

УДК: 629.783

Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры

Занин К.А.

НПО имени С.А. Лавочкина,

ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия

e-mail: pc4a@laspase.ru

Аннотация

В статье предлагается усовершенствованный метод оценки пространственного разрешения радиолокатора с синтезированной апертурой. Для оценки разрешения предложено два вида тестовых объектов с амплитудной и фазовой модуляцией комплексной функции рассеяния. Рассмотрены математические соотношения, определяющие пространственную функцию передачи модуляции амплитуды информационным трактом радиолокатора. Проведен анализ особенностей формирования изображения в радиолокационных комплексах по сравнению с оптико-электронными.

Применение усовершенствованного способа определения пространственной разрешающей способности позволяет связать показатели геометрического и радиометрического качества и учесть случайные ошибки информационного тракта.

Разработанная модель позволяет более обоснованно формировать требования к параметрам радиолокационных космических систем.

Ключевые слова: показатели качества, информационный тракт космического радиолокатора синтезированной апертуры, линейное разрешение на местности, радиолокатор с синтезированной апертурой, радиометрическое разрешение, функция передачи модуляции, качество радиолокационного изображения.

Введение

Важным показателем качества космической радиолокационной системы является пространственная разрешающая способность. В отличие от оптико-электронных комплексов, где имеются общепринятые определения и методики, в радиолокации существуют противоречия в концептуальной формулировке показателей оценки разрешающей способности [1].

Завышенные ожидания качества потребителей радиолокационной информации вступают в противоречия с требованиями технического задания, формулируемыми разработчиком целевой аппаратуры исходя из своих узких интересов. В результате, для обоснованного формулирования требований технического задания необходима разработка методов оценки качества радиолокационного изображения (РЛИ) учитывающих особенности РСА.

Разработчики аппаратуры РСА обычно предлагают оценка разрешения через ширину профиля функций рассеяния (аппаратной функции). Тогда величина предельного геометрического (пространственного) разрешения РСА (в метрах на земной поверхности), определяется как ширина профиля квадрата функции рассеяния точки по уровню -3 дБ (50% энергии) в направлениях азимута или дальности.

Такое определение разрешения упрощает его измерение и сдачу целевой аппаратуры, однако не учитывает целый ряд факторов [2].

Общепринятым способом определения разрешающей способности является оценка способности раздельного воспроизведения изображения двух точечных объектов. При разнесении точек в пространстве посередине между этими точками в изображении возникает локальный минимум интенсивности (провал). Разрешение определяется величиной расстояния, на котором достоверно обнаруживается этот провал:

$$\Delta y = k_p R_g ,$$

Δy - расстояние между точечными объектами (линейное разрешение),

k_p - коэффициент ухудшения разрешения относительно предельного,

R_g - предельная разрешающая способность РСА.

Данное расстояние зависит от контраста наблюдаемого объекта, отношения сигнал-шум и ошибок информационного тракта.

Численная оценка показывает, что в когерентном РСА интерференция сигналов двух источников не позволяет их раздельное наблюдение на расстоянии в 1,6 раз больше полуширины функции рассеяния.

Полученная оценка соответствует случаю ухудшения разрешения несамосветящихся частично-когерентных объектов в микроскопии [3] и фотолитографии в 1,3...1,4 раза. Для полностью когерентных систем существующий критерий Аббе устанавливает 2-х кратное ухудшение разрешения по сравнению с не когерентными.

В работе [4] рассмотрен статистический способ определения разрешения РСА в случае если фаза, отраженная от объекта, случайна и распределена равномерно на интервале от 0 до 2π . Приведенный там коэффициент ухудшения разрешения составляет 1,57 раза.

Дальнейшее ее развитие требует разработки не противоречивой модели показателей качества РЛИ. Основные принципы построения модели информационного тракта РСА предложены в работе [5, 6].

Предлагается метод оценки разрешающей способности способами аналогичными ОЭК, что позволяет провести анализ передачи в РЛИ пространственного распределения амплитуды и фазы тестовых объектов типа гармонической пространственной миры.

1. Модель функции передачи амплитуды радиолокационного изображения

Формирование элемента изображения в РСА происходит путем цифровой обработки сигналов. Изображение суммы точек на РЛИ равно линейной сумме независимых комплексных изображений каждой точки с учетом амплитуды и фазы:

$$\mathbf{A}_{\text{рса}} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_{n-1} + \dots + \mathbf{A}_N,$$

где \mathbf{A}_n - комплексная амплитуда электромагнитной волны изображения точки,

$n = \overline{1, \dots, N}$, N - количество точек изображения.

Модель формирования РЛИ может быть представлена в виде операции линейной свертки:

$$\mathbf{A}(y) = \mathbf{A}_{\text{об}}(y) \otimes \Phi_{\delta}(y), \quad (1)$$

где $\Phi_{\delta}(y) = |\Phi_{\delta}(y)|e^{-i\varphi_{\delta}(y)}$ - комплексная функция рассеяния амплитуды точечного объекта (ФРА), $|\Phi_{\delta}(y)|$ - модуль и $\varphi_{\delta}(y)$ - фаза комплексной амплитуды ;

$\mathbf{A}_{\text{об}}(y) = A_0(y)e^{i\varphi_{\text{об}}(y)}$ - комплексный коэффициент рассеяния поверхности,

$A_0(y) = \sqrt{\sigma_0(y)}$ - комплексная амплитуда;

$\sigma_0(y)$ - коэффициент отражения в ОЭЖ или удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР),

$\varphi_{\text{об}}(y)$ - поворот фазы при отражении.

Комплексная ФРА с учетом ошибок информационного тракта определяется автокорреляционной функцией траекторного сигнала:

$$\Phi_{\delta}(y) = U(x) \otimes O(x - y),$$

где x - пространственная координата траектории синтезирования,

y - пространственная координата объекта,

$U(x)$ - траекторный сигнал РСА от точечного объекта,

$O(x) \approx U^*(x)$ - опорная функция при синтезировании (в идеальном случае комплексно-сопряженный траекторный сигнал).

В случае апертуры прямоугольной формы при отсутствии фазовых ошибок ФРА определяется выражением:

$$\Phi_{\delta}(\xi) = \frac{\sin(\xi)}{\xi},$$

где $\xi = \frac{\pi y}{R_a}$, y - пространственная координата, R_a - расстояние когерентности.

В ОЭК квадрат модуля $|\Phi_{\delta}(\xi)|^2$ принято называть функцией рассеяния точки (ФРТ).

Представление на экране и анализ обычно производится по аналогии с ОЭК в виде интенсивностей (энергии) или по модулю амплитуды:

$$I_{\text{рса}} = |A_{\text{рса}}|^2 \text{ – квадратичный детектор,}$$

$$A_{\text{рса}} = |A_{\text{рса}}| \text{ – амплитудный детектор.} \quad (2)$$

В составе информационного тракта РСА есть нелинейные элементы, например фазовый детектор, формирующий траекторный сигнал. В ОЭК так же имеются нелинейные элементы, например отдельные компоненты оптической системы.

Не смотря на наличие отдельных нелинейных элементов, в силу свойства линейности оператора свертки в целом (1) для анализа качества изображения РСА и ОЭК возможно применять аппарат преобразования Фурье.

2. Функция передачи модуляции в радиолокаторе синтезированной апертуры

Наблюдаемые объекты расположены на фоне подстилающей поверхности. Амплитуда сигналов имеет шумовую составляющую, обусловленную как естественными причинами, так и принципами формирования РЛИ.

Следующим приближением, позволяющим учесть перечисленные выше особенности, является применение функции передачи модуляции амплитуды пространственной частоты. Тестовым объектом для определения разрешения в этом

случае служит решетка с гармоническим или прямоугольным распределением амплитуды по пространственной координате [7].

Удобство использования такого тестового объекта связано со свойствами преобразования Фурье. Свертку (1) можно представить как произведение образов Фурье:

$$\mathbf{S}(\nu) = \mathbf{S}_{об}(\nu)\mathbf{T}(\nu), \quad (3)$$

где ν - пространственная частота.

$\mathbf{S}(\nu) = F\{\mathbf{A}_{об}(y)\}$ - пространственный спектр изображения,

$\mathbf{S}_{об}(\nu) = F\{\mathbf{A}_{об}(y)\}$ - пространственный спектр наблюдаемого объекта,

$\mathbf{T}(\nu) = F\{\Phi_A(y)\}$ - функция передачи модуляции амплитуды (ФПМА),

$\Phi_A(y)$ - функция рассеяния амплитуды;

$F\{ \}$ - преобразование Фурье.

Спектр ФПМА удобно представить в экспоненциальном виде:

$$\mathbf{T}(\nu) = T_A(\nu)e^{-i\varphi_A}, \quad (4)$$

где $T_A(\nu) = |\mathbf{T}(\nu)|$ - модуль передаточной функции и φ_A - фаза передаточной функции.

На рисунке 1 приведены результаты моделирования функции передачи модуляции по амплитуде и фазе для ОЭК и РСА. Заметим, что наклон ФПМА в точке $0,5\nu_{\max}$ зависит от базы сигнала РСА. При увеличении базы ФПМА стремится к ступенчатой функции.

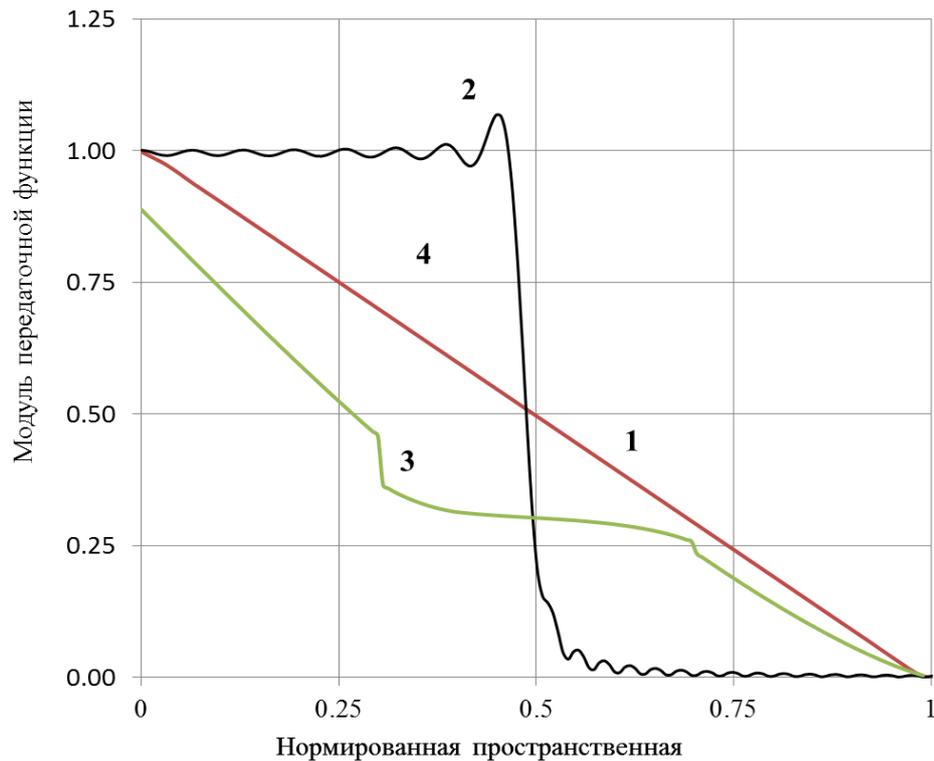


рисунок 1. Модуль передаточной функции:

- 1 - интенсивности в идеальной оптической системе;
- 2 – амплитуды в идеальном РСА;
- 3 – интенсивности в ОЭК с центральным экранированием $\varepsilon = 0,40$.

В отличие от ОЭК передаточную функцию РСА нельзя представить в виде произведения передаточных функций отдельных звеньев. Необходимо вычислять ФРА и ФПМА при помощи математической модели, с учетом ошибок информационного тракта, которые входят в траекторный сигнал и опорную функцию.

Дальнейший качественный анализ удобно провести для двух базовых объектов с гармонической модуляцией:

- 1) переменная амплитуда отражения и постоянная фаза
(амплитудный объект): $A_0(y)$, и $\varphi_{об}(y) = const$;
- 2) переменная амплитуда отражения и постоянная фаза

(фазовый объект): $A_0(y) = const$, и $\varphi_{об}(y)$.

В общем случае сложные объекты имеют амплитуду $A(y)$ и фазу $\varphi(y)$ зависящую от условий наблюдения. С помощью ФРА возможно оценить качество путем анализа пропускания пространственного спектра объекта и подстилающей поверхности. Для решения этой задачи необходимо создать базу эталонных спектров РЛИ типовых объектов и поверхностей.

3. Формирование изображения объекта с гармоническим изменением амплитуды

Рассмотрим примеры тестовых объектов с гармоническим изменением фазы или амплитуды. Стандартным тестовым объектом для анализа качества ОЭЖ является пространственная мира с прямоугольным или гармоническим изменением коэффициента отражения (рисунок 2).

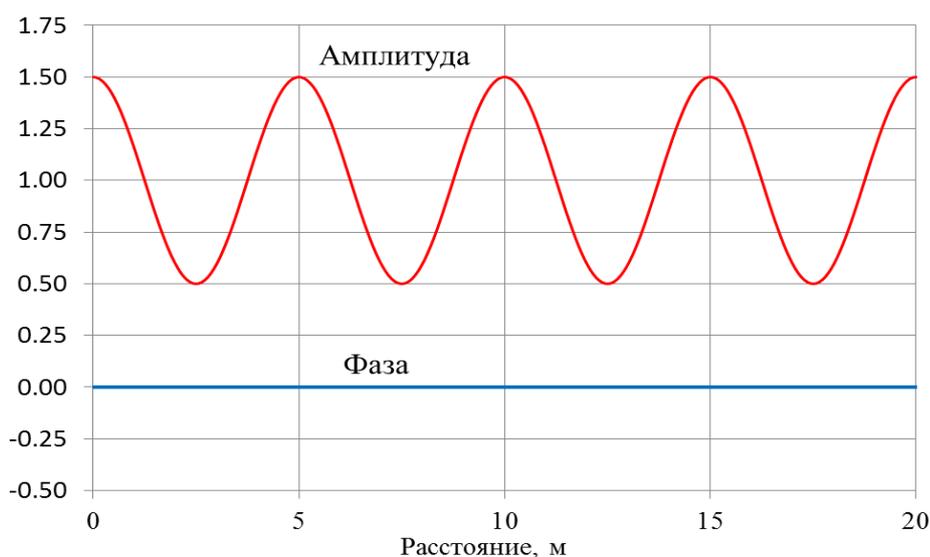


рисунок 2. Тестовый объект с амплитудной модуляцией: $\nu = 0,5\nu_{max}$, $\Delta A = 0,5$, $\Delta\varphi = 0$ и $A_{cp} = 1$.

Рассмотрим комплексную амплитуду:

$$A_0(\nu) = A_{\text{ср}} + \Delta A \cos(2\pi\nu),$$

$$\varphi_{\text{об}}(y) = 0,$$

где $A_{\text{ср}}$ - среднее значение амплитуды, ΔA - амплитуда, $\Delta A \leq A_{\text{ср}}$,

$$\text{Соответственно : } \Delta A = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{min}}}{2} \text{ и } A_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{max}} + A_{\text{min}}}{2},$$

где A_{max} - максимальная амплитуда, A_{min} - минимальная амплитуда,

$\nu = \frac{1}{2y}$ - пространственная частота, определяемая периодом решетки $2y$ с

разрешаемым полупериодом y . Минимально разрешаемая величина полупериода

соответствует пространственному разрешению $y = R_{\text{min}}$. Соответственно

максимальная величина пространственной частоты $\nu_{\text{max}} = \frac{1}{2R_{\text{max}}}$ и диапазон ее

изменения $0 \leq \nu \leq \nu_{\text{max}}$.

Отрицательная пространственная частота не имеет физического смысла, поэтому далее для сохранения энергии сигнала положительные и отрицательные

части спектра суммируются: $\frac{\Delta A}{2} \delta(\nu) + \frac{\Delta A}{2} \delta(-\nu) = \Delta A \delta(\nu)$.

Изображение Фурье амплитуды гармонической решетки по пространственной координате определяется зависимостью (рисунок 3):

$$F(A_{\text{об}}(\nu)) = A_{\text{ср}} \delta(0) + \Delta A \delta(\nu), \quad (5)$$

где $\delta(0)$ - дельта функция на нулевой частоте, $\delta(\nu)$ - дельта функция на частоте пространственной решетки ν . Пространственный спектр (5) амплитудной модуляции имеет одну гармонику на частоте ν (рисунок 3).

Раскрывая выражение (3), получим зависимость модуля амплитуды на изображении решетки от пространственной частоты:

$$|\mathbf{A}(y)| = A_{\text{ср}} + \Delta A T_A(\nu),$$

где $T_A(\nu) = |F\{\Phi_A(\nu)\}|$ функция передачи модуля амплитуды (ФПМА)– преобразование Фурье от функции рассеяния точки.

Перепад амплитуды сигнала на изображении зависит от функции передачи модуляции:

$$\Delta A_{\text{и}} = \Delta A T_A(\nu),$$

где $\Delta A_{\text{и}}$ - измеренный перепад сигнала гармонической решетки.

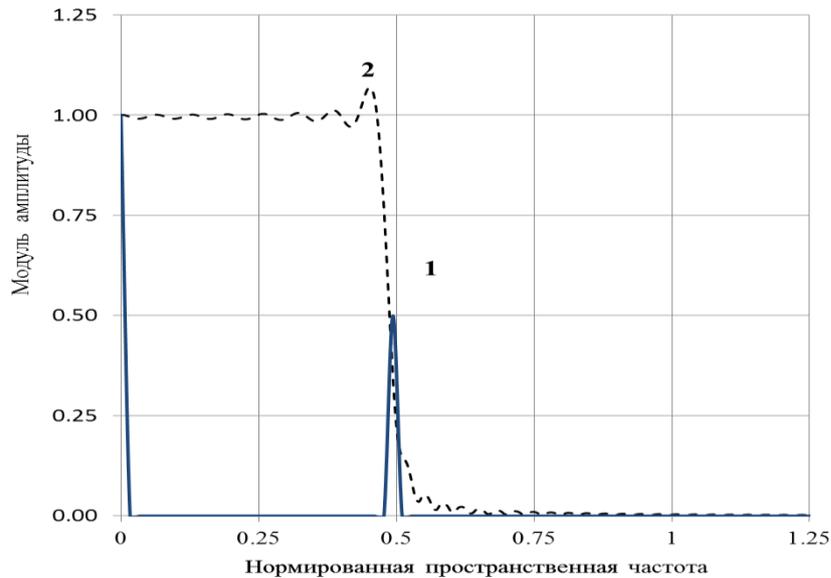


рисунок 3. Пространственный спектр амплитудно-модулированного тестового объекта с частотой $\nu = 0,5\nu_{\max}$, $\Delta A = 0,5$ и $A_{\text{ср}} = 1$:

- 1 – модуль амплитуды пространственного спектра;
- 2 – функция передачи амплитуды РСА.

Для определения разрешающей способности необходимо соотнести $\Delta A_{\text{и}}$ с величиной сигнала эквивалентного шуму $A_{\text{ш}}$. В случае если перепад амплитуды превышает шум на величину, обеспечивающую требуемую вероятность, можно считать что объект успешно разрешается на изображении:

$$\Delta A_{\text{и}} \geq \psi_{\text{тр}} A_{\text{ш}} ,$$

где $A_{\text{ш}}$ - оценка амплитуды шума (например, величина его среднеквадратического отклонения),

$\psi_{\text{тр}}$ - коэффициент превышения сигнала над шумом.

В работе [8] проведен более подробный анализ разрешающей способности для амплитудной решетки на радиолокационном изображении.

4. Формирование изображения объекта с гармоническим изменением фазы

Ряд приложений обработки радиолокационной информации требует обнаружения небольших изменений фазы наблюдаемого объекта [9].

Рассмотрим тестовый объект с гармоническим изменением фазы комплексного сигнала (рисунок 4):

$$\varphi_{об}(y) = \varphi_{ср} + \Delta\varphi \cos(2\pi\nu),$$

$$A_0(\nu) = 1,$$

где $\Delta\varphi$ - амплитуда изменения фазы, $\varphi_{ср}$ - среднее значение фазы.

Пространственное распределение комплексной величины сигнала имеет зависимость:

$$\mathbf{A}_{об} = A_{ср} e^{i\varphi_{ср}} (\cos(\Delta\varphi \cos(2\pi\nu)) + i \sin(\Delta\varphi \cos(2\pi\nu))). \quad (6)$$

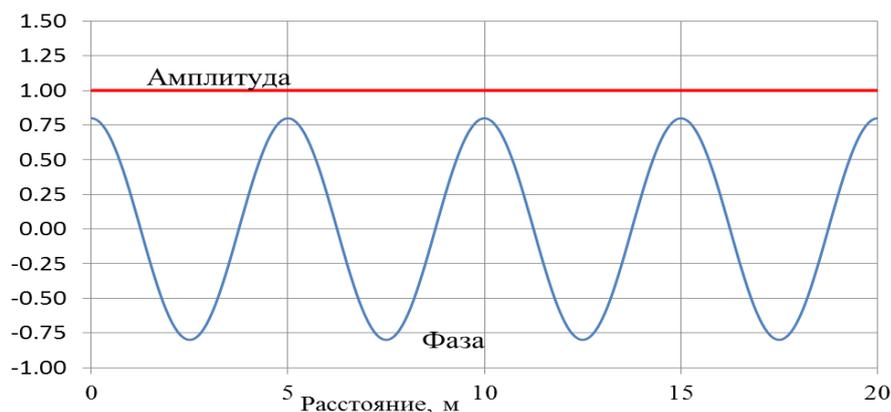


рисунок 4. Тестовый объект с фазовой модуляцией:

$$\nu = 0,5\nu_{\max}, \Delta A = 0, \Delta\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ и } A_{ср} = 1.$$

Предполагая, что $\Delta\varphi \rightarrow 0$, преобразуем выражение (6) с использованием известных тригонометрических соотношений:

$$\mathbf{A}_{об}(\nu) \approx A_{ср} e^{i\varphi_{ср}} \left(\left(1 - \frac{\Delta\varphi^2}{4} + \frac{\Delta\varphi^2}{4} \cos(4\pi\nu) \right) - i(\Delta\varphi \cos(2\pi\nu)) \right). \quad (7)$$

Полученное выражение имеет достаточную точность для $\Delta\varphi \ll \frac{\pi}{4}$.

Преобразование Фурье выражения (7) имеет спектр из трех амплитудных гармоник:

$$S_{об}(\nu) \approx A_0\delta(0) + A_1\delta(\nu) + A_2\delta(2\nu),$$

где $A_0 = A_{ср} \left(1 - \frac{\Delta\varphi^2}{4} \right)$ - гармоника на нулевой частоте;

$A_1 = -iA_0\Delta\varphi$ - гармоника на частоте модуляции $\mp\nu$;

$A_2 = A_{ср} \frac{\Delta\varphi^2}{4}$ - гармоника на двойной частоте $\pm 2\nu$.

Таким образом, случай передачи на РЛИ пространственного гармонического фазомодулированного сигнала с $\Delta\varphi \ll \frac{\pi}{4}$ сводится к анализу амплитудного сигнала из 3-х основных гармоник (рисунок 5).

Перепад фазы, измеренный на РЛИ, определяется приближенным выражением:

$$\Delta\varphi_{и} \approx \arctan \frac{-A_1}{A_0 + A_2} \approx \frac{\Delta\varphi T_A(\nu)}{1 - \frac{\Delta\varphi^2}{4} + \frac{\Delta\varphi^2}{4} T_A(2\nu)}.$$

В типовых случаях, интересующая пространственная частота близка к максимальной $\nu \geq 0,25\nu_{max}$, тогда $2\nu \geq 0,5\nu_{max}$ и пространственная гармоника с

частотой 2ν не передается на изображении в силу малости функции передачи модуляции РСА на двойной частоте $T_A(2\nu) \rightarrow 0$ (рисунок 5).

Упрощенное выражение для оценки измеренной амплитуды фазы при $\Delta\varphi \ll \frac{\pi}{4}$ и $\nu \geq 0,25\nu_{\max}$ имеет вид:

$$\Delta\varphi_{\text{и}} \approx \Delta\varphi T_A(\nu).$$

Для определения разрешающей способности по фазовому углу необходимо сравнить $\Delta\varphi_{\text{и}}$ с величиной сигнала эквивалентного фазовому шуму: $\varphi_{\text{ш}} \approx \frac{A_{\text{ш}}}{A_{\text{ср}}}$.

Таким образом, аналогично амплитуде, передача фазового сигнала без уменьшения модуляции возможна при пространственном разрешении не

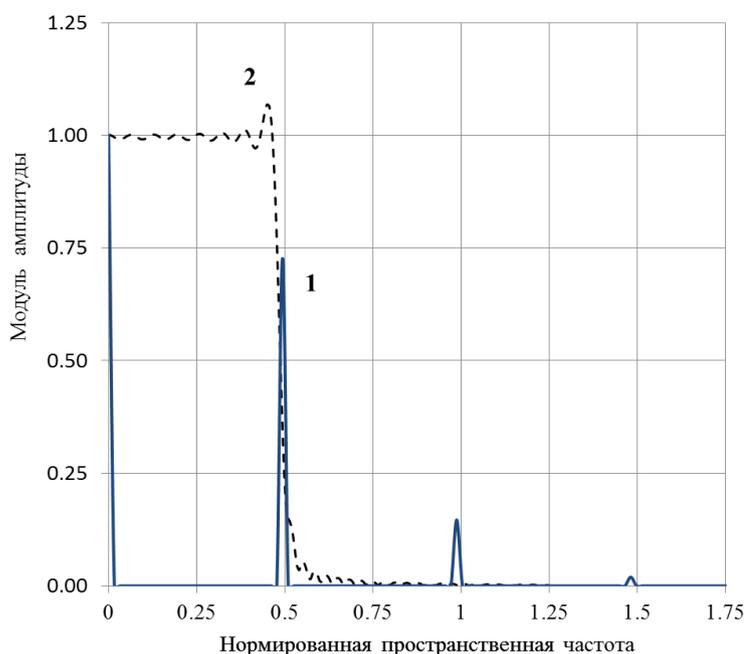


рисунок 5. Пространственный спектр фазо-модулированного тестового объекта с частотой $\nu = 0,5\nu_{\max}$, $\Delta\varphi = \frac{\pi}{4}$ и $A_{\text{ср}} = 1$:

- 1 – модуль амплитуды пространственного спектра;
- 2 – функция передачи амплитуды РСА.

5. Анализ свойств радиолокационного изображения

Вид функции передачи амплитуды РСА позволяет объяснить ряд свойств РЛИ. Для оптических изображений характерным свойством являются масштабируемость по частотно-контрастной характеристике. При увеличении или уменьшении контраста или масштаба просмотра оптического изображения, меняется распознаваемая пространственная частота, на изображении появляются или исчезают мелкие детали. Свойство масштабируемости вызвано линейностью ФПМ ОЭК по пространственной частоте (зависимость 1 и 3 на рисунке 1). Оптико-электронная изображающая система передает контраст изображения пропорционально размеру объекта. Чем больше объект, тем меньше снижается его контраст.

Примеры РЛИ показывают, что свойство масштабируемости для них выражено в гораздо меньшей степени. Характерные визуальные свойства РЛИ обусловлены нелинейностью функции передачи амплитуды (зависимость 2 на рисунке 1).

Радиолокатор синтезированной апертурой строит изображение, в котором амплитудные и фазовые контрасты объектов передаются без изменений до двукратного размера предельного разрешения. В точке $\nu = 0,5\nu_{\max}$ контраст снижается в 2 раза. Далее, при уменьшении наблюдаемого объекта менее двух элементов разрешения, коэффициент передачи контраста резко падает и стремится к нулю.

Соответственно коэффициент ухудшения разрешающей способности k_p на РЛИ при анализаторе с идеальными характеристиками без учета шумов имеет следующие характерные области разрешающей способности:

1) $1,0 \leq k_p \leq 1,6$ для объектов высокого контраста, близкого к абсолютному,

$$K_{об}(\nu) \rightarrow 1 ;$$

2) $1,6 \leq k_p \leq 2,5$ для объектов с ограниченным контрастом $0,2 \leq K_{об}(\nu) \leq 0,8$;

3) $k_p > 2,5$ для слабоконтрастных объектов $K_{об}(\nu) \leq 0,2$.

На рисунках 6 и 7 показано изображение ОЭК и РСА тестового объекта переменной частоты полученное численным моделированием. При увеличении пространственной частоты более 0,5 передача контраста тестового объекта на РЛИ резко ухудшается из за интерференции (рисунок 7).

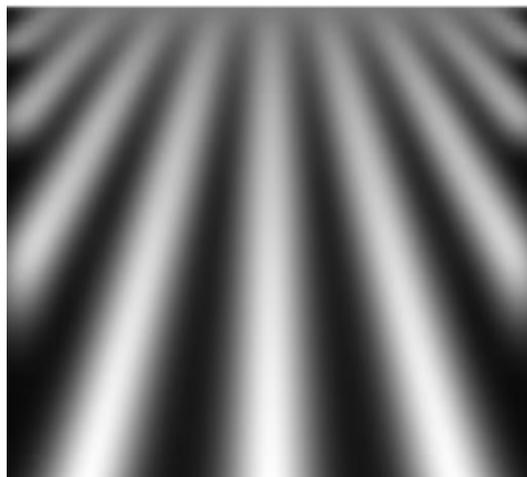


рисунок 6. Изображение тестового объекта переменной частоты в ОЭК.

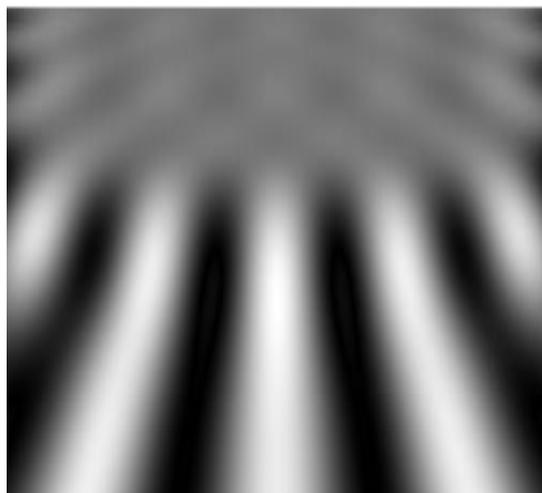


рисунок 7. Изображение тестового объекта переменной частоты в РСА.

Заключение

Предложен усовершенствованный способ определения разрешающей способности космического радиолокатора, учитывающий особенности формирования синтезированной апертуры и случайные ошибки. Предлагаемая модель тестового объекта с гармоническим изменением комплексной амплитуды или фазы отраженного сигнала позволяет связать разрешающую способность РСА с его радиометрическими характеристиками и отражением от подстилающей поверхности.

Получена функция передачи модуляции амплитуды и фазы информационного тракта РСА для гармонических тестовых объектов. Свойства зависимости ФПМА от пространственной частоты позволили объяснить некоторые характерные свойства РЛИ по сравнению с оптическими изображениями.

Показано, что РСА обеспечивает примерно одинаковое пространственное разрешение для амплитудной и фазовой гармонической модуляции функции рассеяния объекта, которое примерно в два раза хуже предельного. Увеличение

контраста объекта до абсолютных значений несколько улучшает разрешение до 1,6 раз. В случае слабоконтрастных объектов модуляция амплитуды передается без искажений, разрешающая способность определяется только реализуемым отношением сигнал-шум с разрешением в 2,5 хуже. Если объект наблюдается на фоне спекл-шума, разрешение РСА падает в 3 и более раз.

Разработанная модель позволяет оценивать разрешающую способность с учетом ошибок информационного тракта РСА различного типа для сложных объектов с известными амплитудно-фазовыми распределениями отраженного сигнала.

Библиографический список

1. Бачманов М.М., Исков Д.А. Решение задачи оценивания детальности радиолокационного изображения объектов расположенных на земной поверхности // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 2(95). С. 117 - 125.
2. Булыгин М.Л., Внотченко С.Л. Построение диаграмм слепых дальностей и надирных отражений радиолокатора с синтезированной апертурой в MATLAB // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62290>.
3. Бахолдин А.В. Оптические микроскопы. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. - 68 с.
4. Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Толстов Е.Ф. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика // Материалы V Всероссийской научной конференции «Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, 26–28 июня 2012, ИПЦ МИ ВлГУ. С. 486 - 490.

5. Занин К.А., Митькин А.С., Москатиныйев И.В. Методические основы моделирования информационного тракта космического радиолокатора синтезированной апертуры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2 (32). С.61-68.
6. Занин К.А. Анализ качества координатной привязки изображений космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 4. С. 34 - 39.
7. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. - 417 с.
8. Занин К.А., Москатиныйев И.В. Совершенствование методов оценки разрешающей способности космического радиолокатора синтезированной апертуры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 3(37) С.3-10.
9. Евграфов А.Е., Поль В.Г. К вопросу космической интерферометрической съемки рельефа земной поверхности радиолокатором синтезированной апертуры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 4. С. 44 - 49.