

# 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);  $\theta, \sigma$  - 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]:

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

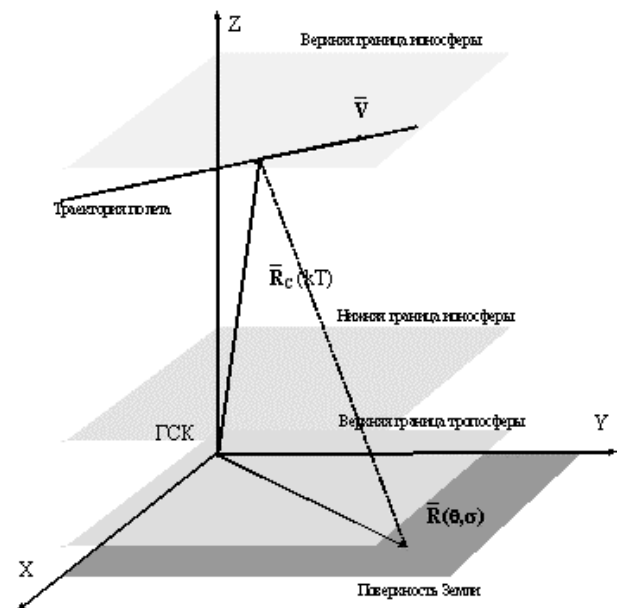


Рис. 1. Геометрия космической РСА.

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,  $\delta N = (0.1...2.5) \cdot 10^{-2}$ ,  $\xi_0$  - 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:

$$\bar{\mathbf{R}}_c(kT) = \begin{bmatrix} 0 \\ V \cdot kT \\ H_n \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{R}}(\theta, \sigma) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{4} \cdot c^2 \cdot \sigma^2 - H_n^2} \\ \theta \cdot V \\ 0 \end{bmatrix},$$

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

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  $\Delta T$ , 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.

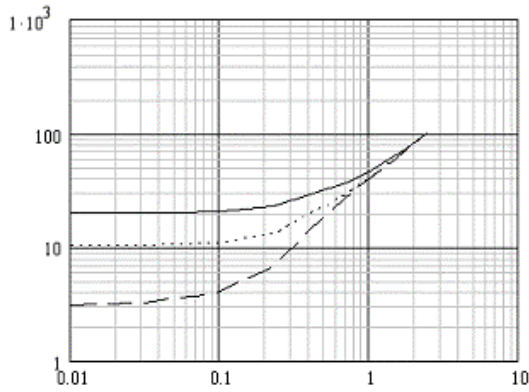


Рис.2. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали),  $H=200\text{км}$ .

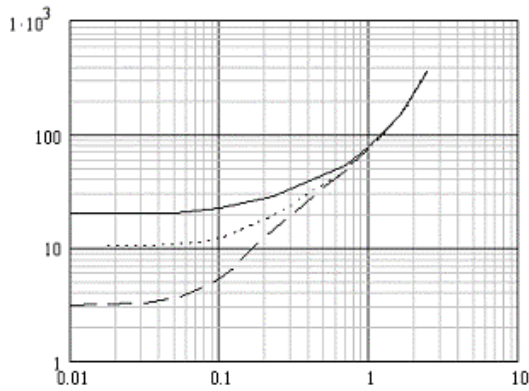


Рис.3. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали),  $H=1000\text{км}$ .

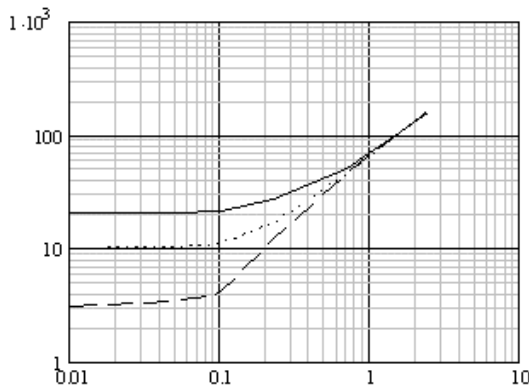


Рис.4. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали),  $H=1000\text{км}$ ,  $C_n^2(0) = 1 \cdot 10^{-8}$ ,  $\delta N = 0.1 \cdot 10^{-2}$ .

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.

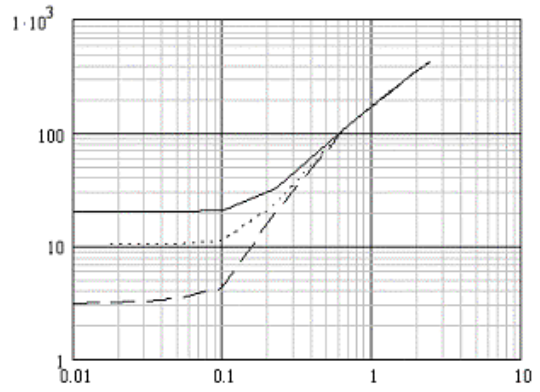


Рис.5. Азимутальное разрешение в метрах (по вертикали) в зависимости от длины волны в метрах (по горизонтали),  $H=1000\text{км}$ ,  $C_n^2(0) = 1 \cdot 10^{-8}$ ,  $\delta N = 0.1 \cdot 10^{-2}$ ,  $\xi_0 = 300\text{м}$ .

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  $\Delta_a$  - 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