

О взаимосвязи «инструментальных» характеристик космического РСА с показателями качества радиолокационных изображений земной поверхности

А.И.Коваленко

АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, Alexander.Kovalenko@niitp.ru

Рассмотрен физический смысл определений показателей качества радиолокационных изображений земной поверхности, используемых при проектировании космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (КРСА). Показано, что они сводятся к инструментальным характеристикам КРСА, рассматриваемого как линейный наблюдательный прибор. Описаны связи между инструментальными характеристиками КРСА и показателями качества формируемых радиолокационных изображений конкретного сюжета.

The physical sense of the definition of indicators of quality radar images of the Earth's surface, used in the design of space synthetic aperture radar (SAR). It is shown that they are reduced to instrumental performance SAR, considered as a linear observation device. We describe the relationship between instrumental performance and quality indicators SAR formed radar images of a particular scene.

Космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) представляют собой мощное средство дистанционного зондирования Земли, позволяющее получать содержательную информацию о земной поверхности и объектах, расположенных на ней [1].

Космический РСА является ядром космической системы радиолокационного наблюдения Земли, включающей в себя космический и наземный сегменты.

Космический сегмент представляет собой орбитальную группировку космических аппаратов (КА), оснащенных бортовыми радиолокационными комплексами (БРЛК), с помощью которых осуществляется получение и регистрация радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Космические аппараты оснащены бортовыми средствами временного хранения данных ДЗЗ и передачи ее с КА на наземные приемные пункты либо непосредственно, либо через спутники-ретрансляторы.

Наземный сегмент включает в свой состав распределенный наземный комплекс приема, обработки и распределения (НКПОР) информации ДЗЗ и наземный комплекс управления (НКУ) КА. Основой НКПОР является сеть наземных комплексов приема и обработки информации (НКПОИ), связанная специально создаваемой коммуникационной инфраструктурой с потребителями различного уровня.

В укрупнённом виде состав технических средств сквозного информационного тракта космической радиолокационной системы наблюдения включает в себя:

1. Бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК).
2. Наземные программно-технические средства (НПТС) обработки, визуализации и архивации радиолокационных данных.

Целостность полного технологического цикла получения радиолокационного изображения обеспечивается путем объединения БРЛК и НПТС в единую структурную единицу - радиолокационный комплекс (РЛК).

Наземные программно-технические средства представляют собой набор стандартных вычислительных средств, на которых, помимо программного обеспечения (ПО) общего применения, размещены специализированные программные комплексы

обработки данных и программные средства информационной поддержки (базы данных опорной и эталонной информации, картографическое обеспечение и т. п.).

Сквозная информационная технология радиолокационного наблюдения Земли из космоса реализуется с разделением по времени и включает в себя проведение следующих этапов:

1. Проведение радиолокационной съёмки, результат которой представляет собой цифровой массив зарегистрированных радиолокационных данных (радиоголограмму) (реализуется с помощью бортового когерентного радиолокатора бокового обзора, размещённого на КА).

2. Формирование первичных радиолокационных изображений (РЛИ) (осуществляется на наземных программно-технических средствах посредством многоканальной когерентной обработки радиолокационных данных с учётом параметров движения КА в процессе съёмки).

3. Вторичная обработка радиолокационных изображений (дешифрирование, поляриметрическая обработка, построение интерферограмм, цифровых карт рельефа и др.).

Радиолокационные комплексы дистанционного зондирования Земли космического базирования позволяют формировать весьма широкую номенклатуру конечных информационных продуктов. При этом все они формируются из комплексных радиолокационных изображений (РЛИ); по этой причине РЛИ как вид информационного продукта выделяется из ряда прочих и приобретает характер *канонического* (базового) *информационного продукта РЛК*. Это обстоятельство диктует необходимость следующего уточнения терминологии. В данной работе под *космическим РСА (КРСА)* будем понимать совокупность технических средств, обеспечивающих формирование *радиолокационных изображений*.

Физической основой технологий получения радиолокационных изображений (РЛИ) земной поверхности с помощью КРСА является обобщение принципов импульсной поляриметрической сверхширокополосной радиоголографии на нестационарную геометрию радиолокационного наблюдения Земли из космоса. На первом этапе реализации технологии с борта КА проводится облучение земной поверхности зондирующими радиоимпульсами и регистрация отражённого сигнала (радиоголограммы). На втором этапе формируется комплексное радиолокационное изображение *элемента* земной поверхности, которое является результатом (квази)оптимальной обработки траекторного сигнала точечной цели, расположенной в центре данного элемента. Совокупность таких элементарных комплексных РЛИ представляет собой полное комплексное РЛИ участка местности – *кадр РЛИ*. Таким образом, физическим содержанием этапа формирования кадра РЛИ является многоканальная (квази)оптимальная фильтрация траекторного сигнала точечной цели. При этом, количество каналов обработки (фильтрации) совпадает с количеством элементарных отсчётов в кадре РЛИ, а степень отклонения алгоритма обработки от оптимальной фильтрации определяется особенностями выбранной реализации программного обеспечения в наземных программно-технических средствах обработки радиолокационной информации.

Это обстоятельство позволяет трактовать КРСА как обобщённый физический прибор, обладающий своими специфическими особенностями; соответственно, к нему применимы общие закономерности теории построения физических приборов (инструментов) и методологии их проектирования.

Из общефизических соображений ясно, что чем лучше прибор (КРСА), тем лучше качество формируемых (радиолокационных) изображений. Поэтому, при проектировании КРСА заказчик, как правило, непосредственно задаёт параметры

качества формируемого РЛИ (размеры кадра, разрешающая способность и пр.), которые требуется подтвердить в ходе лётных испытаний, При этом зачастую игнорируется тот факт, что *параметры КРСА* как физического прибора («инструментальные» характеристики) *не идентичны параметрам качества радиолокационного изображения*, зависящих также и от свойств наблюдаемого сюжета.

Указанное обстоятельство дает широкий простор различным интерпретациям и толкованиям полученных результатов радиолокационных съёмок, часто имеющих субъективный характер.

Цель доклада – на основе анализа процесса формирования радиолокационных изображений земной поверхности с помощью КРСА выявить взаимосвязи между «инструментальными» характеристиками КРСА и параметрами качества формируемых радиолокационных изображений.

При правильном выборе параметров бортовой радиолокационной аппаратуры в сеансе съёмки регистрация отражённого сигнала проводится в линейном режиме. Так как процедура обработки также является линейной, то и весь тракт формирования РЛИ может быть описан как линейный фильтр.

Геометрия радиолокационного наблюдения показана на рис. 1, в трёхмерной (рис.1а) и двумерной радиолокационной (рис.2а) (наклонная дальность-азимут) системах координат.

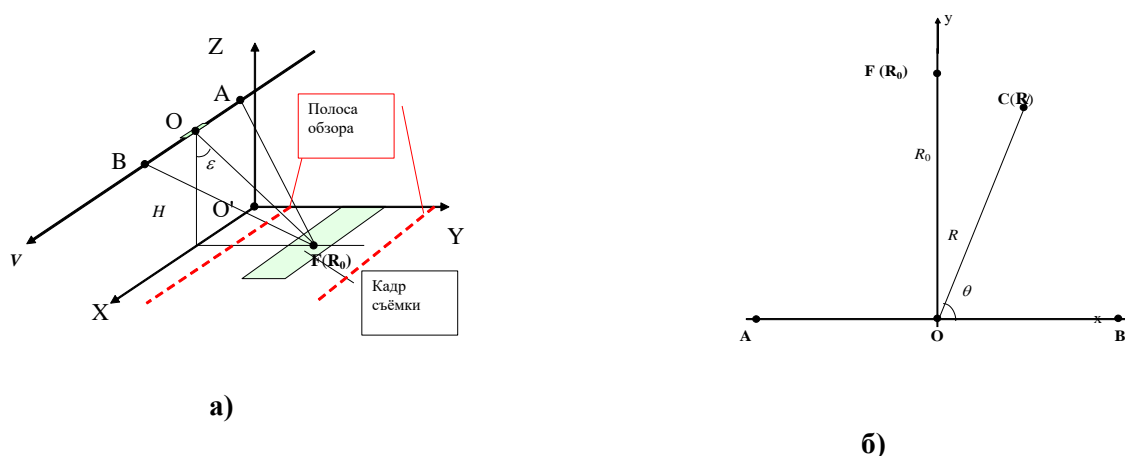


Рис. 1. Геометрия радиолокационного наблюдения
а) в трехмерной системе координат; б) в радиолокационной системе координат
«наклонная дальность/азимут»

Нормированное комплексное радиолокационное изображение изолированной точечной цели с единичным коэффициентом отражения, расположенной в точке земной поверхности C с координатами $\mathbf{R} = (R, \varepsilon, \theta)$, полученное в результате квазиоптимальной фильтрации траекторного сигнала точечной цели F с координатами $\mathbf{R}_0 = (R_0, \varepsilon_0, \theta_0)$, представляет собой функцию импульсного отклика (ФИО) КРСА $\dot{h}(\mathbf{R}; \mathbf{R}_0)$. При этом точку $F(\mathbf{R}_0)$ можно назвать точкой фокусировки синтезированной апертуры, так как именно она определяет параметры согласованного фильтра.

Функция импульсного отклика полностью описывает селективные свойства КРСА, а исследование ее свойств является основным методом определения параметров качества радиолокационного изображения, формируемого РСА в различных режимах наблюдения [1, 2]. Заметим, что в отсутствие направленности антенны радиолокатора, узкополосном зондирующем сигнале, равномерном прямолинейном движении

носителя и реализации процедуры согласованной фильтрации, функция импульсного отклика совпадает с классической функцией неопределённости радиолокационного сигнала $\dot{s}(t)$, записанной в радиолокационных координатах "наклонная дальность-азимут".

Сигнал комплексного радиолокационного изображения $\dot{i}(\mathbf{R}_0)$ в самом общем случае записывается в виде трёхмерного линейного интегрального оператора, ядром которого является функция импульсного отклика РСА:

$$\dot{i}(\mathbf{R}_0) = \iiint_{\mathbf{R}} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \dot{h}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) d^3\mathbf{R}, \quad (1)$$

где $A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$ - амплитудный множитель, учитывающий потери энергии сигнала в тракте распространения и обработки радиолокационного сигнала;

$\dot{\xi}(\mathbf{R})$ - функция коэффициента отражения («сюжет»).

Соотношение (1) записано для общего случая механизма объёмного рассеяния радиолокационного сигнала. Для классических условий применения РСА СВЧ-диапазона, как правило, справедлива модель поверхностного рассеяния; тогда интегральный оператор, а также все функции, входящие в (1), становятся двумерными, а выражение принимает вид:

$$\dot{i}(\mathbf{R}_0) = \iint_{\Omega} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \dot{h}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} \quad (2)$$

где через Ω обозначена двумерная область интегрирования.

Для типовых параметров космических РСА функцию импульсного отклика $\dot{h}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$ можно представить в виде:

$$\dot{h}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = \dot{h}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \quad (3)$$

Первый аргумент функции в правой части соотношения (3) подчеркивает инвариантность ФИО к пространственному сдвигу, а второй – учитывает тот факт, что для различных зон кадра (полосы захвата) КРСА могут изменяться внутренние параметры самой функции \dot{h} , в свою очередь, зависящие от параметров зондирующего сигнала (ширина спектра, период повторения и др.) и параметров его обработки (количество когерентно суммируемых импульсов – "объём синтеза"). Явная зависимость ФИО от аргумента \mathbf{R}_0 является медленной функцией, по сравнению с зависимостью от разностного аргумента.

Физический смысл выделения в (2) отдельного множителя $A(\mathbf{R})$ состоит в учёте неравномерности распределения энергии зондирующего облучения по участку зондируемой поверхности (полю кадра РЛИ). Характер этой неравномерности зависит от режима наблюдения РСА, а также от выбранной версии алгоритма обработки радиолокационной информации (синтеза апертуры).

Например, для режима *телескопического обзора* (прожекторного режима радиолокационной съёмки) можно считать

$$A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \sim G(\varepsilon, \theta) \cdot N(\varepsilon_0) \cdot M(\varepsilon_0) \quad (4)$$

где $G(\varepsilon, \theta)$ -диаграмма направленности антенны по полю (ненормированная) для двукратного распространения волны,

$N(\varepsilon_0)$ - количество когерентно суммируемых импульсов (параметр обработки радиолокационного сигнала),

$M(\varepsilon_0)$ - коэффициент сжатия сложного зондирующего импульса.

Для режима маршрутной (полосовой) съёмки

$$A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \sim G(\varepsilon) \cdot \chi(\varepsilon, \varepsilon_0) \cdot N(\varepsilon_0) \cdot M(\varepsilon_0) \quad (5)$$

где $\chi(\varepsilon, \varepsilon_0)$ - коэффициент «прямоугольности» когерентно суммируемой пачки импульсов (учитывает влияние амплитудной модуляции когерентно суммируемой пачки импульсов траекторного сигнала точечной цели диаграммой направленности антенного устройства РСА).

В реальных условиях радиолокационного наблюдения в формировании отсчёта РЛИ принимают участие аддитивные шумы, к которым относятся шумы приемного устройства, прошедшие через систему обработки РСА, а также внешние шумы, вызванные собственным излучением поверхности Земли (существенны для относительно длинноволновых КРСА). Обозначая комплексную реализацию шумового случайного процесса через \dot{n} , получаем выражение для выходного эффекта РСА (комплексного отсчёта РЛИ) в виде

$$\dot{i}(\mathbf{R}_0) = \iint_{\Omega} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \dot{h}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} + \dot{n} \quad (6)$$

Комплексная функция импульсного отклика $\dot{h}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0)$, определённая для всех \mathbf{R}_0 и \mathbf{R} из поля кадра РЛИ, является наиболее полной характеристикой селективных свойств КРСА при формировании радиолокационных изображений.

Так как целью формирования сигнала РЛИ является оценка коэффициента рассеяния в окрестности точки фокусировки синтезированной апертуры \mathbf{R}_0 , то функция импульсного отклика \dot{h} может быть разбита на полезную ("локальную") и помеховую ("нелокальную") компоненты:

$$\dot{h} = \dot{h}_0 + \tilde{\dot{h}} \quad (7)$$

Разбиение (7) отражает возможность представления функции импульсного отклика \dot{h} в виде

$$\dot{h} = \begin{cases} \dot{h}_0, & \text{в области основного лепестка} \\ \tilde{\dot{h}}, & \text{вне области основного лепестка} \end{cases} \quad (8)$$

При правильном выборе параметров РСА ФИО имеет многолепестковую структуру; при этом полезной компонентой выходного эффекта системы обработки является часть сигнала РЛИ, сформированная в пределах области основного лепестка Ω_0 . Соответственно, (6) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{i}(\mathbf{R}_0) &= \iint_{\Omega} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \dot{h}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} + \dot{n} = \\ &= \iint_{\Omega_0} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} + \iint_{\Omega - \Omega_0} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \tilde{\dot{h}}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} + \dot{n} = (9) \\ &= \dot{i}_0(\mathbf{R}_0) + \tilde{\dot{i}}(\mathbf{R}_0) \end{aligned}$$

Таким образом, выходной эффект системы обработки РСА $\dot{i}(\mathbf{R}_0)$ включает в себя две компоненты: *сигнальную* $\dot{i}_0(\mathbf{R}_0)$ и *помеховую* $\tilde{\dot{i}}(\mathbf{R}_0)$, где мы ввели обозначения

$$\dot{i}_0(\mathbf{R}_0) = \iint_{\Omega_0} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} \quad (10)$$

$$\tilde{\dot{i}}(\mathbf{R}_0) = \iint_{\Omega - \Omega_0} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}) \cdot \tilde{\dot{h}}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} + \dot{n} \quad (11)$$

Первое слагаемое помеховой компоненты (11) иногда называют *мультипликативным шумом* (*мультипликативной помехой*), так как его интенсивность определяется коэффициентом рассеяния $\dot{\xi}(\mathbf{R})$; второе слагаемое – *аддитивный шум*, не зависящий от свойств наблюдаемого радиолокационного «сюжета».

Используя (9)-(11), рассмотрим физическое содержание общепринятых параметров качества радиолокационных изображений (РЛИ), задаваемых при проектировании КРСА.

К таким параметрам относятся:

- разрешение на местности (пространственное разрешение);
- радиометрическая чувствительность;
- радиометрическое разрешение;
- геометрические размеры участка местности, при наблюдении которого сформирован кадр РЛИ (с некоторой долей условности часто используют термин «размеры кадра»).

1. Мерой *пространственного разрешения* служит *ширина отклика РСА на эталонную точечную цель по уровню -3 дБ от максимума* [1,2].

Коэффициент отражения для идеальной точечной цели, расположенной в точке с координатами \mathbf{R}' , принадлежащей области основного лепестка ФИО Ω_0 , записывается в виде

$$\dot{\xi}(\mathbf{R}) = \dot{\xi}'(\mathbf{R}')\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}') \quad (12)$$

Подстановка (12) в (10) даёт выражение для полезной (сигнальной) компоненты РЛИ в этом случае:

$$\dot{i}_0(\mathbf{R}_0) = \iint_{\Omega_0} A(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}'(\mathbf{R}')\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}') \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R} = A(\mathbf{R}', \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}' \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R}' - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \quad (13)$$

Пренебрегая изменением амплитудного множителя $A(\mathbf{R}', \mathbf{R}_0)$ внутри области основного лепестка ФИО Ω_0 , (13) можно переписать в виде:

$$\dot{i}_0(\mathbf{R}_0) = \dot{A}_0 \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R}' - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \quad (14)$$

где \dot{A}_0 - несущественная для дальнейшего изложения константа.

Ширина сечения основного лепестка модуля ФИО $|\dot{h}_0(\mathbf{R}' - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0)|$ по уровню -3 дБ относительно максимума, она же мера пространственного разрешения $\delta\rho(\mathbf{R}_0)$, является функцией точки фокусировки синтезированной апертуры \mathbf{R}_0 . Последнее обстоятельство отражает тот факт, что в различных областях кадра РЛИ ширина основного лепестка ФИО может отличаться за счёт изменения параметров алгоритма обработки радиоголограмм.

При таком определении пространственного разрешения область основного лепестка Ω_0 ФИО, входящая в соотношение (9), ограничена уровнем спада ФИО до уровня -3 дБ от максимума.

Таким образом, из (9) следует, что определение (а, значит и измерение) пространственной разрешающей способности РСА предъявляет следующие требования к условиям радиолокационного наблюдения:

1. Эталонная цель представляет собой точечный объект, размещённый на неотражающем фоне (при этом полностью отсутствует мультипликативная помеха).
2. Уровень аддитивных шумов (тепловой шум приёмника и пр.) пренебрежимо мал по сравнению с сигнальной компонентой.

Для размера элемента разрешения КРСА по сечениям наклонной дальности (δR) и азимуту (путевой дальности) (δx) хорошо известны соотношения

$$\delta R = c/2\Delta F; \quad \delta x = \lambda R_0 / (2V \cdot N \cdot T_{\Pi}) \quad (15)$$

где c - скорость света;

ΔF - ширина спектра зондирующего сигнала;

λ - рабочая длина волны;

R_0 - наклонная дальность до точки фокусировки апертуры (см. рис.1б),

N - количество когерентно суммируемых отсчётов сигнала при синтезе апертуры («объём синтеза»);

T_{Π} - период повторения зондирующих импульсов.

Из (15) видно, что разрешающая способность КРСА полностью определяется параметрами радиолокатора и системы обработки данных ($\Delta F, \lambda, R_0, N, T_{\Pi}$), и, соответственно, является инструментальной характеристикой КРСА.

Применительно к радиолокационному изображению земной поверхности, для которой характерно наличие множества квазиточечных отражающих объектов, разрешающую способность естественно определять по критерию Рэлея, сводящемуся к различению на РЛИ двух разнесённых точечных целей. При этом величина разрешаемого интервала (линейный размер элемента разрешения) зависит от параметров функции импульсного отклика КРСА и фазовых соотношений между коэффициентами рассеяния точечных объектов. Иными словами, разрешающая способность РЛИ земной поверхности может быть определена по известной ФИО (инструментальной характеристики КРСА) и характеристикам наблюдаемого двухточечного радиолокационного сюжета. Данный вопрос достаточно подробно исследован в фундаментальной монографии [3].

Неопределённость фазовых соотношений между точечными отражателями делает прямое применение данного критерия неоднозначным, что вынуждает перейти к статистическому описанию показателя пространственного разрешения (см. например, [4]), при котором зависимость от фазовых свойств наблюдаемого сюжета отсутствует. Соответственно, такой параметр также является инструментальной характеристикой.

2. Радиометрическая чувствительность (шумовой эквивалент УЭПР) определяется как величина удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) фона, при радиолокационном наблюдении которого уровень мощности сигнала в элементе разрешения равен мощности собственных шумов РСА.

В данном определении наблюдаемый фон представляет собой идеализированную однородную отражающую поверхность-распределённую цель, коэффициент отражения $\dot{\xi}(\mathbf{R})$ которой обладает свойством δ -коррелированности («матовая» эталонная цель), т. е.

$$\langle \dot{\xi}(\mathbf{R}_1) \cdot \dot{\xi}^*(\mathbf{R}_2) \rangle = \sigma^0 \cdot \delta(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2) \quad (16)$$

где угловыми скобками обозначена процедура усреднения по реализациям двумерного случайного поля $\dot{\xi}(\mathbf{R}_1)$.

Средняя мощность сигнальной компоненты P_c , в соответствии с (13), запишется в виде:

$$\begin{aligned}
P_c &= \left\langle \left| \dot{u}_0(\mathbf{R}_0) \right|^2 \right\rangle = \\
&= \left\langle \iiint_{\Omega_0} \iiint_{\Omega_0} A(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}(\mathbf{R}_1) \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \cdot A(\mathbf{R}_2, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{\xi}^*(\mathbf{R}_2) \cdot \dot{h}_0^*(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R}_1 d^2\mathbf{R}_2 \right\rangle = \\
&= \iiint_{\Omega_0} \iiint_{\Omega_0} A(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_0) \cdot A(\mathbf{R}_2, \mathbf{R}_0) \cdot \left\langle \dot{\xi}(\mathbf{R}_1) \cdot \dot{\xi}^*(\mathbf{R}_2) \right\rangle \cdot \dot{h}_0(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \cdot \dot{h}_0^*(\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) d^2\mathbf{R}_1 d^2\mathbf{R}_2 = \quad (17) \\
&= \iiint_{\Omega_0} A^2(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \cdot \sigma^0(\mathbf{R}) \left| \dot{h}_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \right|^2 d^2\mathbf{R} \cong A^2(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \cdot \sigma^0 \cdot \iiint_{\Omega_0} \left| \dot{h}_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \right|^2 d^2\mathbf{R} = \\
&= A^2(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \cdot \sigma^0 \cdot \delta S_{\text{эфф}}
\end{aligned}$$

где

$$\delta S_{\text{эфф}} = \iiint_{\Omega_0} \left| \dot{h}_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \right|^2 d^2\mathbf{R} \quad (18)$$

-эффективная площадь элемента разрешения.

Из соотношения (17) и условия

$$P_c = \left\langle \left| \dot{n} \right|^2 \right\rangle \quad (19)$$

шумовой эквивалент УЭПР $\sigma_{ш}^0$ определится как

$$\sigma_{ш}^0 = \frac{\left\langle \left| \dot{n} \right|^2 \right\rangle}{A^2(\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_0) \cdot \sigma^0 \cdot \delta S_{\text{эфф}}} \quad (20)$$

Можно показать, что соотношение (20) может быть преобразовано в вид, непосредственно выводимый из основного уравнения радиолокации:

$$\sigma_{ш}^0(\varepsilon, \varepsilon_0) = \frac{(4\pi)^3 k T_o F_n \Delta F L_{\Sigma} R^4(\varepsilon)}{\lambda^2 P G_0^2 g^2(\varepsilon) M_{\text{эфф}}(\varepsilon_0) N_{\text{эфф}}(\varepsilon_0) \delta S_{\text{эфф}}} \quad (21)$$

где P - импульсная мощность передатчика;

G_0 - коэффициент усиления антенны;

$g(\varepsilon)$ - нормированная ДН антенны по мощности;

$M_{\text{эфф}}$ - эффективный коэффициент сжатия сложного сигнала;

$N_{\text{эфф}}$ - эффективное количество когерентно суммируемых отсчётов траекторного сигнала («объём синтеза»);

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°К - постоянная Больцмана;

$T_o = 290$ К - опорная температура;

F_n - коэффициент шума приёмника;

ΔF - ширина спектра зондирующего сигнала;

L_{Σ} - суммарные потери в системе;

$R(\varepsilon)$ - наклонная дальность.

Эффективная площадь элемента разрешения $\delta S_{\text{эфф}}$, в соответствии с соотношениями (15), является функцией параметров радиолокатора ($\Delta F, \lambda, R_0, N, T_{\Pi}$).

Тогда из (21) непосредственно следует, что и радиометрическая чувствительность КРСА полностью определяется параметрами радиолокационной аппаратуры и системы обработки радиолокатора ($\Delta F, \lambda, R_0, M_{\text{эфф}}, N_{\text{эфф}}, F_n, L_{\Sigma}, G_0, \delta S_{\text{эфф}}$).

3. Радиометрическое разрешение R_r - способность различения на конечном РЛИ двух участков фона, отличающихся значениями удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР).

Известно несколько определений величины R_r [5], большинство из которых основывается на дисперсии условной плотности вероятности, описывающей мощность отраженного от поверхностно-распределённой цели (ПРЦ) (т.е. от фона).

Физический смысл наиболее распространенного определения сводится к следующему. Пусть рассматривается задача обнаружения сигнала, отраженного от ПРЦ и имеющего среднюю мощность P_c , на фоне тепловых шумов со средней мощностью $P_n = \langle |\dot{n}|^2 \rangle$. При этом коэффициент некогерентного накопления отсчетов радиолокационного изображения N_n достаточно велик (например, $N_n \geq 16$), так что функции условной плотности вероятности мощности сигнала, которые соответствуют гамма-распределению, достаточно близки по форме к нормальному закону. Тогда, в качестве меры точности, с которой сигнал от ПРЦ выделяется на фоне шума можно использовать среднеквадратическое отклонение σ_{c+n} , отнесенное к математическому ожиданию мощности. Соответствующее определение радиометрического разрешения имеет вид [6]

$$R_r = 10 \cdot \lg(1+V) \quad (22)$$

где V – вариационный коэффициент, равный отношению среднеквадратического отклонения (с.к.о.) к среднему значению случайной мощности.

Учитывая, что для плотности вероятности условного гамма-распределения суммы тепловых шумов и сигнала фона $P = P_c + P_n$

$$w(x|P) = \frac{x^{N_n-1} (P)^{-N_n} e^{-x/P}}{\Gamma(N_n)} \quad (23)$$

с.к.о. равно $\sigma_{c+n} = (P_c + P_n) \cdot \sqrt{N_n}$, а среднее значение $(P_c + P_n) \cdot N_n$, нетрудно получить определение радиометрического разрешения в виде

$$R_r = 10 \cdot \lg\left(1 + 1/\sqrt{N_n}\right) \quad (24)$$

Данное определение не содержит характеристик фоно-целевой обстановки, и, соответственно, является инструментальной характеристикой РСА.

Определение (24) справедливо при больших отношениях сигнал/шум $q = P_c/P_n$. Когда значение q невелико, приходится использовать несмещенную оценку, т.е. вместо среднего $(P_c + P_n) \cdot N_n$ в вариационный коэффициент V подставлять среднюю мощность отражений от ПРЦ $P_c \cdot N_n$. При этом радиометрическое разрешение записывается в виде

$$R_r = 10 \cdot \lg\left(1 + (1+1/q)/\sqrt{N_n}\right) \quad (25)$$

и зависит от значения УЭПР наблюдаемой поверхности.

Если в (23) учитывается только аддитивный шум, то

$$q = \frac{\langle |\dot{i}_0(\mathbf{R}_0)|^2 \rangle}{\langle |\dot{n}|^2 \rangle} \quad (24)$$

В общем случае, при учёте мультипликативного шума, в соответствии с (10)-(11),

$$q = \frac{\langle |\dot{i}_0(\mathbf{R}_0)|^2 \rangle}{\langle |\tilde{i}(\mathbf{R}_0)|^2 \rangle} \quad (25)$$

В обоих случаях радиометрическое разрешение зависит от значения УЭПР наблюдаемого фона и поэтому (25) может служить мерой радиометрического разрешения радиолокационного изображения земной поверхности.

Инструментальное радиометрическое разрешение (24) полностью определяется характеристиками радиолокационной аппаратуры и системы обработки РСА (N_n).

Из (24)-(25) легко видеть, что радиометрическое разрешение радиолокационного изображения может быть вычислено по известной инструментальной характеристике и заданных свойствах сюжета радиолокационного наблюдения (УЭПР).

4. Геометрические размеры наблюдаемого участка местности (размеры кадра радиолокационного изображения) определяются из условия нахождения рассмотренных выше параметров (пространственного и радиометрического разрешения, радиометрической чувствительности) в заданных пределах для любого положения точки фокусировки синтезированной апертуры R_0 в поле кадра РЛИ.

Соответственно, размеры кадра также определяются параметрами радиолокационной аппаратуры, геометрии радиолокационного наблюдения и системы обработки сигнала и поэтому являются инструментальной характеристикой РСА.

Из изложенного следует практически важные **выводы**:

1. Основные характеристики качества радиолокационного изображения (пространственная и радиометрическая разрешающая способность, радиометрическая чувствительность), задаваемые при проектировании КРСА, могут быть проинтерпретированы как «инструментальные» характеристики КРСА, рассматриваемого в качестве линейного наблюдательного прибора.

2. Рассмотренный набор инструментальных характеристик является базовым для организации процесса проектирования КРСА. Соответствующие параметры качества радиолокационных изображений конкретных объектов наблюдения могут быть определены по известным инструментальным характеристикам РСА и заданным параметрам радиолокационного сюжета с помощью соотношений стандартной теории линейных систем.

Автор выражает благодарность С. Л. Внотченко за плодотворные дискуссии и полезные замечания.

Литература

1. В.С. Верба., Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук Радиолокационные системы землеобзора космического базирования, 2010.
2. Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов. Радиовидение. Радиолокационные системы зондирования Земли. М., "Радиотехника, 2005
3. A. W. Rihaczek, S. J. Hershkowitz. Radar Resolution and Complex-Image Analysis. Artech House, Inc. 1996
4. Т.А.Лепёхина, В.И.Николаев, Е.Ф.Толстов. Определение пространственного разрешения космических РСА методом импульсного отклика. II Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26-28 июня 2012 г.) – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012
5. V.S. Frost. Probability of error and radiometric resolution for target discrimination in radar images. - IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 1984, 22, № 2, pp. 121-124.1.
6. G. Levriani, S. Barbarossa, G. Picardi The sensitivity problem in the synthetic aperture radar (SAR).- Alta freq., 1986, 55, № 6, pp. 337-348. См. также: Экспресс-информация. Радиотехника СВЧ. 1988, N 3, с.1-10