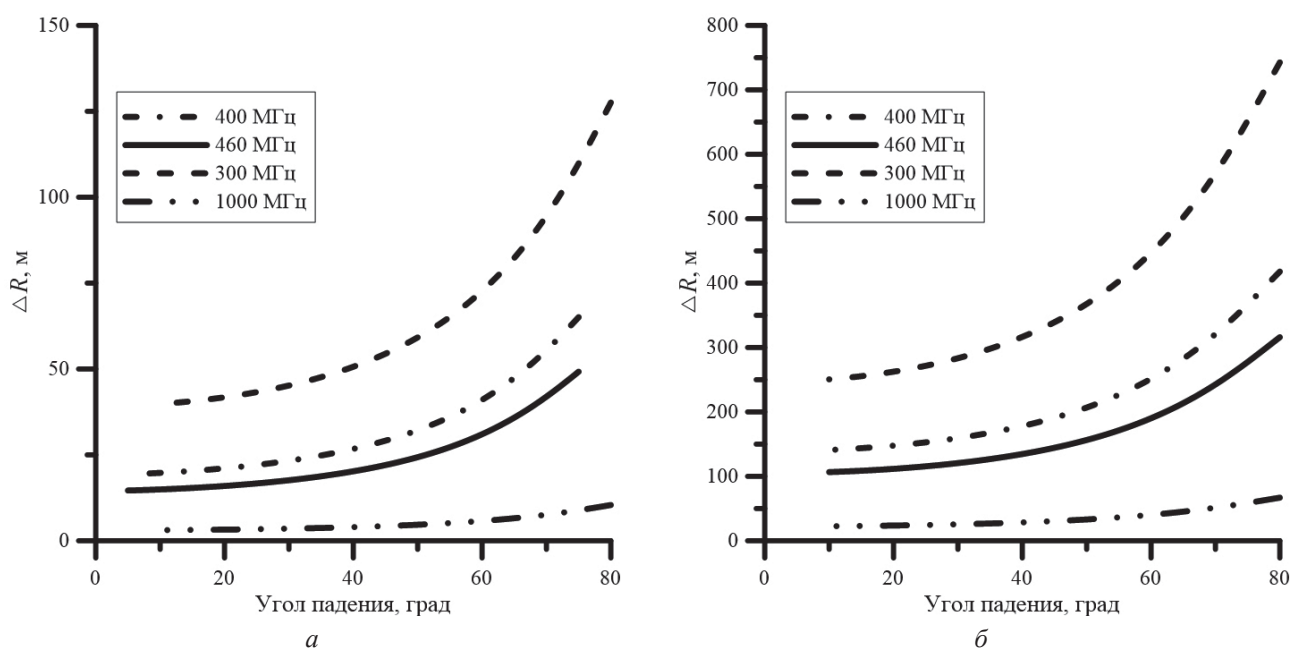


Рисунок 3. Зависимость ошибки измерения дальности от угла падения для низкой (а) и высокой (б) солнечной активности

туре, давлению и влажности, рекомендованными Международным союзом электросвязи [16]. Для более точного определения пространственного распределения показателя преломления необходимо привлекать данные температурно-ветрового зондирования или данные восстановления вертикальных профилей температуры и влажности воздуха на разных уровнях атмосферного давления, полученные с космического аппарата (КА) [17].

Точность моделей ионосферы, как правило, проверяется по данным вертикального зондирования ионосферы через относительное отклонение модельных значений критической частоты слоя максимума ионосферы от измеренных. Указанная точность для средних широт составляет менее 10 % [8–13]. Наиболее удобными с практической точки являются модели ионосферы IRI-Plas [18] и NeQuick [19]. Модель IRI-Plas примечательна тем, что в ней заложены корректировки вертикального профиля концентрации электронов не только по текущим индексам солнечной и магнитной активности, но и по полному электронному содержанию. Модель NeQuick разрабатывалась специально для европейской СРНС Galileo. В навигационном сообщении КА системы Galileo передаются три коэффициента полинома, позволяющие вычислить эффективный параметр (effective ionisation parameter, аналог индекса солнечной активности $F_{10,7}$) для адаптации модели NeQuick к текущим геофизическим условиям.

Оценивание ошибки измерения наклонной дальности наблюдения

На основе предложенного подхода проведем оценивание уровня атмосферных погрешностей.

При моделировании в качестве исходных данных было принято:

- вектор положения КА $R_{КА}$ (координаты: широта $\lambda = 55,0$, долгота $\varphi = 37,5$, высота $h = 500$ км);
- вектор положения объекта R_j (координаты вычисляются для значений угла падения в диапазоне 10–80 градусов, $h = 0$ км);
- стандартные значения температуры и давления на уровне земной поверхности ($P = 1013,25$ гПа, $T = 288,15$ К°).

В качестве модели ионосферы использовалась модель IRI-Plas, уровень солнечной активности определялся индексом солнечной активности W (число Вольфа). На рисунке 3 представлены результаты моделирования для низкой ($W = 10$) и высокой ($W = 200$) солнечной активности. Для углов падения 20...60° на частотах $f = 300$; 400; 460 и 1000 МГц величина ошибки по дальности составила:

- соответственно заданным частотам для низкой солнечной активности: 41...75 м, 20...40 м, 15...32 м и 3...6 м;
- соответственно заданным частотам для высокой солнечной активности: 260...490 м, 147...260 м, 113...200 м и 24...44 м.

Для полосы 60 МГц на несущей частоте 430 МГц в диапазоне углов падения 20...60° величина ошибки по дальности меняется в преде-

лах 15...40 м для низкой солнечной активности и в пределах 113...260 м для высокой солнечной активности.

Результаты моделирования показывают возможность использования предлагаемого подхода для оценивания и учета погрешностей, вносимых атмосферой Земли в измерения радиолокационных параметров, с помощью методов расчета траекторий радиоволн при заданном показателе преломления среды.

Заключение

Таким образом, рассмотренный в работе методический подход к компенсации атмосферных искажений при формировании опорной функции позволяет улучшить характеристики синтезированного РЛИ.

В качестве моделей ионосферы и моделей вертикального профиля индекса преломления тропосферы необходимо отдавать предпочтение моделям, параметры которых корректируются по данным, предоставляемым системами ионосферного мониторинга и метеостанциями.

Компенсация остаточных фазовых искажений и случайных фазовых ошибок при синтезе РЛИ проводится по известным навигационным параметрам и с использованием широкого спектра алгоритмов автофокусировки, которые обладают достаточно высокой эффективностью и имеют широкое практическое применение [2–5; 20; 21].

Литература

1. Полетаев А.М. Информологический анализ космических радиолокационных систем. СПб.: Изд. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 214 с.
2. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. 460 с.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
4. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба [и др.]. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.
5. Горячкин О.В. Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С. 177–183.
6. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование / С.В. Боев [и др.]. М.: Радиотехника, 2013. 168 с.
7. Ионосферное обеспечение средств локации, навигации и связи / Б.В. Троицкий [и др.]. СПб: Изд. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. 235 с.
8. Оперативная оценка состояния околоземного космического пространства / В.И. Ашманец [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. 2000. Т. 40, № 1. С. 109–112.
9. Мальцева О.А., Родионова В.Т., Шлюпкин А.С. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45, № 4. С. 480–486.
10. Троицкий Б.В., Ортиков М.Ю., Лобанов К.А. Ионосферное обеспечение коротковолновой радиосвязи с использованием карт полного электронного содержания // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 47, № 3. С. 389–394.
11. Модель фоновой ионосферы с возможностью коррекции на текущую ситуацию в нескольких высотных областях / Е.М. Вдовин [и др.] // Взаимодействие полей и излучения с веществом: труды 12-й конференции молодых ученых. 2011. С. 37–45.
12. Тетерин К.А. Локальная адаптация модели ионосферы IRI по данным возвратно-наклонного зондирования // Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53, № 3. С. 354–360.
13. Метод коррекции модели ионосферы по данным широкозонных дифференциальных систем СРНС / К.В. Бакурский [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54, № 4. С. 463–467.
14. Першин Д.Ю. Сравнительный анализ моделей тропосферной задержки в задаче определения местоположения высокой точности в спутниковых навигационных системах ГЛОНАСС/GPS // Вестник НГУБ. Серия: Информационные технологии. 2009. Т. 7, № 1. С. 84–91.
15. Захаров Ф.Н., Крутиков М.В. Сравнение точности оценки времени задержки навигационных сигналов при использовании различных моделей высотного профиля индекса преломления тропосферы // Доклады ТУСУРа. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. 2014. № 2 (32). С. 7–12.
16. Рекомендация МСЭ-R P.835-4. Эталонные стандарты атмосферы. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.835-4-200503-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 24.02.2020).

17. Кашкин В.Б., Петров Е.В. Оценка тропосферной задержки сигналов ГЛОНАСС и GPS с использованием спутниковых данных АТОВС по вертикальным профилям атмосферы // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 9-2. С. 27–28.
18. Gulyaeva T.L., Huang X., Reinisch B.W. The ionosphere-plasmasphere model software for ISO // Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. 2002. Vol. 39, no. 3. P. 143–152.
19. Algorithm for Galileo Single Frequency Users. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction. URL: https://www.gsceuropa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (дата обращения: 24.02.2020).
20. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Алгоритмы автофокусировки инверсно-синтезируемых двумерных радиолокационных изображений объектов // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 8. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf> (дата обращения: 20.03.2020).
21. Горячкин О.В. Автоматическая фокусировка изображений в радиолокаторе с синтезированной апертурой // Труды научных заведений связи. Анализ сигналов и систем связи. 1996. № 161. С. 128–134.

Получено 16.07.2020

Хазов Александр Сергеевич, к.в.н., начальник лаборатории Военно-Космической Академии (ВКА) им. А.Ф. Можайского. 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Петроградский район, ул. Ждановская, 13. Тел. +7 921 784-99-58. E-mail: aleksandr1979-h@mail.ru

Ортиков Михаил Юрьевич, к.т.н., старший научный сотрудник ВКА им. А.Ф. Можайского. 197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Петроградский район, ул. Ждановская, 13. Тел. +7 921 442-01-64. E-mail: Mort1964@rambler.ru

METHODOLOGICAL APPROACH TO COMPENSATION OF ATMOSPHERIC DISTORTION IN THE FORMATION OF IMAGES OBTAINED USING RADARS WITH SYNTHESIZED APERTURE OF A SPACE-BASED ANTENNA

Khazov A.S., Ortikov M.Yu.

*Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: aleksandr1979-h@mail.ru, mort1964@rambler.ru*

This article considers the influence of atmospheric disturbances on the values of the signal parameters of a radar with a synthesized aperture of a space-based antenna. Significant phase disturbances of the trajectory signal in earth remote sensing systems lead to a violation of its coherent structure and can lead to complete destruction of the radar image. One of the preferred ways to solve this problem is to improve the algorithms for generating the reference function. A new methodological approach to compensation of atmospheric disturbances in the formation of images is proposed, allowing to improve the quality of radar image synthesis it is characterized by a joint account of the influence of tropospheric and ionospheric disturbances at the stage of forming the reference function. The dependences of the distance measurement error on the location angle for different levels of solar activity are obtained and the results of estimating the level of atmospheric errors based on the considered approach are presented.

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

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.4.11

Khazov Alexander Sergeevich, Military Space academy A.F. Mozhaisky, 13, Zhdanovskaya Street, Petrogradsky district, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; Head of the laboratory of the Military Institute (Research), PhD in Military Sciences. Tel. +7 921 784-99-58. E-mail: aleksandr1979-h@mail.ru

Ortikov Mikhail Yuryevich, Military Space Academy A.F. Mozhaisky, 13, Zhdanovskaya Street, Petrogradsky district, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; Senior Research of the laboratory of the Military Institute (Research), PhD in Technical Sciences. Tel. +7 921 442-01-64. E-mail: mort1964@rambler.ru

References

1. Poletaev A.M. *Informological Analysis of Space Radar Systems*. Saint Petersburg: Izd. VKA im. A.F. Mozhajskogo, 2013, 214 p. (In Russ.)
2. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P. *Space Radar Survey of the Earth's Surface in Jamming Conditions*. Voronezh: IPC «Nauchnaja kniga», 2014, 460 p. (In Russ.)
3. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. *Radio Vision. Earth Remote Sensing Radar Systems*. Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p. (In Russ.)
4. Verba V.S. et al. *Space-Based Ground Survey Radar Systems*. Moscow: Radiotekhnika, 2010, 675 p. (In Russ.)
5. Gorjachkin O.V. Influence of the Earth's atmosphere on degradation of image characteristics of synthetic aperture space radar stations. *Komp'yuternaja optika*, 2002, no. 24, pp. 177–183. (In Russ.)
6. Boev S.V. et al. *Powerful Over-The-Horizon Early Warning Radars: Development, Testing, Operation*. Moscow: Radiotekhnika, 2013, 168 p. (In Russ.)
7. Troitskij B.V. et al. *Ionospheric Support of Means of Location, Navigation and Communication*. Saint Petersburg: Izd. VKA im. A.F. Mozhajskogo, 2011, 235 p. (In Russ.)
8. Ashmanets V.I. et al. Rapid assessment of the state of near-earth space. *Geomagnetizm i aeronomija*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 109–112. (In Russ.)
9. Mal'tseva O.A., Rodionova V.T., Shljupkin A.S. Use of complete electronic content for the current diagnostics of the state of the ionospheric channel. *Geomagnetizm i aeronomija*, 2005, vol. 45, no. 4, pp. 480–486. (In Russ.)
10. Troitskij B.V., Ortikov M.Yu., Lobanov K.A. Ionospheric provision of short-wave radio communications using full electronic content maps. *Geomagnetizm i aeronomija*, 2007, vol. 47, no. 3, pp. 389–394. (In Russ.)
11. Vdovin E.M. et al. Background ionosphere model with the ability to correct for the current situation in several altitude regions. *Vzaimodejstvie polej i izluchenija s veschestvom: trudy 12-j konferentsii molodyh uchenyh*, 2011, pp. 37–45. (In Russ.)
12. Teterin K.A. Local adaptation of the IRI ionosphere model according to oblique-return sounding data. *Geomagnetizm i aeronomija*, 2013, vol. 53, no. 3, pp. 354–360. (In Russ.)
13. Bakurskij K.V. et al. Correction method of the ionosphere model based on the data of wide-gap differential systems of the SRNS. *Geomagnetizm i aeronomija*, 2014, vol. 54, no. 4, pp. 463–467. (In Russ.)
14. Pershin D.Yu. Comparative Analysis of Tropospheric Delay Models in the Problem of High Accuracy Position Determination in Satellite Navigation Systems GLONASS/GPS. *Vestnik NGUB, Serija: Informacionnye tehnologii*, 2009, vol. 7, no. 1, pp. 84–91. (In Russ.)
15. Zaharov F.N., Krutikov M.V. Comparison of the accuracy of estimating the delay time of navigation signals using different models of the tropospheric refractive index altitude profile. *Doklady TUSURa. Elektronika, izmeritel'naja tehnika, radiotekhnika i svjaz'*, 2014, no. 2 (32), pp. 7–12. (In Russ.)
16. Recommendation ITU-R P.835-4. Reference standards for the atmosphere. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.835-4-200503-S!!PDF-R.pdf (accessed: 24.02.2020).
17. Kashkin V.B., Petrov E.V. Estimation of tropospheric delay of GLONASS and GPS signals using ATOVS satellite data on vertical atmospheric profiles. *Izvestija vuzov. Fizika*, 2010, vol. 53, no. 9-2, pp. 27–28. (In Russ.)
18. Gulyaeva T.L., Huang X., Reinisch B.W. The ionosphere-plasmasphere model software for ISO. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2002, vol. 39, no. 3, pp. 143–152.
19. Algorithm for Galileo Single Frequency Users. European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction. URL: https://www.gsceuropa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (accessed: 24.02.2020).

20. Morjakov S.I., Nesterov S.M., Skorodumov I.A. Autofocusing algorithms for inverse-synthesized two-dimensional radar images of objects. *Zhurnal radioelektroniki*, 2018, no. 8. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf> (accessed: 20.03.2020). (In Russ.)
21. Gorjachkin O.V. Automatic focusing of images in synthetic aperture radar. *Trudy nauchnyh zavedenij svyazi. Analiz signalov i sistem svyazi*, 1996, no. 161, pp. 128–134. (In Russ.)

Received 16.07.2020

УДК 543.42

КАНАЛЫ ДОСТАВКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ СПЕКТРА В ДВУХЪЯРУСНЫХ СЕТЯХ КОГНИТИВНОГО РАДИО

Степанова Н.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: puhleniw@mail.ru

Для сетей когнитивного радиозондирования спектра является наиболее важной функцией. Так как вероятности обнаружения первичных пользователей вторичными пользователями могут ухудшаться под влиянием шумов, помех, релеевских замираний, нужно выбрать наиболее подходящую архитектуру сети для улучшения характеристик как в каналах доставки, так и в каналах зондирования. В статье рассматривается задача зондирования лицензированной полосы частот с целью обнаружения первичного пользователя сети когнитивного радио с двухъярусной архитектурой сети, на первом, нижнем ярусе вторичные пользователи концентрируются в отдельных малых частях зоны покрытия сети (кластерах), находящихся на значительных расстояниях от центра слияния локальных результатов зондирования отдельных вторичных пользователей. Эти локальные результаты ретранслируются базовыми станциями кластеров на центр слияния.

Ключевые слова: когнитивное радио, зондирование спектра, канал доставки, вероятность сообщений, вероятность ошибки, OFDMA, QPSK-ММ модуляция, модуляция ортогональная 4-FSK, первичный пользователь

Введение

Рассматриваемая архитектура сети – это целесообразный вариант построения радиодоступа в сетях когнитивной технологии, характерными особенностями которых служат: а) большая территориальная зона радиопокрытия; б) диапазон сравнительно длинных волн и, соответственно, габаритных антенн; в) значительный процент среди вторичных пользователей (ВП) сети составляют устройства D2D, работающие в пределах кластеров – локальных зон, каждая из которых занимает лишь малую часть территории общей зоны покрытия сети. Общий принцип сети двухъярусной архитектуры иллюстрирует рисунок 1, на котором лицензированный первичный пользователь обозначен как ПП. Показаны каналы зондирования и доставки [1].

Принцип сети двухъярусной архитектуры

На нижнем ярусе базовая станция (БС) каждого собирает результаты зондирования спектра (ЗС) отдельными ВП, зарегистрированными в нем и после приема и демодуляции сообщений, ретранслирует их на центр слияния (ЦС), центральную станцию всей сети, управляющую ее

работой, выполняющую объединение всех локальных результатов ЗС и выносящую решение о допуске и прекращении работы ВП в сети. Совокупность радиоканалов БС-ЦС образует второй, верхний ярус сети. Результаты ЗС i -м ВП передаются по каналу доставки в формате 2-битовых сообщений – $a_i b_i$. Если старший бит $a_i = 1$, это означает: ПП обнаружен, если $a_i = 0$, то ПП в сети отсутствует. Значения младшего бита b_i указывает на достоверность решения: если $b_i = 1$, то показатель «правдоподобия» бита a_i выше установленного порогового значения, если $b_i = 0$, то ниже.

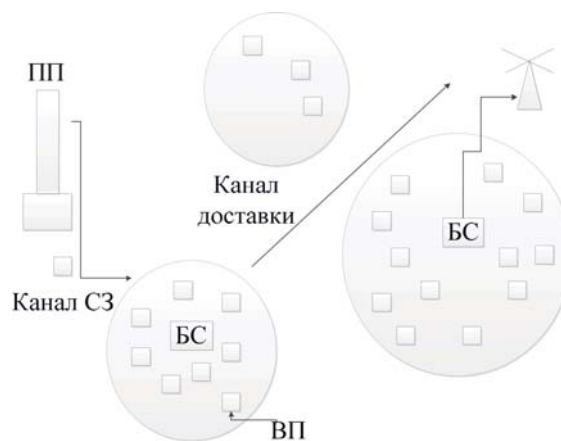


Рисунок 1. Архитектура двухъярусной сети