

УДК 621.396.967

Д.П. Пашков¹, С.В. Домнин²¹Национальный университет обороны Украины, Киев²Центр контроля космического пространства, Евпатория

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Представлена методика повышения качества радиолокационного изображения (РЛИ) космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Качество формируемого РЛИ радиолокационной станцией бокового обзора с синтезированием апертуры антенны (РСА) зависит от компенсации влияния воздействующих факторов. С этой целью предлагается комплексный подход учёта воздействий и влияющих факторов на функционирование РСА.

Ключевые слова: радиолокационное изображение, радиолокационная станция с синтезированием апертуры, шумы, компенсация.

Введение

При решении ряда как навигационных задач, так и задач картографии земной поверхности всё большее применение находит информация ДЗЗ, получаемая с помощью космических систем (КС). Космические методы обеспечивают определение точного географического положения изучаемых объектов и получение их качественных характеристик [1]. В настоящее время идет активное развитие рынка данных ДЗЗ в различных направлениях. Неуклонно возрастает интерес к возможности получения нужной информации требуемого качества с помощью КС ДЗЗ оснащённых РСА. Однако, для успешного решения множества прикладных задач, в том числе навигации и картографии, необходимо обеспечить получение радиолокационного изображения требуемого (высокого) качества.

Анализ литературы. Анализ литературы [1, 2] показал, что качество РЛИ зависит от множества факторов, которые хорошо изучены в теории радиолокации, но проблема получения высококачественного изображения остаётся актуальной [3]. В связи с этим, необходим дальнейший поиск путей и средств улучшения РЛИ, получаемых при помощи РСА в КС ДЗЗ.

Целью статьи является разработка методики повышения качества РЛИ в КС ДЗЗ на основе комплексного подхода к учёту воздействий, влияющих на функционирование РСА.

Изложение основного материала

При разработке методики повышения качества РЛИ прежде всего следует уделить внимание характеристикам РСА, которые зависят от построения сканируемого изображения. Такими характеристиками являются разрешающая способность и динамический диапазон изображения. Эти характеристики определяют качество РЛИ при картографировании. Кроме того, разрешающая способность в значительной степени определяет эффективность решения задач обнаружения малоразмерных объектов, распознавания

групповых и сосредоточенных объектов, а также определения их координат и сопровождения [3].

Разрешающая способность оценивается той минимальной разницей в параметрах сигналов, при которой возможны уверенное раздельное обнаружение сигналов и оценка их параметров. Применительно к системам извлечения информации разрешающая способность количественно оценивается минимальной разницей в координатах или скоростях целей, позволяющей уверенно и раздельно обнаруживать объекты и измерять их координаты [4]. Количественной мерой разрешения является размер изображения точечного объекта на определенном уровне, обычно на уровне – 3 дБ от максимума, что соответствует уровню 0,5 по интенсивности изображения [4]. При оценке разрешающей способности необходимо устранить влияние искажения формы изображения, обусловленного ограничением сигнала и наличием шумов. Поэтому эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта выбирается таким образом, чтобы сигнал изображения находился в линейной части амплитудной характеристики выходного устройства. Предварительная оценка разрешения выполняется на основе известных технических параметров РСА. Разрешение по горизонтальной дальности (земной поверхности) δD

$$\delta D = \frac{\delta r}{\cos \alpha} \cong \frac{c\tau_{\text{и}}}{2k_{\text{сж}} \cos \alpha}, \quad (1)$$

где δr – разрешение по наклонной дальности; α – угол между направлением наблюдения и земной поверхностью; $\tau_{\text{и}}$ – длительность зондирующего импульсного сигнала; $k_{\text{сж}}$ – коэффициент сжатия импульса при обработке.

Так, например, если $\tau_{\text{и}}=0,5$ мкс; $k_{\text{сж}}=13$; $\cos \alpha=0,96$, то $\delta D=6\text{м}$ [3].

Разрешение по угловой координате на земной поверхности (по азимуту) при боковом обзоре

$$\delta \ell = \frac{\lambda R_{\text{н}}}{2VT_{\text{с}} \sin \theta_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны; R_H – наклонная дальность до цели; T_c – время синтезирования; V – скорость носителя; θ_H – угол наблюдения относительно вектора путевой скорости. Например, если $\lambda = 3$ см; $R_H = 160$ км; $V = 200$ м/с; $T_c = 4$ с; $\theta_H = 30^\circ$, то $\delta\ell = 6$ м [3].

Кроме технических характеристик РСА, разрешающая способность зависит также от весовой функции при обработке сигнала и фазовых искажений сигнала, прежде всего обусловленных траекторными нестабильностями. В случае использования, например, весовой функции Хемминга разрешение ухудшается по сравнению с (1) и (2) в 1,3 раза. Обычно траекторные нестабильности считаются скомпенсированными.

Следует помнить, что наряду с разрешающей способностью, качество РЛИ определяется также динамическим диапазоном, характеризующим возможность правильной передачи на изображении отражающих свойств различных объектов и оценивается интервалом ЭПР одновременно наблюдаемых объектов. При этом, точность оценки ЭПР объектов в пределах динамического диапазона определяется радиометрическим разрешением. Под радиометрическим разрешением РЛИ будем понимать минимальную величину различия ЭПР двух объектов. Чем выше радиометрическое разрешение, тем меньшую разницу между двумя значениями ЭПР объектов можно оценивать. Величина радиометрического разрешения зависит от отношения сигнал/шум и числа некогерентных накоплений N_H (рис. 1).

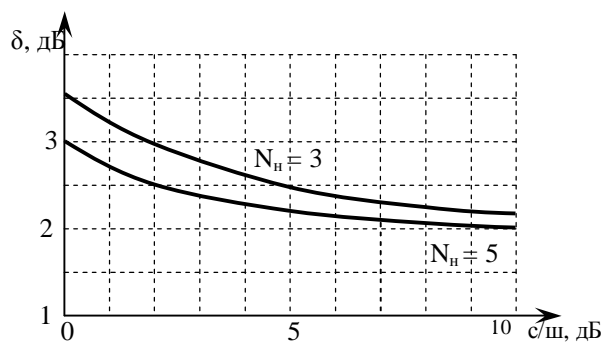


Рис. 1. Графики зависимости радиометрического разрешения РЛИ от отношения сигнал/шум

Чаще всего радиометрическое разрешение РСА лежит в пределах 2 – 3 дБ, но для оценки ЭПР однородных поверхностных объектов требования к радиометрическому разрешению возрастают до 1 дБ. Таким образом, динамический диапазон изображения определяется

- характеристиками объектов (функцией отражения) и их взаимным расположением;
- свойствами РСА: функцией неопределенности (ФН), амплитудной характеристикой всего тракта РСА, воздействием помех и шумов.

При этом, динамический диапазон РСА на выходе системы обработки равен отношению макси-

мальной мощности сигнала при его ограничении $P_{огр}$ к мощности минимального сигнала $P_{мин}$

$$ДД = \frac{P_{огр}}{P_{мин}}. \quad (3)$$

Предположив, что мощность всех шумов меньше минимальной мощности сигнала фона, можно считать, что минимальная мощность сигнала определяется разрешением на местности и мощностью сигнала фона, которая пропорциональна минимальной удельной ЭПР фона $\sigma_{0мин}$:

$$P_{мин} = \delta\gamma \delta\ell \sigma_{0мин}, \quad (4)$$

Уровень ограничения мощности сигнала $P_{огр}$ определяется числом разрядов аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) при условии минимизации уровня шумов в нем. Так, для 4-разрядного АЦП оптимальный уровень ограничения устанавливается на 8 дБ больше среднего уровня сигнала $P_{ср}$. При этом относительная мощность шума АЦП $D_{ашп} = P_{ашп}/P_{ср} = -19$ дБ. Для 6-разрядного АЦП соответственно $P_{огр} = 10P_{ср}$ и $D_{ашп} = -30$ дБ. Среднее значение сигнала $P_{ср}$ определяется суммарным сигналом на входе АЦП от всей полосы по дальности в пределах ширины диаграммы направленности (ДН) антенны

$$P_{ср} = \frac{\sigma\tau_H}{2} \theta_0 R_H \sigma_{0ср}, \quad (5)$$

где τ_H – длительность зондирующего сигнала до сжатия, если обработка по задержке (сжатие по дальности) производится после АЦП; θ_0 – ширина ДН; R_H – дальность наблюдения; $\sigma_{0ср}$ – среднее значение удельной ЭПР в полоске дальности, которое зависит от конкретного района наблюдения и обычно равно $-20... -25$ дБ [3].

При построении РСА обычно стараются обеспечить мощность шума приемника на 1...3 дБ меньше минимальной мощности сигнала фона, а мощность шума процессора еще на 3 дБ меньше. Наибольший вклад в ограничение динамического диапазона изображения вносят шумы, обусловленные отражениями от дождя и организованными помехами. Но в общем случае, динамический диапазон отраженных от сканируемой поверхности сигналов, формирующих РЛИ, находится в весьма широких пределах. Такой диапазон изменений яркости не способны воспроизвести существующие в настоящее время средства отображения (электронно-лучевая трубка 10...20 дБ, фотоплёнка до 20 дБ, фотобумага 30 дБ и т.д.). Не воспринимается он и зрительным анализатором оператора [5]. Возникает необходимость согласования динамического диапазона сигнала РЛИ с возможностями системы отображения и оператора.

Вынужденное уменьшение динамического диапазона, вызванное ограниченными возможностями системы отображения вовсе не означает, что не следует стремиться к расширению динамического диапазона всего тракта РСА. Для успешного решения множества прикладных задач просто необходимо

чтобы формируемые РЛИ сигналы РСА охватывали весь диапазон изменений удельной отражающей поверхности с учетом изменений эффективной отражающей поверхности участка сканирования или корректно отображали какую-либо крайнюю область этого диапазона. Поскольку основное ограничение динамического диапазона РЛИ обычно определяется индикаторным устройством, имеет смысл отображать на нём лишь часть динамического диапазона всех объектов в зависимости от решаемой тактической задачи. Так, при наблюдении объектов с малой ЭПР (фон местности, малоразмерные объекты) индикатор ограничивает амплитуды сигналов объекта с большей ЭПР. При наблюдении объектов с большой ЭПР (корабли, городские постройки) на линейный участок амплитудной характеристики индикатора выносятся только сигналы большой амплитуды. Кроме того, в некоторых случаях, когда требуется отображение всего диапазона вариаций яркостных изменений элементов разрешения, эта проблема может быть решена согласованием (компрессией) динамического диапазона РЛИ. С этой целью, в качестве нижнего уровня сигнала цифровой системы индикации информации (ЦСИ) можно использовать уровень сигнала РЛИ, соответствующий наиболее слабо отражающей поверхности. Сигнал РЛИ, соответствующий средней интенсивности отражений, привести в соответствие середине динамического диапазона сигнала ЦСИ. При этом могут возникнуть ограничения по яркости в изображении радиоконтрастных объектов, что будет затруднять их визуальное обнаружение на фоне земной поверхности по РЛИ. Однако задача обнаружения таких объектов может быть решена автоматически по сигналу РЛИ до вывода изображения на экран ЦСИ [6]. При этом, динамический диапазон сигналов, поступающих на вход РСА будет

$$ДД_{вх} = \sigma_{ц\ макс} / \sigma_{ц\ мин}, \quad (6)$$

где $\sigma_{ц\ макс}$ – максимальная ЭПР объекта; $\sigma_{ц\ мин}$ – минимальная ЭПР объекта.

При высоком разрешении динамический диапазон может достигать 60...70 дБ. Например, при разрешении $\delta r = \delta \ell = 1$ м, $\sigma_{ц\ макс} = 10^3$ м² (угловый отражатель), $\sigma_{ц\ мин} = 10^{-4}$ м² (элемент фона типа водная поверхность) $ДД_{вх} = 70$ дБ. Динамический диапазон при наблюдении городских построек достигает 60 дБ. В метровом (дециметровом) диапазоне динамический диапазон может достигать 80 дБ, что объясняется наличием мощных излучений различного рода передатчиков в этом диапазоне.

В тоже время, выходной динамический диапазон РСА землеобзора при изображении одиночных объектов обычно не превышает 40...50 дБ. Для близкорасположенных друг к другу точечных объектов он определяется уровнем первых боковых лепестков ФН РСА и обычно не превышает 30...40 дБ. Отрицательный контраст, например изображение дороги в лесу, определяется уровнем суммарной мощности всех боковых лепестков (интегральным уровнем) и обыч-

но не превышает 15...20 дБ. В реальных системах уровень боковых лепестков определяется также большим числом других факторов: нестабильностями траектории, среды распространения, приемопередающего тракта и системы обработки, влиянием неоднозначности ФН по азимуту и дальности, конечной разрядностью вычислений в процессорах и т.п. При этом максимальный уровень боковых лепестков повышается до -30...-35 дБ, а интегральный уровень может достигать -15...-20 дБ [3]. Все эти факторы приводят к быстрым (некоррелированным от одного периода повторения к другому) колебаниям фазы траекторного сигнала, что неминуемо ведёт к повышению интегрального уровня боковых лепестков ФН и, как следствие, – к сужению динамического диапазона и снижению контрастности изображения.

Таким образом, становится очевидным несоответствие динамического диапазона, который может обеспечить РСА, реальному динамическому диапазону отражённых сигналов сканируемой поверхности. В связи с этим проблема дальнейшего совершенствования РСА в направлении расширения динамического диапазона и снижения уровня воздействия помех остаётся актуальной и сейчас.

Недостаточный динамический диапазон может привести к появлению ложных отметок на изображении. Основными причинами этого является низкий уровень подавления пиков неоднозначности по азимуту и дальности, а также значительный уровень боковых лепестков выходного сигнала при наблюдении мощных отражателей на слабоотражающем фоне. Примером этого может быть появление ложных отметок береговой черты на фоне изображения морской поверхности или серии отметок боковых лепестков по азимуту и дальности («крест») вблизи изображения точечной цели с большой ЭПР. Вторичные изображения мощных отражателей на слабоотражающем фоне («горы - море») могут быть «размазаны» путем введения специального «квазислучайного» кодирования начальной фазы излучаемого и соответственно опорного сигналов в каждом периоде повторения. Важным параметром, также определяющим качество передачи отражающих свойств объекта, является степень постоянства амплитудных характеристик тракта РСА по всему изображению. Различие амплитудных характеристик приводит к появлению на изображении полос в виде изменения интенсивности сигналов. Причиной этого являются ошибки управления ДН антенны, неточность компенсации спада коэффициента усиления на краях ДН антенны и изменения мощности отраженного сигнала по дальности, ошибки стыковки соседних кадров и т.п. Обычно допускается нестабильность интенсивности изображения («полосатость») порядка 1 дБ [3].

Поскольку важнейшими характеристиками РСА, определяющими качество РЛИ, являются: разрешающая способность по дальности и азимуту, а также динамический диапазон, данная методика повышения качества изображения предполагает комплексный подход к улучшению этих характеристик.

Разрешающая способность определяет детальность РЛИ и зависит от различных факторов. Из выражения (1) следует, что разрешение по дальности определяется длительностью импульса $\tau_{\text{и}}$ и коэффициентом сжатия $k_{\text{сж}}$. В связи с этим, для улучшения разрешающей способности по дальности предлагается использовать зондирующие импульсы малой длительности с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Следует учесть, что уменьшение длительности импульса приводит к понижению энергии сигнала. Из (5) видно, что мощность сигнала прямо пропорциональна его длительности. Корректное применение в РСА адаптивного компенсатора помех (АКП) дает возможность возместить понижение мощности зондирующего сигнала из-за сокращения его длительности и обеспечить уверенное его обнаружение на фоне шумов. Также необходимо отметить, что применение АКП позволяет существенно увеличить отношение сигнал-шум и повысить помехозащищенность РСА. Особенно это важно в связи с тем фактом, что согласно (4), улучшение разрешающей способности приводит к понижению уровня минимальной мощности сигнала, отраженного элементом разрешения. Известно, что отношение сигнал-шум для РСА пропорционально размерам элемента разрешения по дальности и не зависит от размеров разрешения по азимуту, обратно пропорционально дальности в третьей степени, длине волны и скорости полета носителя [7]. Принимая во внимание, предусмотренное данной методикой улучшение разрешения по дальности применением зондирующих ЛЧМ-импульсов малой длительности и связанное с этим понижение отношения сигнал-шум, без принятия специальных мер по компенсации шумов и помех невозможно обеспечить формирование качественного РЛИ. Поэтому необходимо применение адаптивного компенсатора помех в РСА для улучшения качества приема радиолокационного сигнала.

Продолжая рассуждения, отметим что, разрешающая способность по азимуту зависит от интервала синтезирования, дальности и угла наблюдения. Общеизвестная зависимость разрешающей способности от длины волны в данной методике не рассматривается, поскольку предполагается, что РСА работает в заданном частотном диапазоне.

Из формулы (2) следует, что для обеспечения высокого разрешения по угловой координате (азимуту) необходимо обеспечить достаточно большую протяженность интервала синтезирования апертуры антенны. Для обеспечения синфазного сложения сигналов в процессе синтезирования апертуры необходимо, чтобы сигналы были когерентными. Когерентность сигнала обеспечивается априорным знанием структуры сигнала. Для синфазного сложения требуется точное знание фазы траекторного сигнала. В антенных системах считается допустимой максимальной ошибкой положения точек апертуры относительно заданного порядка $\lambda/8$, что соответствует

ошибке фазы $\pi/4$. Максимальная длина L_m отрезка пути космического аппарата (КА) ДЗЗ, на котором принимается отраженный сигнал, ограничивается лишь шириной ДН антенны РСА [6]. Если максимальную длину ограничить шириной ДН на уровне 3 дБ, то

$$L_m \approx 2 r_0 \operatorname{tg}(\theta_0/2), \quad (7)$$

где r_0 – расстояние между КА ДЗЗ и целью при $t=0$; θ_0 – ширина ДН реальной антенны РСА на уровне 3 дБ по азимуту (рис. 2).

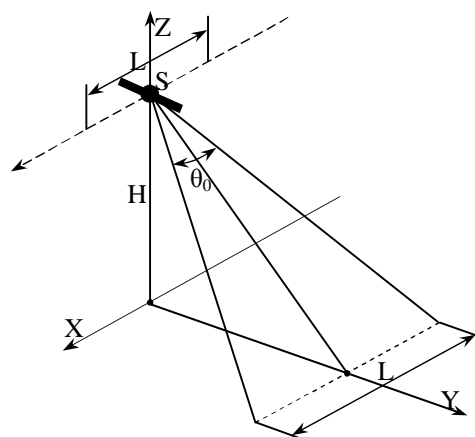


Рис. 2. Длина интервала синтезирования апертуры антенны КА ДЗЗ

Картографирование земной поверхности осуществляется РСА, чаще всего проводится в сантиметровом диапазоне волн. В этом диапазоне волн $L_m \approx r_0 \theta_0$, поскольку ширина ДН антенн сантиметровых РСА обычно составляет единицы градусов. Следует отметить, что даже в сантиметровом диапазоне волн, где длина пути L_m довольно мала, из-за дестабилизирующих факторов не удаётся осуществить обработку сигнала на всей длине L_m . Реальный временной интервал синтезирования апертуры антенны редко превышает 1 с [8, 9]. В связи с этим максимально возможная протяженность интервала синтезирования L , т.е. длина отрезка пути, на котором реально обрабатывается отраженный сигнал, удовлетворяет двум условиям

$$L < L_m, \quad L \ll r_0. \quad (8)$$

Обычно интервал синтезирования приходится ограничивать по причине влияния различных факторов, искажающих сигнал РСА. В реальных условиях работы РСА всегда имеют место искажения траекторного сигнала, обусловленные различными дестабилизирующими факторами, такими как нестабильности движения носителя РСА, среды распространения радиоволн и аппаратуры РСА. При космическом базировании РСА меньше подвержены влиянию нестабильности движения носителя, и воздействие долговременных орбитальных возмущений можно не учитывать по причине их несопоставимости с продолжительностью требуемого интервала синтезирования, а последствия эволюции параметров орбиты

возможно учесть и скомпенсировать при помощи навигационной системы. Все остальные влияния факторов все же приходится учитывать.

Аппаратурными источниками искажений траекторного сигнала являются: нестабильности приемопередающего тракта, прежде всего опорного генератора, синтезатора частот и фазового детектора, ограничение динамического диапазона приемника и системы обработки, а также ошибки аппроксимации алгоритмов обработки сигналов. Искажения траекторного сигнала вызывают искажения РЛИ и могут быть как амплитудными, так и фазовыми. Амплитудные искажения траекторного сигнала обусловлены в основном ошибками стабилизации ДН антенны и изменением ЭПР объекта за время синтезирования. Они носят медленный характер, и их влияние эквивалентно изменению весовой функции системы обработки. Обычно амплитудные флуктуации траекторного сигнала за время синтезирования невелики и их влиянием можно пренебречь. Основное влияние оказывают фазовые нестабильности траекторного сигнала [3].

Основными источниками ошибок (некогерентности траекторного сигнала) являются фазовые нестабильности приемопередающих модулей, траекторные нестабильности носителя РСА и нестабильности среды распространения электромагнитной волны. Так, допустимая ошибка в знании траектории перемещения антенны равна нескольким миллиметрам (в сантиметровом диапазоне электромагнитной волны). Это требует специальных мер компенсации этих ошибок с помощью систем микронавигации и алгоритмов автофокусировки. В системе обработки РСА имеют место следующие фазовые искажения траекторного сигнала:

1. Случайные линейные изменения фазы или смещение максимума отраженного сигнала, приводящее к ошибкам измерения координат объектов и искажению РЛИ местности.

2. Нелинейные изменения фазы, следствием которых является:

– уменьшение максимума выходного сигнала, что равносильно снижению энергетического потенциала РЛС;

– расширение главного лепестка, приводящее к расфокусировке изображения и ухудшению разрешающей способности;

– увеличение уровня боковых лепестков, снижающее контрастность изображения.

Быстрые периодические изменения фазы приводят к появлению ложных отметок, а быстрые случайные изменения вызывают рост интегрального уровня боковых лепестков, что снижает контраст изображения. Необходимо также отметить, что большие фазовые искажения могут привести к полному разрушению РЛИ [3].

При линейном фазовом искажении траекторного сигнала, форма выходного сигнала идентична форме неискаженного выходного сигнала, но максимум сигнала наблюдается в канале РСА, настроенном на

частоту $f_1 + c_1/2\pi$, где c_1 – коэффициент линейных фазовых искажений. Это означает смещение РЛИ по координате f на величину частоты, вызванной линейными фазовыми искажениями: $\Delta f = c_1/2\pi$.

Поскольку линейная азимутальная координата объекта ℓ определяется частотой сигнала, то линейный набег фазы сигнала (сдвиг частоты) приводит к сдвигу отметки объекта по азимуту на величину:

$$\Delta \ell_1 = \frac{\Delta f_1 \lambda R_H}{2V \sin \theta_H} = \frac{c_1 \lambda R_H}{4\pi V \sin \theta_H}. \quad (9)$$

Относительная (по отношению к интервалу разрешения $\delta \ell$) величина смещения РЛИ

$$\Delta_1 = \frac{\Delta \ell}{\delta \ell} = \Delta f_1 T_c = \frac{c_1 T_c}{2\pi}. \quad (10)$$

Таким образом, относительное смещение объекта по азимуту пропорционально коэффициенту линейного искажения фазы и длительности формирования синтезированной апертуры. Допустимая величина коэффициента линейных фазовых искажений в соответствии с (9)

$$c_1 \leq \frac{4\pi V (\sin \theta_H) \Delta \ell_{\text{доп}}}{\lambda R_H}, \quad (11)$$

где $\Delta \ell_{\text{доп}}$ – допустимая величина смещения РЛИ.

Если $\Delta \ell_{\text{доп}} = \delta \ell$, то $c_1/2\pi = \Delta f_1 \leq 1/T_c = \delta f$, т.е. рассогласование системы обработки по частоте, вызванное нескомпенсированным линейным набегом фазы сигнала, в этом случае не должно превышать разрешения РСА по частоте. Следует отметить, что при некогерентном накоплении различное смещение отдельных изображений приводит к размытию получаемого РЛИ [3].

Что касается нелинейных фазовых искажений, то данная методика предполагает учет их воздействия на работу РСА и компенсацию их влияния на формирование РЛИ путем применения одного из известных методов [4]. При этом следует отметить, что для получения высокой разрешающей способности и улучшения характеристик РСА, влияющих на качество РЛИ, при обработке траекторного сигнала желательно учитывать сферичность фазового фронта электромагнитной волны и использовать метод синтезирования фокусированной апертуры. При небольших размерах синтезированной апертуры (СА) можно не применять фокусировку. Такой режим РСА называют доплеровским обужением луча (ДОЛ). Увеличение разрешения при этом невелико (10...30) раз, и в данной методике повышения качества РЛИ его использование неприемлемо. Для обеспечения высокой разрешающей способности РСА по азимуту необходимо с точностью до долей длины волны РСА знать изменение траектории движения фазового центра антенны (ФЦА) РЛС на интервале синтезирования. Эта задача решается специализированной инерциальной навигационной системой (ИНС) микронавигации, которая измеряет параметры движения носителя РСА. Очень высокие требования к точности датчиков ИНС, что является сложной технической проблемой. В связи с этим используется другой способ высокоточного из-

мерения фазовых искажений траекторного сигнала. Он основан на том, что сам траекторный сигнал или РЛИ являются носителями информации о фазовых нестабильностях, которые могут быть измерены с помощью специальной обработки сигнала. В таком случае имеется возможность компенсации фазовых флуктуации, обусловленных не только траекторными нестабильностями (ТН), а также нестабильностями аппаратуры РСА и среды распространения радиоволн. Обычно процесс извлечения информации о фазовых искажениях из траекторного сигнала или самого РЛИ и компенсации этих искажений используется для повышения детальности (резкости) получаемого изображения. Потому он часто называется автофокусировкой подобно фокусировке изображения в оптических системах [3]. Целью автофокусировки является обеспечение заданной разрешающей способности РСА в условиях реального полета при ограниченной точности микронавигационной системы.

Завершая изложение методики повышения пространственного разрешения РЛИ, следует обратить внимание согласно формулы (2), разрешение по угловой координате на земной поверхности, которая зависит также от наклонной дальности и угла наблюдения относительно вектора путевой скорости. Кроме того, формула (1) говорит о том, что и разрешение по горизонтальной дальности также зависит от угла сканирования. Такая зависимость пространственного разрешения РЛИ от особенностей геометрии сканирования приводит к понижению разрешающей способности и возникновению явления сжатия и перекрытия элементов разрешения (пикселов) по мере удаления от точки надира, т.е. возрастания наклонной дальности (угла сканирования) и отклонения от нулевого направления сектора обзора (реальной ДН антенны РСА). При этом возникают геометрические искажения РЛИ. Существует несколько причин геометрических искажений, однако эти причины действуют совместно. Кроме того, следует отметить, что для разных типов космических снимков комбинация этих причин различна. В зависимости от причины возникновения геометрические искажения РЛИ могут быть следующих видов:

1. Перспективные искажения, т.е. искажения наклонной дальности, вызывающие неравномерность разрешения снимка по горизонтальной дальности и азимуту, и приводящие к искажению масштаба и формы объектов РЛИ. При удалении от центральной линии снимка и стороны РЛИ, находящейся ближе к надиру, масштаб становится мельче.

2. Геометрические искажения, вызванные кривизной земной поверхности. Геометрические искажения РЛИ, вызванные кривизной поверхности Земли получаются в результате того, что точки сканируемой местности не лежат в одной плоскости и наблюдение ведется не в надире, а под углом к поверхности земли. Поэтому при удалении от надира искажение формы и размера объектов увеличивается.

3. Искажения РЛИ, обусловленные влиянием

рельефа местности. Неровности рельефа вызывают почти такие же искажения, как и кривизна земной поверхности, но задача устранения их сложнее, по причине того, что формы рельефа сложнее, чем форма Земли, которая близка к сфере. В связи с тем, что космические снимки делают с большой высоты, влияние форм рельефа незначительно, поэтому данный тип искажений учитывают лишь для горных областей. Такие искажения могут вызывать: эффект складки; переналожения; радиолокационные тени. Устранение этих эффектов выполняется при ортотрансформировании снимков по точной цифровой модели рельефа.

4. Геометрические искажения, вызванные вращением Земли и движением КА ДЗЗ в процессе формирования изображения. Поскольку сканирование Земли из космоса происходит не мгновенно, как фотосъемка, то вращение Земли (за 1 мин Земля поворачивается на $0,25^\circ$) вызывает изменение условий съемки в процессе сканирования одной сцены. На качество и свойства РЛИ влияет форма и высота орбиты КА ДЗЗ. Такие геометрические искажения можно скомпенсировать, если известны проекция орбиты КА на земную поверхность и механизм искажений.

5. Геометрические искажения РЛИ, вызванные смещением центра спектра доплеровских частот относительно нулевой частоты. Такие искажения вызывают перекося по азимуту (параллелограммного типа) изображения, который пропорционален углу смещения линии визирования для нулевой доплеровской частоты. Такой перекося можно компенсировать способом слежения за доплеровскими частотами.

Таким образом, для разрабатываемой методики наибольший интерес представляют геометрические искажения первых двух типов (перспективные и вызванные кривизной земной поверхности). Это связано с тем, что для РСА космического базирования геометрические искажения, связанные с рельефом местности, не имеют большого значения в силу большой высоты полета носителя РСА, но искажения изображения кривизной поверхности Земли приходится принимать во внимание. Таким образом, для улучшения качества РЛИ КА ДЗЗ имеется в виду, что на качество изображения РСА больше всего оказывают влияние перспективные искажения и те, что связаны с кривизной земной поверхности, а геометрические искажения других видов, вызванные влиянием рельефа местности, вращением Земли, движением КА ДЗЗ, смещением центра спектра доплеровских частот считаются скомпенсированными или не имеют решающего значения.

Следует отметить, что на данный момент широко используются методы геометрической коррекции РЛИ основанные на обработке уже готовых изображений. Эти методы включают в себя устранение на изображении геометрических искажений (ортотректификация) и осуществляют географическую привязку.

Для успешного решения навигационных задач объекты на спутниковых изображениях очень часто

бывает необходимо сопоставлять с географической картой (осуществить географическую привязку спутниковых данных) для определения географических координат объектов. Географическую привязку и геометрическую коррекцию возможно объединить в одну операцию совмещения деталей спутникового изображения и карты.

Пусть система координат (x, y) соответствует спутниковому изображению, а система (u, v) – карте. Требуется найти преобразование $u_k=f(x_k, y_k)$, $v_k=g(x_k, y_k)$, устанавливающее соответствия между положением k -го пиксела на изображении и географическими координатами. Так как вид функций f и g заранее не известен, то чаще всего применяется полиномиальная аппроксимация.

Обычно используются полиномы 2-й степени:

$$\begin{aligned} u_k &= a_0 + a_1x_k + a_2y_k + a_3x_ky_k + a_4x_k^2 + a_5y_k^2, \\ v_k &= b_0 + b_1x_k + b_2y_k + b_3x_ky_k + b_4x_k^2 + b_5y_k^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Первые члены с коэффициентами a_0, b_0 ответственны за сдвиг изображения по x и по y . Члены с коэффициентами a_1, a_2, b_1, b_2 отвечают за линейное изменение масштаба по x и по y и поворот, члены с a_3 и b_3 – за поворот, члены с a_4, a_5, b_4, b_5 – за нелинейное изменение масштаба и поворот.

Коэффициенты a_i и b_i определяются из решения системы (12). На изображении и на карте отыскивают одинаковые точки (их называют контрольными точками), их координаты подставляют в уравнения. В качестве контрольных точек удобно использовать элементы гидросети – устья рек, мысы, крутые изгибы русла рек и т.п. Количество точек должно быть достаточным для решения уравнений. Для полиномов второго порядка можно ограничиться 6 контрольными точками, но желательно, чтобы их число достигало 15 – 20 с распределением по всему полю, это позволяет использовать метод наименьших квадратов и сделать оценку коэффициентов менее зависимой от ошибок в определении координат на изображении и на карте.

Кроме рассмотренных выше методов и алгоритмов обработки аэрокосмических изображений, в настоящее время разработаны и продолжают разрабатываться новые методы и алгоритмы. К их числу относятся новые вегетационные индексы, метод главных компонент, Вейвлет-анализ, сингулярный спектральный анализ, фрактальный анализ и др. Мощным инструментом в задачах распознавания изображений становится нейроинформатика. Существуют специально организованные нейрокомпьютеры, но чаще используется эмуляция нейрокомпьютера на обычных ПЭВМ [10, 11].

Применительно к коррекции геометрических искажений, необходимо отметить, что эти методы обработки используют уже сформированное РСА РЛИ и тем самым не в состоянии учесть и корректно скомпенсировать искажающие факторы в полной мере. Кроме того, необходимо отметить высокую сложность, большую трудоемкость известных методов коррекции и невозможность получения откоррек-

тированного РЛИ в реальном масштабе времени. Предлагаемая методика повышения качества РЛИ предусматривает метод компенсации геометрических искажений на этапе формирования РЛИ и свободна от указанных недостатков.

Данная методика повышения качества РЛИ включает в себя следующий метод коррекции геометрических искажений.

Рассмотрим схему формирования РЛИ РСА с учетом кривизны Земли (рис. 3, 4) и опишем механизм возникновения данных искажений. Допустим, КА ДЗЗ (точка S) огибает поверхность Земли по круговой орбите высотой H . Это равнозначно движению спутника над поверхностью шара. Кажущееся изображение, которое строит РСА это проекция на поверхность шара r_k . В действительности же сканер отображает земную поверхность, т. е. внешнюю поверхность шара r_p . Предположим, что Земля – это шар радиуса $R_0=6370$ км. Собственное вращение Земли за время построения РЛИ принимать во внимание не будем.

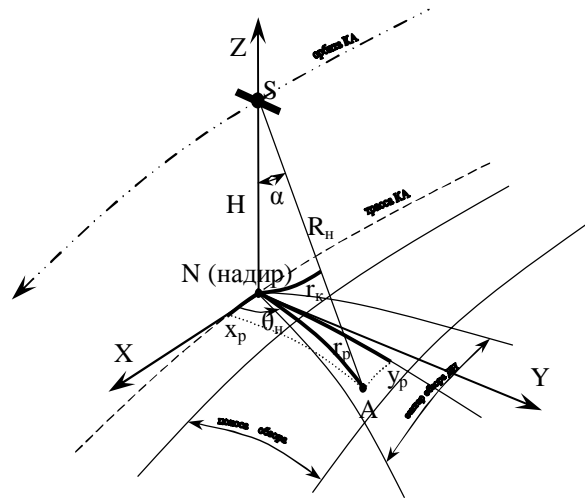


Рис. 3. Схема формирования РЛИ с учетом кривизны Земли

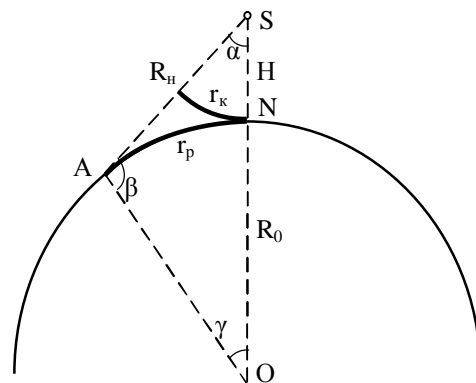


Рис. 4. Геометрия формирования РЛИ в сечении плоскости наклонной дальности R_n

Пусть $R_n = SA$ – расстояние от спутника S до некоторой точки земной поверхности при сканирова-

нии, α – угол сканирования (угол визирования), под углом γ дуга r_p видна из центра Земли. Используя теорему синусов и учитывая, что для всех значений угла α выполняется соотношение $(H+R_0) \cdot \sin \alpha < H$, получаем:

$$\begin{aligned} (R_0 + H) / \sin \beta &= R_0 / \sin \alpha; \\ \sin \beta &= (R_0 + H) \cdot \sin \alpha / R_0; \sin \beta = (1 + H/R_0) \cdot \sin \alpha; \\ \gamma &= \pi - \beta - \alpha; \\ \gamma &= \pi - \arcsin [(1+H/R_0) \cdot \sin \alpha] - \alpha; \end{aligned}$$

$$R_n / \sin \gamma = R_0 / \sin \alpha; \quad R_n = R_0 \cdot \sin \gamma / \sin \alpha.$$

Длина дуги AN, отвечающей развертке реального изображения, равна $r_p = AN = R_0 \cdot \gamma$. Длина дуги, соответствующей кажущемуся изображению, равна $r_k = H \cdot \alpha$, откуда $\alpha = r_k / H$. Таким образом,

$$r_p = R_0 \{ \pi - \arcsin [(1+H/R_0) \sin (r_k/H)] - r_k/H \}. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет пересчитать размер по дальности кажущегося изображения в дальность реального изображения и таким образом осуществить коррекцию геометрических искажений [10, 11].

Задачей трансформирования изображений является приведение снимка к заданному масштабу и проекции, устранение искажений от угла наклона, рельефа и кривизны земной поверхности, но часто трансформирование ограничивается преобразованием наклонного снимка в горизонтальный снимок с заданного, обычно более крупного, чем оригинальный, масштаба. В общем случае трансформирование выполняется на аппроксимирующую плоскость, касающуюся земной поверхности в заданной точке, в частности в точке надира. В последнее время для трансформирования снимков широко используются компьютерные технологии. При ортотрансформировании представляется возможность решения трёхмерной задачи, т.е. устранение искажения снимка не только от угла наклона, но и от рельефа [11].

Данная методика предусматривает применение метода геометрической коррекции, позволяющей производить трансформирование изображения на стадии его формирования в тракте РСА способом масштабирования. С этой целью вводятся корректирующие масштабные коэффициенты по координатам X (азимут) и Y (горизонтальная дальность). В этом случае проекцию кажущейся r_k и реальной r_p наклонной дальности R_n на аппроксимирующую плоскость в точке надира можно разложить на составляющие координаты: x_k , x_p и y_k , y_p (рис. 5).

Координату X кажущегося изображения вдоль строки азимута можно найти из формулы:

$$x_k = r_k \cdot \cos \theta_n, \quad (14)$$

где θ_n – угол наблюдения относительно вектора путевой скорости.

Координату X реального изображения вдоль строки азимута можно найти из формулы:

$$x_p = r_p \cdot \cos \theta_n. \quad (15)$$

Координату Y кажущегося изображения вдоль строки горизонтальной дальности можно найти из формулы:

$$y_k = r_k \cdot \sin \theta_n. \quad (16)$$

Координату Y реального изображения вдоль строки горизонтальной дальности можно найти из формулы

$$y_p = r_p \cdot \sin \theta_n. \quad (17)$$

Таким образом, знание координат: x_k , x_p и y_k , y_p дает возможность вычислить корректирующие масштабные коэффициенты по азимуту и горизонтальной дальности.

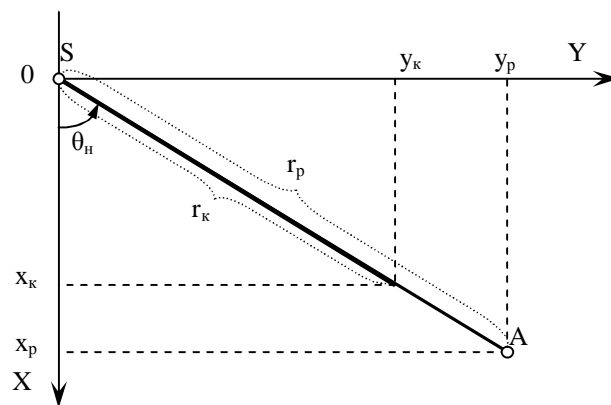


Рис. 5. Проекция наклонной дальности R_n на аппроксимирующую плоскость в точке надира

Корректирующий масштабный коэффициент по азимуту

$$k_x = x_p / x_k. \quad (18)$$

Корректирующий масштабный коэффициент по горизонтальной дальности

$$k_y = y_p / y_k. \quad (19)$$

Следует иметь в виду, что эти коэффициенты масштабирования не являются постоянными и будут изменяться в зависимости от наклонной дальности и угла наблюдения относительно вектора путевой скорости. В связи с этим, применение разработанного метода может быть различным. Если не требуется особенно точная коррекция геометрических искажений, с целью упрощения системы, возможно применить способ, суть которого заключается в том, что полоса обзора РСА делится вдоль направления полёта КА на несколько частных полос обзора с усреднением масштаба. В этом случае, коррекция геометрических искажений производится путём усреднения масштаба РЛИ для каждой составляющей полосы обзора в зависимости от величины угла визирования (наклонной дальности). Усреднённый масштабный коэффициент устанавливается точно для осевой линии каждой частной полосы обзора. Это позволяет существенно упростить метод коррекции и делает возможным применение такого способа в том случае, если искажения масштаба изображения на краях частных полос незначительны.

Если же требуется высокая точность геометрической коррекции, то в этом случае необходимо производить расчёт масштабирующих коэффициентов для каждой строки формирования РЛИ по азимуту и горизонтальной дальности при помощи рекуррентных алгоритмов. Несколько упростить задачу в этом случае можно применением способа построчного формирования РЛИ одним синтезированным лучом. В этом случае каждый объект сканируемой поверхности наблюдается за время обзора только один раз, в момент, совпадающий с перпендикулярным направлением трассе пролёта носителя РСА ($\theta_n=90^\circ$). Это дает возможность не производить пересчёт масштабирующих коэффициентов по азимуту (координате X) в связи с тем, что геометрические искажения по азимуту в этом случае не возникают. Следует отметить, что в общем случае, способ построчного формирования изображения применяется в РСА для повышения разрешающей способности по азимуту, и может быть успешно применён в этой методике повышения качества РЛИ. Его особенностью является отсутствие некогерентного накопления, которое необходимо для устранения явления зернистости РЛИ, вызванной спекл-шумом. В связи с этим, при использовании этого метода, в дополнение к обзору одним центральным лучом, предполагается организация одновременного обзора двумя крайними лучами ДН реальной антенны РСА, максимально разнесёнными по азимуту, с целью обеспечения максимальной независимости полученных при помощи них изображений, что необходимо для успешного подавления спекл-шума. В таком случае, пересчёт масштабирующих коэффициентов по азимуту необходимо будет осуществлять только для двух этих лучей (крайних значений θ_n ДН реальной антенны РСА).

Обычно, влияние угла наклона, рельефа местности и кривизны Земли на положение точки на снимке учитывалось порознь. На самом деле они действуют одновременно, компенсируя или усиливая совместное влияние. Эти искажения минимальны в центральной части снимка (области прилегающей к надиру) и увеличиваются по его краям. Поэтому наиболее пригодна для проведения измерений именно эта часть снимка, так называемая рабочая площадь, которая характеризуется также и лучшим качеством изображения [11].

Предложенный в данной методике метод коррекции геометрических искажений РЛИ позволяет расширить рабочую площадь снимка и повысить качество изображения. Следует отметить, что достоинством этого метода является комплексный учет влияния кривизны земной поверхности и перспективных искажений. Метод позволяет не только компенсировать ухудшение разрешающей способности из-за сжатия элементов разрешения, но и обеспечить

более точное пространственное расположение различных объектов на радиолокационном снимке и произвести коррекцию искажений их формы. Это особенно важно для успешного применения результатов дистанционного зондирования с помощью РСА при решении ряда навигационных задач и картографирования, т.е. в тех случаях, когда требуется точная географическая привязка полученного изображения к объектам на местности. Ещё одно немаловажное достоинство предложенного метода коррекции геометрических искажений заключается в его способности работать в реальном масштабе времени.

Как же упоминалось, важной характеристикой РСА, влияющей на качество РЛИ является динамический диапазон.

Энергетические характеристики синтезированной апертуры (СА) (отношение сигнал/внутренний шум) определяются коэффициентом усиления реальной антенны и временем синтезирования, т.е. временем когерентного накопления сигналов. Помехозащищенность от внешних активных и пассивных помех определяется как ДН реальной антенны, так и направленными свойствами СА, т.е. пространственной селекцией помех. Действительно, в каждом положении антенны при синтезировании апертуры мощность принятого сигнала определяется мощностью излучения и коэффициентом усиления антенны, а синфазное сложение этих сигналов при синтезировании эквивалентно накоплению энергии сигнала за время синтезирования при постоянной спектральной мощности внутренних шумов [3]. Динамический диапазон (З) может быть выражен отношением максимальной интенсивности сигнала РЛИ к минимальной, и определяет правильность передачи отражающих свойств объектов сканируемой поверхности в зависимости от их ЭПР. Известно, что динамический диапазон зависит от многих факторов: уровня помех и шумов, т.е. уровня боковых лепестков (максимального и интегрального) функции неопределенности, нестабильностей траектории движения КА, среды распространения, особенностей построения приемопередающего тракта, системы обработки и индикации. Данная методика улучшения качества РЛИ предусматривает применение в РСА АКП, что позволяет снизить уровень боковых лепестков ДН и тем самым расширить динамический диапазон, что в свою очередь ведет к улучшению такой важной характеристики, как радиометрическое (яркостное) разрешение.

Выводы

Предложена методика улучшения качества РЛИ РСА, основными положениями которой является:

1. Анализ разрешающей способности РСА [7] показывает необходимость применения РСА с фокусированной апертурой для обеспечения высокого качества РЛИ.

2. Повышение разрешающей способности по дальности обеспечивается использованием зондирующих импульсов малой длительности с линейной частотной модуляцией. Корректное применение в РСА АКП компенсирует понижение мощности зондирующего сигнала из-за сокращения его длительности и обеспечивает его уверенное обнаружение на фоне помех.

3. Высокая разрешающая способность по азимуту обеспечивается необходимым интервалом синтезирования, что возможно только при использовании специальных мер по компенсации фазовых нестабильностей траекторного сигнала. Малый уровень фазовых нестабильностей приемопередающего тракта обеспечивается тщательным конструированием, а нестабильности среды распространения в сантиметровом диапазоне обычно невелики. Основная причина фазовых нестабильностей (случайные изменения положения фазового центра антенны) компенсируется применением одного из методов автофокусировки. Высокое разрешение также может быть обеспечено применением построчного алгоритма формирования РЛИ.

4. Ухудшение разрешения в связи с наложением и сжатием пикселей компенсируется применением предложенного метода коррекции геометрических искажений РЛИ.

5. Влияние основных видов геометрических искажений РЛИ (перспективных и вызванных кривизной земной поверхности) устраняется применением предложенного метода коррекции.

6. Влияние спекл-шума ослабляется путем дополнительного некогерентного накопления (сложения) нескольких независимых РЛИ одного и того же участка местности.

7. Расширение динамического диапазона и улучшение радиометрического разрешения обеспечивается применением АКП.

Список литературы

1. *Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для студ. высш. учеб. заведений* / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
2. *Никольский Д.Б. Сравнительный обзор современных радиолокационных систем* / Д.Б. Никольский // *Геоматика*. – 2008. – № 1. – С. 11-17.
3. *Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов* / Г.С. Кондратенков, А.Ю. Фролов; под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. *Чердынцев В.А. Радиотехнические системы: учеб. пособ. для вузов* / В.А. Чердынцев. – Мн.: Выш. шк., 1988. – 369 с.
5. *Цифровое кодирование телевизионных изображений* / И.И. Цуккерман, Б.М. Кац, Д.С. Лебедев и др.; под ред. И.И. Цуккермана. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.
6. *Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны* / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
7. *Справочник по радиолокации* / под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970: пер. с англ. (в четырех томах); под общей ред. К.Н. Трофимова. Т. 2. *Радиолокационные антенные устройства* / под ред. П.И. Дунника. – М.: Сов. радио, 1977. – 408 с.
8. *Радиолокационные станции обзора Земли* / Г.С. Кондратенков, В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов / под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
9. *Радиолокационные станции воздушной разведки* / А.А. Комаров, Г.С. Кондратенков, Н.Н. Курилов и др. / под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Воениздат, 1983. – 152 с.
10. *Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособ.* – М.: Логос, 2001. – 264 с.
11. *Шалькевич Ф.Е. Методы аэрокосмических исследований: курс лекций* / Ф.Е. Шалькевич. – Мн.: БГУ, 2005. – 161 с.

Поступила в редколлегию 10.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЇ В КОСМІЧНИХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Д.П. Пашков, С.В. Домнін

Представлена методика підвищення якості радіолокаційного зображення (РЛЗ) радіолокації космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Якість формованого РЛЗ станцією радіолокації бічного огляду з синтезом апертури антени (РСА) залежить від компенсації впливу впливаючих чинників. З цією метою пропонується комплексний підхід обліку дій і впливаючих чинників на функціонування РСА.

Ключові слова: зображення радіолокації, станція радіолокації з синтезом апертури, шуми, компенсація.

A METHOD OF UPGRADING RADIO-LOCATION IMAGE IS IN SPACE SYSTEMS OF REMOTE SENSING OF EARTH

D.P. Pashkov, S.V. Domnin

The method of upgrading radio-location image (RLI) of the space systems of the remote sensing of Earth is presented (DZZ). Quality of formed RLI with the synthesis of aperture of aerial (RSA) depends the radio-location station of lateral review on indemnification of influencing of influencing factors. To that end complex approach of account of influences and influences is offered on functioning of RSA.

Keywords: radio-location image, radio-location station with the synthesis of aperture, noises, indemnification.