

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ДЕГРАДАЦИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОБРАЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

О.В. Горячкин

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

В статье анализируются деградация характеристик радиолокационных изображений трансионосферных РЛС с синтезированной апертурой (РСА), возникающая вследствие эффектов распространения радиоволн в атмосфере Земли. Предлагается методика расчета характеристик изображений и, в частности, азимутального разрешения РСА. Приводятся результаты расчета потенциального пространственного разрешения на радиолокационных изображениях с учетом влияния атмосферы.

Введение

В настоящее время все большее применение в различных технологиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находят космические РСА [1]. В некоторых из них, например, в задачах исследования динамических процессов в мировом океане, РСА признается единственным инструментом для получения достоверной информации. Это объясняется двумя основными обстоятельствами, отличающими РСА от датчиков дистанционного зондирования, работающих в видимом или в инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра:

1) РСА способны получать радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности Земли вне зависимости от состояния облачного покрова и освещенности поверхности;

2) РЛИ несет в себе зависимость от некоторых специфических характеристик подстилающей поверхности: динамика поверхности, диэлектрическая постоянная, микрорельеф.

Естественными причинами, которые могут привести к существенным изменениям этих характеристик и РЛИ, соответственно, могут быть: вегетация и потеря листвы растительностью; повреждение растительности (пожары, загрязнения и т.п.); активное сельское хозяйство; изменение микрорельефа и влажности поверхности (дождь, снег и т.п.); наводнение; эрозия почвы; динамика взволнованной водной поверхности (приводной ветер, мелководье, поверхностно-активные вещества, гидродинамические эффекты, связанные с океанскими течениями и течением рек); изменение структуры морских льдов и глетчеров.

Это определяет возможность решения с помощью радиолокационного наблюдения целого ряда практических задач. Например, более чем два десятка лет РЛИ используются в геологии для поиска геоморфологических признаков, которые связаны с минералами и газоводонесущими породами [2].

РЛС - основное средство в дистанционном зондировании морских льдов, проводки судов во льдах. С помощью изображений РСА удается не только картографировать ледовые поля, но и определять толщину льда, его происхождение, состояние; определить структуру трещин и динамику их развития.

Особенно успешно с помощью радиолокационных изображений решаются задачи определения характеристик приводного ветра (скорость, направ-

ление), а также прогноза энергии ураганов, контроля зон штормов и сильного волнения [4].

Помимо указанных выше основных свойств радиолокационных изображений, при интерферометрической обработке появляется возможность получения трехмерной пространственной информации о характеристиках радиолокационного рассеяния земной поверхности.

В последние годы обсуждаются проблемы реализации космических РСА дистанционного зондирования Земли, работающих в диапазонах частот, традиционно не используемых в космической радиолокации. Это РСА, работающие в верхней части сантиметрового диапазона и диапазона миллиметровых волн (X, Ku, K), а также РСА, работающие в верхней части дециметрового диапазона и диапазоне метровых волн (P, UHF, VHF).

Необходимость размещения таких РСА на борту космического аппарата диктуется практическими нуждами.

Развитие радиолокационной картографии и геодезии, коммерческих приложений ДЗЗ требует увеличения пространственной разрешающей способности.

Сегодня пространственное разрешение в X диапазоне ограничено Международной комиссией по распределению частот (МКРЧ) 1м, в то же время современные технологии РСА могут обеспечить разрешение до единиц сантиметров при увеличении используемой полосы частот, что может быть достигнуто в высокочастотных диапазонах (X, Ku, K).

Использование диапазонов (P, UHF, VHF) особенно интересно, поскольку РЛИ в этих диапазонах несет в себе информацию о распределении коэффициента отражения в толще земной поверхности, при этом глубина проникновения в VHF диапазоне может достигать нескольких сотен метров.

Кроме того, использование низкочастотных диапазонов связано с высокой эффективностью применения РСА для картографирования растительных покровов.

К сожалению, размещение этих систем в космосе сопровождается рядом сложных технических проблем.

Одной из основных при этом является потеря когерентности РСА, вследствие эффектов распространения радиоволн рассматриваемых диапазонов через атмосферу Земли. Эти эффекты приводят к значительному снижению потенциального про-

странственного разрешения этих систем, геометрическим и поляризационным искажениям.

Данная проблематика обусловила интерес к изучению влияния атмосферных эффектов на характеристики космических (трансионосферных) РСА. На сегодняшний день опубликовано достаточно большое количество работ по данной проблематике [4-11].

Вместе с тем в литературе недостаточно уделено внимание созданию моделей для количественной оценки деградации радиолокационных изображений и, в частности, оценки азимутального разрешения.

В этой статье поставлена задача восполнить этот пробел с учетом (в отличие от [4,6]) двумерных характеристик атмосферных флуктуаций сигнала РСА.

1. Математическая модель изображений космической РСА

На основе анализа эффектов распространения сигнала РСА в атмосфере Земли в [8,14] были получены общие выражения, описывающие отраженный сигнал космической РСА:

$$\dot{S}(t, kT) = \iint \dot{K}_A(kT, \theta, \sigma) \dot{K}_R(t - \Delta t(kT - \theta, \sigma)) \times \xi(\theta, \sigma) g_R(\sigma) g_A(kT - \theta, \sigma) d\theta d\sigma,$$

где:

$$\begin{aligned} \dot{K}_R(t) &= \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} \dot{h}(j\omega) \dot{K}_{RE}(j\omega) \dot{K}_h(j\omega) \times \\ &\times \dot{K}_{AT}(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega, \\ \dot{K}_A(kT, \theta, \sigma) &= \exp(j\omega_0 \Delta t(kT - \theta, \sigma)) \times \\ &\times \exp(j\omega_0 \delta(kT, \theta, \sigma)). \end{aligned} \quad (1)$$

В этом выражении: $\xi(\theta, \sigma)$ - коэффициент отражения подстилающей поверхности; $\dot{h}(j\omega)$ - комплексная огибающая зондирующего сигнала; $\dot{K}_{RE}(j\omega)$ - описывает рефракцию зондирующего сигнала в регулярной атмосфере; $\dot{K}_h(j\omega)$ - передаточная характеристика аппаратного тракта; $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$ - регулярная часть временного запаздывания сигнала в атмосфере; $\delta(kT, \theta, \sigma)$ - флуктуационная компонента временного запаздывания сигнала в турбулентной атмосфере; t, kT - координаты (задержка, номер зондирующего сигнала); θ, σ - координаты элемента подстилающей поверхности (азимут, дальность); g_A и g_R - вещественные функции, описывающие модуляцию сигнала диаграммой направленности антенны РСА.

Данная модель описывает все основные эффекты, приводящие к искажениям РЛИ вследствие эффектов распространения радиоволн в атмосфере Земли.

В частности, искажения, возникающие вследствие распространения через атмосферу Земли широкополосных сигналов, описываются передаточной функцией $\dot{K}_{RE}(j\omega)$. При этом учитываются как

искажения, вызванные частотной зависимостью коэффициента преломления ионосферы, так и поляризационная дисперсия, возникающая вследствие эффекта Фарадея.

Вопросы, связанные с влиянием данного эффекта, и модели передаточной функции достаточно полно рассмотрены в [4].

В результате рефракции в ионосфере искажается форма зондирующего импульса РСА, и соответственно ухудшается разрешающая способность РСА в сечении дальности, возникают геометрические искажения РЛИ [6].

Флуктуации времени распространения сигнала в атмосфере $\delta(kT, \theta, \sigma)$, вызванные относительным движением РСА и атмосферных неоднородностей, влияют на разрешающую способность РСА в сечении азимута.

В данной работе рассмотрим статистические свойства данных флуктуаций или, что эквивалентно, флуктуаций траекторной фазы $\delta(kT, \theta, \sigma) \cdot \omega_0$, рассматривая их как нестационарное случайное поле.

Определим систему координат РСА следующей системой уравнений (см. Рис. 1) [14]:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{2}{c} \cdot |\bar{\mathbf{R}}_c(\theta) - \bar{\mathbf{R}}| \\ (\bar{\mathbf{R}}'_c(\theta), \bar{\mathbf{R}}_c(\theta) - \bar{\mathbf{R}}) = 0 \\ F(\bar{\mathbf{R}}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

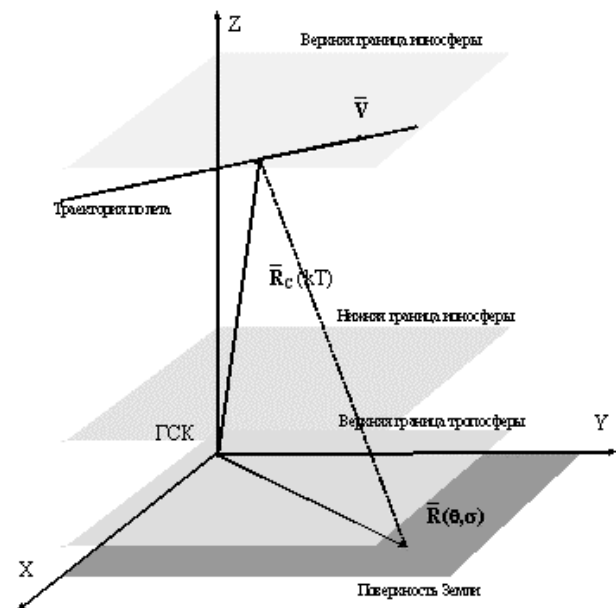


Рис. 1. Геометрия космической РСА.

Время распространения в регулярной атмосфере:

$$\begin{aligned} \Delta t_p(kT, \theta, \sigma) &= \frac{2}{c} \cdot \left[1 + \omega \frac{d}{d\omega} \right] \times \\ &\times \left[\int_0^{|\bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma)|} n_p(h(\bar{\mathbf{R}}_c(kT), \bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma)), \omega, r) dr \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Флуктуации времени распространения:

$$\delta(kT, \theta, \sigma) = \frac{2}{c} \left[1 + \omega \frac{d}{d\omega} \right] \times \left[\int_0^{|\bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma)|} n_\phi \left(h \left(\bar{\mathbf{R}}_c(kT), \bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma) \right), \omega, r \right) dr \right]. \quad (4)$$

Для оценки флуктуаций атмосферы необходимо знать статистические характеристики пространственных флуктуаций коэффициента преломления, который является функцией трех пространственных координат.

В первом приближении можно считать [12,13], что поле коэффициента преломления статистически однородно и изотропно. Тогда корреляционная функция флуктуаций тропосферы может быть описана моделью Буккера – Гордона [12]:

$$B_r \left(|\bar{\mathbf{R}}_1 - \bar{\mathbf{R}}_2|, h \right) = \sigma_r^2(h) \exp \left(- \frac{|\bar{\mathbf{R}}_1 - \bar{\mathbf{R}}_2|}{l_0} \right), \quad (5)$$

где: $\sigma_r^2(h) = \left(\frac{C_n^2(h)}{2} \right) l_0^{2/3}$, $C_n^2(h)$ - структурная постоянная показателя преломления тропосферы, взятая далее в приземном слое [5], l_0 - внешний масштаб турбулентности (обычно 50-100м [1,13]).

Флуктуации ионосферы характеризуются пространственной корреляционной функцией флуктуаций электронной плотности и может быть аппроксимирована в следующем виде [1]:

$$B_{ion} \left(|\bar{\mathbf{R}}_1 - \bar{\mathbf{R}}_2|, h \right) = 2.544 \cdot 10^6 \frac{\sigma_e^2(h)}{\omega_0^4} \times \exp \left(- \frac{|\bar{\mathbf{R}}_1 - \bar{\mathbf{R}}_2|^2}{\xi_0^2} \right), \quad (6)$$

где: $\sigma_e(h) = \delta N \cdot N_e(h)$ - с.к.о. флуктуаций электронной плотности, $N_e(h)$ - электронная концентрация в ионосфере, $\delta N = (0.1...2.5) \cdot 10^{-2}$, ξ_0 - масштаб неоднородностей в ионосфере (200-5000м [1,5,12,13]).

Определим статистические характеристики флуктуаций времени прихода электромагнитной волны. Очевидно, что $\mathbf{M} \{ \delta(kT, \theta, \sigma) \} = 0$.

Тогда корреляционная функция флуктуаций времени прихода имеет вид:

$$\begin{aligned} B_\delta(kT, mT, \theta_1, \theta_2, \sigma_1, \sigma_2) &= \\ &= \mathbf{M} \{ \delta(kT, \theta_1, \sigma_1) \cdot \delta(mT, \theta_2, \sigma_2) \} = \\ &= \left(\frac{4}{c^2} \right) \int_0^{|\bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta_1, \sigma_1)|} \int_0^{|\bar{\mathbf{R}}_c(mT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta_2, \sigma_2)|} B_f(kT, mT, \theta_1, \theta_2, \sigma_1, \sigma_2, r_1, r_2) dr_1 dr_2. \end{aligned} \quad (7)$$

В этом выражении $B_\phi(kT, mT, \theta_1, \theta_2, \sigma_1, \sigma_2, r_1, r_2)$ - корреляционная функция флуктуаций коэффициента преломления, которую, с учетом (5), (6), можно записать в виде:

$$\begin{aligned} B_f(kT, mT, \theta_1, \theta_2, \sigma_1, \sigma_2, r_1, r_2) &= \\ &= \sigma_r^2 \left(h \left(\frac{|\bar{\mathbf{R}}_1(kT, \theta_1, \sigma_1, r_1) + \bar{\mathbf{R}}_2(mT, \theta_2, \sigma_2, r_2)|}{2} \right) \right) \times \\ &\times \exp \left(- \frac{|\bar{\mathbf{R}}_1(kT, \theta_1, \sigma_1, r_1) - \bar{\mathbf{R}}_2(mT, \theta_2, \sigma_2, r_2)|}{l_0} \right) + \\ &+ \exp \left(- \frac{|\bar{\mathbf{R}}_1(kT, \theta_1, \sigma_1, r_1) - \bar{\mathbf{R}}_2(mT, \theta_2, \sigma_2, r_2)|}{\xi_0} \right) \times \\ &\times 2.544 \frac{10^6}{\omega_0^4} \times \\ &\times \sigma_e^2 \left(h \left(\frac{|\bar{\mathbf{R}}_1(kT, \theta_1, \sigma_1, r_1) + \bar{\mathbf{R}}_2(mT, \theta_2, \sigma_2, r_2)|}{2} \right) \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_1(kT, \theta_1, \sigma_1, r_1) &= \bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \\ &- \frac{r_1}{|\bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta_1, \sigma_1)|} \cdot (\bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta_1, \sigma_1)), \\ \bar{\mathbf{R}}_2(mT, \theta_2, \sigma_2, r_2) &= \bar{\mathbf{R}}_c(mT) - \\ &- \frac{r_2}{|\bar{\mathbf{R}}_c(mT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta_2, \sigma_2)|} \cdot (\bar{\mathbf{R}}_c(mT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta_2, \sigma_2)). \end{aligned} \quad (9)$$

Найти аналитические выражения соответствующих характеристик в общем виде достаточно затруднительно, особенно для модели произвольного движения.

Без потери общности, для космических РСА можно рассмотреть модель равномерного движения. Этот случай описывают следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_c(kT) &= \begin{bmatrix} 0 \\ V \cdot kT \\ H_n \end{bmatrix}, \\ \bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma) &= \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{4} \cdot c^2 \cdot \sigma^2 - H_n^2} \\ \theta \cdot V \\ 0 \end{bmatrix}, \\ |\bar{\mathbf{R}}_c(kT) - \bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma)| &= \\ &= \sqrt{\frac{1}{4} \cdot c^2 \cdot \sigma^2 + V^2 \cdot (kT - \theta)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из данных расчетов дисперсии фазовых флуктуаций в [4,5,8] следует, что оптимальными частотными диапазонами работы космических РСА являются X,S,C,L диапазоны ($\lambda=3...25$ см). Влияние фазовых искажений в этих диапазонах несущественно.

В частотных диапазонах выше данной области частот ($\lambda < 3$ см) - существенно влияние флуктуаций тропосферы, а ниже ($\lambda > 25$ см) - ионосферы.

Фазовые флуктуации возрастают с увеличением высоты полета и угла визирования поверхности.

Однако энергетических характеристик фазовых флуктуаций недостаточно, чтобы оценить

влияние атмосферы на характеристики космических РСА и возможности компенсации этих эффектов при обработке.

Важную роль в оценке разрешающей способности РСА играет интервал корреляции флуктуаций траекторной фазы на интервале синтеза апертуры РСА.

Характерная особенность данного параметра - это резкое увеличение скорости флуктуаций траекторной фазы в низкочастотных диапазонах.

Это связано с преимущественным влиянием ионосферы. Влияние данного параметра недостаточно отражено в упоминавшейся литературе.

Рассмотрим модель изображения РСА в предположении, что оценка искаженного рефракцией в атмосфере зондирующего сигнала проведена на первом этапе обработки с использованием, например алгоритмов [14,15,16] и известна с достаточной точностью.

Предположим также, что нам известна функция запаздывания сигнала $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$. Это означает, что мы имеем не только достаточно точную модель движения РСА, но и адекватную модель регулярной атмосферы.

Перепишем (1) в виде:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t, kT) &= \iint \exp(j\omega_0 \delta(kT, \theta, \sigma)) \cdot \\ &\dot{K}(t - \Delta t(kT - \theta, \sigma)) \cdot \dot{\eta}(\theta, \sigma) d\theta d\sigma, \\ \dot{K}(t) &= \dot{K}_R(t) \cdot \exp(j\omega_0 t). \end{aligned} \quad (11)$$

В этом случае модель комплексного искаженного изображения РСА можно представить в виде:

$$\dot{I}(\theta_0, \sigma_0) = \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \int_{\Delta t(0, \sigma) - T/2}^{\Delta t(0, \sigma) + T/2} \dot{\Psi}(\theta, \sigma, \theta_0, \sigma_0) \dot{\xi}(\theta, \sigma) d\theta d\sigma, \Gamma$$

де:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(\theta, \sigma, \theta_0, \sigma_0) &= \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \exp(j\varphi(kT, \theta_0, \sigma_0)) \cdot \\ &\cdot \dot{\Phi}(\Delta t(kT - \theta_0, \sigma_0) - \Delta t(kT - \theta, \sigma)) dkT, \\ \dot{\Phi}(t) &= \exp(j\omega_0 t) \int \dot{K}_R(\tau) K_R^*(\tau - t) d\tau. \end{aligned} \quad (12)$$

Деградацию изображения традиционно можно описать шириной главного лепестка функции неопределенности РСА (изображение точечного отражателя). Однако в условиях больших значений флуктуаций траекторной фазы $\varphi(kT, \theta, \sigma) = \omega_0 \delta(kT, \theta, \sigma)$ главный лепесток рассыпается, и для характеристики пространственного разрешения удобно принять распределение энергии точечного отражателя на изображении [10].

Рассмотрим дисперсию функции неопределенности (12):

$$\begin{aligned} \mathbf{D}\{\dot{\Psi}(\theta, \sigma, \theta_0, \sigma_0)\} &= \\ &= \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} B_\eta(t_1, t_2, \theta_0, \sigma_0) \times \\ &\times \dot{\Phi}(\Delta t(t_1 - \theta_0, \sigma_0) - \Delta t(t_1 - \theta, \sigma)) \times \\ &\times \Phi^*(\Delta t(t_2 - \theta_0, \sigma_0) - \Delta t(t_2 - \theta, \sigma)) dt_1 dt_2. \end{aligned} \quad (13)$$

В этом выражении:

$$\begin{aligned} B_\eta(t_1, t_2, \theta_0, \sigma_0) &= \\ &= \mathbf{M}\left\{\exp\left(j\left(\varphi(t_1, \theta_0, \sigma_0) - \varphi(t_2, \theta_0, \sigma_0)\right)\right)\right\} - \\ &- \mathbf{M}\left\{\exp\left(j\varphi(t_1, \theta_0, \sigma_0)\right)\right\} \mathbf{M}\left\{\exp\left(-j\varphi(t_2, \theta_0, \sigma_0)\right)\right\}. \end{aligned}$$

Пусть известна двумерная характеристическая функция фазовых флуктуаций $\Theta_\varphi^2(\nu_1, \nu_2, t_1, t_2)$, тогда:

$$\begin{aligned} B_\eta(t_1, t_2) &= \Theta_\varphi^2(1, 1, t_1, t_2) - \\ &- \Theta_\varphi^2(1, 0, t_1, t_1) \cdot \Theta_\varphi^2(0, 1, t_2, t_2). \end{aligned} \quad (14)$$

В рамках гауссовской модели флуктуаций времени прихода волны (14) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} B_\eta(t_1, t_2, \theta_0, \sigma_0) &= \\ &= \exp\left(-\frac{\omega_0^2}{2} \left(B_\delta(t_1, t_1, \theta_0, \sigma_0) + \right. \right. \\ &\left. \left. + B_\delta(t_2, t_2, \theta_0, \sigma_0) \right) \right) \cdot \\ &\cdot \left(\exp\left(\omega_0^2 B_\delta(t_1, t_2, \theta_0, \sigma_0)\right) - 1 \right). \end{aligned} \quad (15)$$

где: $B_\delta(t_1, t_2, \theta_0, \sigma_0) = B_\delta(t_1, t_2, \theta_0, \theta_0, \sigma_0, \sigma_0)$ в (7).

2. Оценка пространственного разрешения космической РСА

Будем оценивать пространственное разрешение РСА в сечении азимутальной координаты как:

$$\Delta\theta = \frac{\int \mathbf{D}\{\dot{\Psi}(\theta, \sigma_0, \theta_0, \sigma_0)\} d\theta}{\mathbf{D}\{\dot{\Psi}(0, \sigma_0, \theta_0, \sigma_0)\}}. \quad (16)$$

Пренебрегая нестационарностью флуктуаций траекторной фазы на интервале синтеза апертуры для прямоугольной огибающей зондирующего сигнала, преобразуем (13) к виду:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}\{\dot{\Psi}(\theta)\} &= \int_{-T_s}^{T_s} B_\eta(t, 0, \sigma_0) \cdot (T_s - |t|) \times \\ &\times \exp(-j\omega_0 (\Delta t(t, \sigma_0) - \Delta t(t - \theta, \sigma_0))) dt. \end{aligned} \quad (17)$$

Анализируя данное выражение, можно сделать вывод о том, что разрешающая способность (16) определяется эффективным интервалом когерентности ΔT , который, в свою очередь, определяется формулой вида:

$$\Delta T = \frac{\int_{-T_s/2}^{T_s/2} B_\eta(t, 0, \sigma_0) dt}{B_\eta(0, 0, \sigma_0)} \quad (18)$$

Тогда пространственное разрешение для модели движения (10) можно определить, как:

$$\Delta_a = v\Delta\theta \approx \frac{\lambda R}{2v\Delta T} \quad (19)$$

На Рис.2 - Рис.5 показаны результаты расчетов азимутального разрешения космической РСА при следующих параметрах атмосферы: $C_n^2(0) = 9 \cdot 10^{-8}$, $l_0 = 100\text{м}$, $\delta N = 2.5 \cdot 10^{-2}$, $\xi_0 = 1000\text{м}$, $N_e = 10^{12}$. Три графика на каждом рисунке соответствуют разрешающей способности без учета деструктивного влияния атмосферы: 20м, 10м, 3м, соответственно.

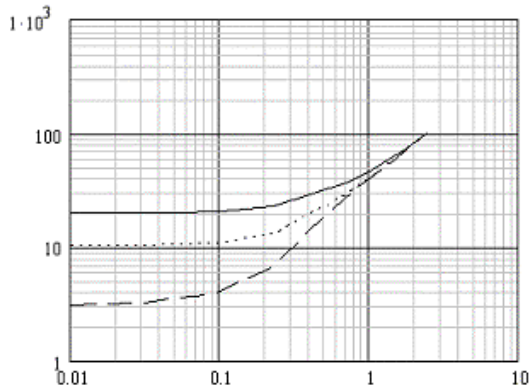


Рис.2. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали), $H=200\text{км}$.

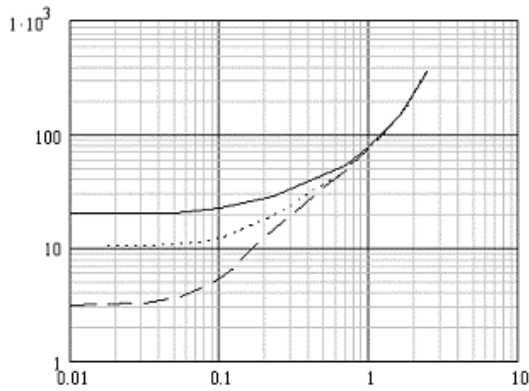


Рис.3. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали), $H=1000\text{км}$.

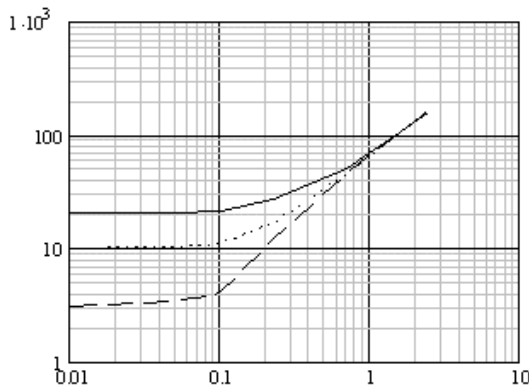


Рис.4. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали), $H=1000\text{км}$, $C_n^2(0) = 1 \cdot 10^{-8}$, $\delta N = 0.1 \cdot 10^{-2}$.

Анализируя результаты расчетов, заметим, что влияние атмосферы на разрешающую способность по азимутальной координате начинает сказываться уже, начиная с 10см, и существенно возрастает с 23см.

В длинноволновом диапазоне ($>70\text{см}$) деградация РЛИ в пространственном разрешении при возмущенной ионосфере может достигать 2-х порядков.

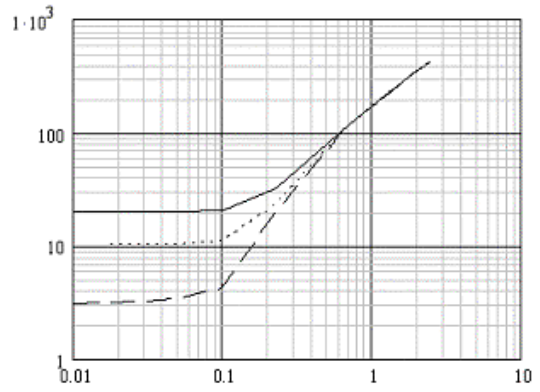


Рис.5. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали), $H=1000\text{км}$, $C_n^2(0) = 1 \cdot 10^{-8}$, $\delta N = 0.1 \cdot 10^{-2}$, $\xi_0 = 300\text{м}$.

Причем в этом диапазоне разрешающая способность практически не зависит от разрешающей способности без учета деструктивного влияния атмосферы и определяется преимущественно эффективным интервалом когерентности, который в свою очередь определяется исключительно параметрами атмосферы.

Степень деградации растет с увеличением высоты полета, и особенно с увеличением турбулентности ионосферы.

На разрешающую способность по азимуту в коротковолновых диапазонах ($<3\text{см}$) атмосфера влияния практически не оказывает.

Заключение

Влияние атмосферы на РСА, работающих в (P, UHF, VHF) диапазонах приводит к существенному снижению их разрешающей способности.

В последнее время рядом авторов предлагаются различные адаптивные алгоритмы формирования изображений, позволяющие преодолеть эти трудности, по крайней мере, в отношении достижения заданного пространственного разрешения.

Эти подходы основаны на использовании как параметрических, так и непараметрических алгоритмов автофокусировки радиолокационных изображений [14-16].

При этом компенсация эффектов рефракции зондирующего сигнала в атмосфере Земли и соответственно деградации разрешающей способности РСА в сечении дальности не является ключевой проблемой при использовании алгоритмов [9].

Деградация азимутального разрешения более тяжелая проблема, поскольку ядро оператора (12) нестационарно.

В работах [9,10] показано, что потенциальное разрешение РСА УКВ диапазона при использовании адаптивных непараметрических методов формирования изображений и телескопического обзора можно оценить как $\sqrt{\Delta_a \lambda}$, где Δ_a - максимально возможная разрешающая способность РСА с учетом влияния фактора атмосферы. При этом выигрыш

этих алгоритмов в пространственном разрешении составляет от 10 до 40 раз.

Однако в основе данной границы заложена возможность представления искаженного изображения в виде оператора свертки. Поэтому вопрос о компенсации данного эффекта в общем виде остается открытым.

Помимо теоретических исследований существенным толчком в решении данной проблемы мог бы стать эксперимент. С этой точки зрения планы по созданию и установке на борту международной космической станции соответствующей радиолокационной аппаратуры следует признать весьма актуальными.

Литература

1. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. – М.: «Сов. радио», 1972, 160с.
2. Горячкин О.В., Дусаев Ш.З., Железнов Ю.Е., Филимонов А.Р. Современное состояние и перспективы развития космических радиолокационных комплексов дистанционного зондирования Земли // В сборнике научно-технических статей по ракетно-космической тематике. – Самара, 1999, с.49-56.
3. Многоцелевая аэрокосмическая оперативная радиолокационная система получения информации о состоянии основных объектов природной среды Земли ЭКОРОДАР-МЦ. Эскизный проект, Т.1: «Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Обоснование параметров многоцелевого аэрокосмического радиолокационного комплекса» - Харьков, ИРЭ АН УССР, ГМНП «ЭКОРАДАР», 1991, 326с.
4. 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.
5. Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. Исследование статистических и спектральных характеристик трансатмосферных радиосигналов УКВ-СВЧ диапазона // Журнал радиоэлектроники, №2, 2001.
6. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Y., Freeman T. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz //Radio Science (USA) – 1999 – vol. 34 – num.1 – p. 257-268.
7. Ефимов А.И., Калинин А.А., Кутуза Б.Г. Использование радиолокатора синтезированной апертуры Р-диапазона в космических экспериментах // Радиотехника, 1998, №2, с.19-24.
8. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. The some problems of realization spaceborne SAR's in P, UHF, VHF bands // IEEE proceedings of 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99), Hamburg, Germany.
9. Goriachkin O.V. Estimations of the Maximum Spatial Resolution Space-borne VHF-band SAR for Adaptive Synthetic Aperture Techniques // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2000), Honolulu, 3p.
10. Горячкин О.В. Потенциальное пространственное разрешение космических радиолокаторов с синтезированной апертурой УКВ диапазона частот // В сборнике докладов всероссийской научной конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами», г. Муром, 20-22 июня 2001г., с.562-565.
11. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. Inverse Problems with Unknown Kernels in Microwave Remote Sensing // Proceedings of of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2000), Orlando, Florida, USA, 2000, vol.7, p610-615.
12. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. – М.: «Радио и связь», 1983, 224с.
13. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. – М.: «Связь», 1969, 155с.
14. Штейншлейгер В.Б., Дзенкевич А.В., Манаков В.Ю., Мельников Л.Я., Мисежников Г.С. О разрешающей способности трансионосферных РЛС для дистанционного зондирования Земли в УКВ-диапазоне волн // Радиотехника и Электроника, 1997, т.42, №6, с.725-732.
15. Goriachkin O.V. Ionospheric effects compensation in spaceborne VHF-band SAR: Blind identification approach // CDROM Proceedings of Open Symposium on Propagation and Remote Sensing of URSI Commission F, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 12-15 February 2002, 4p.
16. Goriachkin O.V. Imaging in Transionospheric Low Frequency SAR // Proceedings of Forth European Conference on Synthetic Aperture Radar, 4-6 June 2002, Cologne, Germany, pp485-488

The influence of the Earth's atmosphere on the degradation of the characteristics of images of space radar stations with a synthetic aperture

O.V. Goryachkin¹

¹ Volga State Academy of Telecommunications and Informatics

Abstract

The article analyzes the degradation of characteristics of radar images of transionospheric synthetic aperture radars (SAR), caused by the effects of radio wave propagation in the Earth's atmosphere. A method is proposed for calculating the characteristics of images and, in particular, the azimuth resolution of SAR. The results of calculating the potential spatial resolution on radar images are presented, including the influence of the atmosphere.

Keywords: Earth atmosphere, space radar station, synthetic aperture radar, SAR, radar image, azimuth resolution.

Citation: Goryachkin OV. The influence of the Earth's atmosphere on the degradation of the characteristics of images of space radar stations with a synthetic aperture. Computer Optics 2002; 24: 177-182.

References

- [1] Burenin NI. Radar stations with synthetic antenna [In Russian]. Moscow: "Sovetskoe Radio" Publisher; 1972.
- [2] Goriachkin OV, Dusaev SZ, Zheleznov YE, Filimonov AR. Contemporary state and ways of the development of radar space systems of remote sensing of the Earth [In Russian]. Collection of scientific and technical articles on rocket and space topics. Samara: Central Design Bureau Publisher; 1999: 49-56.
- [3] Multifunction online aerospace radar system for obtaining information on the condition of the main environmental objects of the Earth ECORADAR-MC. Draft project, Vol 1: Radar systems for remote sensing of the Earth. Feasibility study of the parameters of the multifunction aerospace radar complex [In Russian]. Kharkiv: "IRE AN USSR" and "GMNP ECORADAR" Publishers; 1991.
- [4] Kretov NV, Ryzhkina TE, Fedorova LV. Effect of the earth's atmosphere on the spatial resolution of space-based synthetic-aperture radars [In Russian]. Radiotekhnika i Elektronika 1992; 1: 90-95.
- [5] Ryzhkina TE, Fedorova LV. The investigation of statistical and spectral characteristics of VHF-UHF transatmospheric signals [In Russian]. Journal of Radioelectronics 2001; 2. Source: <http://jre.cplire.ru/jre/feb01/3/text.html>.
- [6] Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Y., Freeman T. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz //Radio Science (USA) – 1999 – vol. 34 – num.1 – p. 257-268.
- [7] Efimov AI, Kalinkevich AA, Kutuzova BG. Using a P-band synthetic-aperture radar for experiments in space [In Russian]. Radiotekhnika 1998; 2: 19-24.
- [8] Goriachkin OV, Klovisky DD. The some problems of realization spaceborne SAR in P, UHF, VHF bands. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'99) 1999; 2: 1271-1273.
- [9] Goriachkin OV. Estimations of the maximum spatial resolution space-borne VHF-band SAR for adaptive synthetic aperture techniques. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2000) 2000; 1: 93-95.
- [10] Goriachkin OV. Potential spatial resolution of VHF synthetic aperture space radars [In Russian]. Proceedings of the All-Russian scientific conference "Remote sensing of terrestrial cover and atmosphere by aerospace means" 2001: 562-565.
- [11] Goriachkin OV, Klovisky DD. Inverse problems with unknown kernels in microwave remote sensing. Proc World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2000) 2000; 7: 610-615.
- [12] Kravtsov IA, Feizulin ZI, Vinogradov AG. The passage of radio waves through the Earth's atmosphere [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1983.
- [13] Kolosov MA, Armand NA, Yakovlev OI. Propagation of radio waves in space communications [In Russian]. Moscow: "Svyaz" Publisher; 1969.
- [14] Shteinshleiger VB, Dzenkevich AV, Manakov VY, Melnikov LY, Mizezhnikov GS. On the resolution of VHF transionospheric radar for remote sensing of the Earth [In Russian]. Radiotekhnika i Elektronika 1997; 42(6): 725-732.
- [15] Goryachkin OV. Ionospheric effects compensation in spaceborne VHF-band SAR: Blind identification approach. Proceedings of Open Symposium on Propagation and Remote Sensing of URSI Commission F 2002. Source: CD-ROM.
- [16] Goriachkin OV. Imaging in transionospheric low frequency SAR. Proceedings of Forth European Conference on Synthetic Aperture Radar 2002: 485-488.