



(19) RU⁽¹¹⁾ 2 114 445⁽¹³⁾ C1
(51) МПК⁶ G 01 S 13/90

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21), (22) Заявка: 97107476/09, 12.10.1995

(30) Приоритет: 13.10.1994 FR 94 12220

(46) Дата публикации: 27.06.1998

(56) Ссылки: 1. Goldstein et al, Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. Radio Science. Том 23, N 4, июль-август 1988, с. 713 - 720. 2. US, патент, 5332999, кл. G 01 S 13/90, 1994.

(71) Заявитель:

Сантр Насьональ д'Этюд Спасьяль (FR)

(72) Изобретатель: Дидье Энри Массоне (FR)

(73) Патентообладатель:

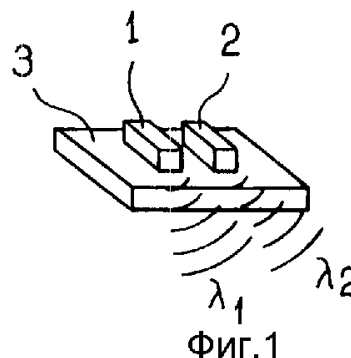
Сантр Насьональ д'Этюд Спасьяль (FR)

(54) СПОСОБ ОЦЕНКИ НЕЭВКЛИДОВЫХ ЭФФЕКТОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗОБРАЖЕНИЕ, ПОЛУЧЕННОЕ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ, И СПУТНИК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭТОГО СПОСОБА

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике радиотехнических измерений, а точнее к оценке смещения фазы электромагнитной волны, излученной спутниковой радиолокационной станцией при ее прохождении через ионосферу. Способ содержит формирование двух интерферограмм, полученных с помощью двух спутниковых радиолокационных станций, работающих соответственно на длинах волн λ_1 и λ_2 , удовлетворяющих соотношению $m\lambda_1 = n\lambda_2$, где m и n представляют собой некоторые целые числа, причем упомянутые радиолокационные станции установлены на одном и том же спутнике, а также осуществление линейной комбинации $m\lambda_1 - n\lambda_2$ соответствующих фаз Φ_1 и Φ_2 первой и второй интерферограмм, причем дробная часть этой линейной комбинации является

репрезентативной для неэвклидовых эффектов, оказывающих влияния на радиолокационные изображения, и позволяет измерить относительные небольшие перемещения земной поверхности. Устройство для реализации способа содержит средства, реализующие указанные действия. 2 с. и 2 з.п. ф-лы, 2 ил.





(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 114 445** ⁽¹³⁾ **C1**
 (51) Int. Cl.⁶ **G 01 S 13/90**

RUSSIAN AGENCY
 FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: 97107476/09, 12.10.1995

(30) Priority: 13.10.1994 FR 94 12220

(46) Date of publication: 27.06.1998

(71) Applicant:

Santr Nas'onal' d'Ehtjud Spas'jal' (FR)

(72) Inventor:

Did'e Ehnri Massone (FR)

(73) Proprietor:

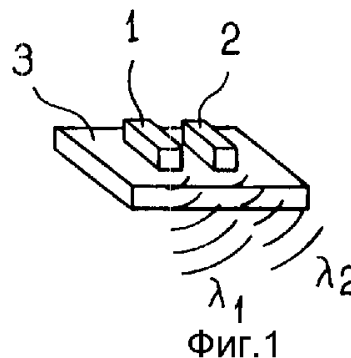
Santr Nas'onal' d'Ehtjud Spas'jal' (FR)

(54) **METHOD OF ESTIMATION OF NON-EUCLIDEAN EFFECTS INFLUENCING THE IMAGE OBTAINED BY MEANS OF SATELLITE-BORNE RADAR AND SATELLITE INTENDED FOR REALIZATION OF METHOD**

(57) Abstract:

FIELD: technique of radiometric measurements, in particular, estimation of phase shift of electromagnetic wave radiated by satellite-borne radar at its passage through ionosphere. SUBSTANCE: method consists in forming of interferograms obtained by means of two satellite-borne radars operating at wavelengths λ_1 and λ_2 respectively, satisfying relation $m\lambda_1 = n\lambda_2$, where m and n represent certain integers; the mentioned radars are installed on the same satellite; as well as in accomplishing of linear function $m\lambda_1 - n\lambda_2$ of respective phases Φ_1 and Φ_2 of the first and second interferograms; the fraction member of this linear function is a representative one for non-Euclidean effects

influencing the radar images and makes it possible to measure relative small displacements of terrestrial surface. The device uses means realizing the above actions. EFFECT: facilitated procedure. 4 cl, 2 dwg



Изобретение касается техники получения изображений земной поверхности со спутника наблюдения или разведывательного спутника, а более конкретно техники получения со спутника радиолокационных изображений земной поверхности.

Формирование радиолокационных изображений при помощи находящейся в космосе спутниковой радиолокационной станции отличается от хорошо известной техники формирования оптических изображений, принципы создания которых близки к принципам функционирования обычного человеческого зрения. Изображение, формируемое при помощи располагающейся в космосе радиолокационной станции, отличается от изображения, получаемого при помощи обычных оптических средств, прежде всего своим содержанием, поскольку тот же земной пейзаж наблюдается радиолокатором из космоса при помощи электромагнитных волн дециметрового диапазона (т.е. с использованием электромагнитного излучения, длина волны которого составляет 3-25 см), т.е. на значительно более длинных волнах, чем волны микрометрового диапазона, которые формируют обычное оптическое изображение.

Радиолокационное изображение отличается от обычного оптического также принципом его формирования, поскольку спутниковая радиолокационная станция представляет собой активный инструмент, который содержит свой собственный источник облучения наблюдаемого пейзажа электромагнитными волнами, что позволяет вести наблюдение за земной поверхностью как днем, так и ночью, и при соответствующем выборе используемой длины волны электромагнитного излучения позволяет формировать эти радиолокационные изображения рельефа земной поверхности независимо от наличия атмосферной облачности. Таким образом, в случае использования спутникового радиолокатора речь идет о возможности получения "всепогодного" изображения, эксплуатационные преимущества которого по сравнению с оптическим изображением многочисленны и неоспоримы.

Поскольку в космическом пространстве достаточно трудно развернуть радиолокационную антенну размером более 10 м в поперечнике, естественная угловая разрешающая способность спутникового радиолокатора оказывается совершенно неудовлетворительной и составляет порядка половины углового градуса, тогда как обычный человеческий глаз обеспечивает в десять раз лучшую угловую разрешающую способность.

Таким образом, современная техника формирования радиолокационных изображений не обращается непосредственно к естественной угловой разрешающей способности этого инструмента. Разрешающая способность радиолокатора в направлении, перпендикулярном направлению полета данного спутника, обеспечивается путем анализа непосредственно на борту этого спутника временной задержки возвращения отраженного от земной поверхности сигнала (что представляет собой принцип действия

всех радиолокационных станций), а разрешающая способность в направлении полета данного спутника обеспечивается при помощи некоторого численного процесса, называемого "синтезом апертуры" и приводящего к достаточно большому объему вычислений, обычно выполняемых в наземных условиях.

Каждая из линий или строк радиолокационной "картинки" соответствует одному высокочастотному импульсу, излученному данной радиолокационной станцией и преобразованному в некоторую последовательность дискретных значений, классифицированных по времени их возвращения в качестве индексов или указателей соответствующей колонки изображения. Эти дискретные значения представляют собой комплексные числа, характеризующие амплитуду и фазу отраженной от земного рельефа электромагнитной волны.

Упомянутый выше процесс численного синтеза апертуры сохраняет комплексную природу обрабатываемых сигналов таким образом, что в дополнение к своему основному эксплуатационному качеству, которое состоит в нечувствительности к возможному наличию атмосферной облачности и возможности так же эффективно действовать ночью, радиолокационная станция, установленная на спутнике, позволяет осуществлять измерения малых перемещений путем использования техники интерферометрии.

Фаза отраженной электромагнитной волны действительно содержит информацию о пространственном положении, распределении и природе отражения электромагнитных волн различных элементов, образующих земной пейзаж, облученный данной радиолокационной станцией, называемых также целями или мишенями (типа препятствий, ответвлений и т. п.). Путем сопоставления радиолокационных изображений, сформированных в различные моменты времени в практически одинаковых условиях, информация о пространственном положении этих элементов может быть выделена из другой информации, составляющей интерферограмму.

Радиолокационная интерферометрия была предложена и исследована более двадцати лет назад. По этому поводу полезно обратиться к публикации L.C. Graham в издании Proceedings IEEE. vol. 62 No 6, июнь 1974, озаглавленной "Synthetic interferometer radar for topographic mapping".

Информация о фазе отраженного радиолокационного сигнала подвергается влиянию трех факторов, первые два из которых являются неизвестными:

- фазовое смещение в результате отражения радиолокационной волны от целей, связанное со специфическими электромагнитными свойствами этих целей;
- фазовое смещение, связанное с относительным положением целей внутри одного минимального элемента изображения, результирующая фаза которого будет представлять собой сложную комбинацию составляющих от различных целей, располагающихся внутри данного элемента изображения, уравновешенную в соответствии с их амплитудами;

- возможное фазовое смещение, связанное с перемещением целей или с изменением условий их наблюдения.

При использовании техники радиолокационной интерферометрии обычно предполагается, что два первых из упомянутых выше факторов за неимением точной информации о них являются стабильными во времени. Такая гипотеза подразумевает для первого из упомянутых выше факторов некоторую физическую стабильность наблюдаемых целей, а для второго из упомянутых выше факторов - некоторую геометрическую стабильность, которая сокращает возможные изменения угла падения радиолокационной волны между двумя последовательными проходами данного спутника наблюдения или разведки. Таким образом, состояние земной поверхности не должно слишком сильно измениться между двумя последовательными радиолокационными съемками этой поверхности (что не относится, например, к поверхности моря), и данный спутник на следующем витке должен пройти над данным участком земного рельефа практически по той же траектории (с отклонением не более нескольких сотен метров), по которой он проходил на предыдущем витке.

Если упомянутая выше гипотеза подтверждается, связанное с третьим из упомянутых выше факторов изменение фазы между двумя последовательно выполненными радиолокационными съемками данного участка земного рельефа может быть получено путем построения интерферограммы, которая выражает или характеризует разность фаз этих двух радиолокационных изображений. Эта разность фаз может быть проанализирована, как представляющая собой результат соответствующего вклада четырех различных обстоятельств:

- орбитальное приближение или удаление траекторий данного спутника наблюдения между двумя последовательными радиолокационными съемками данного участка земного рельефа; как уже было сказано, последовательные орбиты этого спутника должны быть по возможности близки друг к другу, но на практике никогда не будут полностью совпадать или быть строго параллельными;

- стереоскопический эффект, создаваемый топографией данного рельефа, наблюдаемого с двух даже немного отличающихся друг от друга точек съемки;

- собственное движение совокупности целей, которое имеет место между двумя последовательными моментами радиолокационной съемки данного рельефа земной поверхности;

- изменение дальности атмосферного распространения радиолокационных волн и фазовые сдвиги, имеющие ионосферное происхождение; эти ионосферные фазовые сдвиги квалифицируются также как "незакладочные эффекты", поскольку изменения фазы, которые имеют место для различных длин радиолокационных волн, не могут быть объяснены общим увеличением или уменьшением протяженности оптического пути этих волн.

На практике весьма затруднительного произвести раздельную оценку влияния

каждого из упомянутых выше факторов, воздействующих на фазу отраженного радиолокационного сигнала.

Тем не менее, при выполнении такой оценки можно принять во внимание следующие соображения:

- эффект фактического движения земной поверхности должен проявляться на всех интерферограммах, охватывающих заданный промежуток времени, при любых возможных орбитальных отклонениях в моменты выполнения радиолокационных съемок данного рельефа, например, если движение земной поверхности проявляется на интерферограмме, построенной на основе радиолокационных съемок, выполненных в апреле и в мае, оно должно проявляться и на интерферограмме, построенной на основе радиолокационных съемок, выполненных, к примеру, в марте и в июне;

- эффект влияния атмосферного распространения радиолокационных волн должен проявляться на всех интерферограммах, при построении которых использовалось радиолокационное изображение, которое было затронуто этим эффектом атмосферного распространения.

Упомянутые выше неэвклидовы эффекты могут быть оценены методом дедукции после выполнения количественной оценки других факторов, влияющих на фазу отраженного радиолокационного сигнала. Однако эта количественная оценка становится достаточно сложной вследствие того, что измерение расстояния не является однозначным, давая только модуль или абсолютную величину длины волны λ радиолокационной станции. Другими словами, если длина электромагнитной волны составляет 5 см, то перемещение на 2 см видится таким же образом, как и перемещение на 7 см. Полное измерение может быть воссоздано путем "разворачивания" от одной точки к другой фазы сигнала на изображении для того, чтобы выявить целые числа длины волны, отсутствующие в данном измерении [1].

Однако эта операция разворачивания или развертывания фазы трудно поддается автоматизации не существует способа, позволяющего достаточно просто и точно оценить упомянутые выше неэвклидовы эффекты.

Таким образом, цель изобретения состоит в том, чтобы предложить способ формирования радиолокационных изображений, позволяющий оценить неэвклидовы эффекты, в частности без необходимости "развертывать" фазу для выполнения этой оценки.

Предлагаемый способ характеризуется тем, что он содержит следующие этапы:

- формирование первой и второй интерферограмм на основе пар радиолокационных изображений, полученных соответственно с использованием соответственно двух спутниковых радиолокационных станций, работающих соответственно на длинах волн λ_1 и λ_2 с одновременным контролем за выполнением соотношения $m \lambda_1 = n \lambda_2$, где m и n представляют собой некоторые целые числа, причем упомянутые радиолокационные станции установлены на одном и том же спутнике;

- осуществление линейной комбинации $n \Phi_1 - m \Phi_2$ соответствующих фаз Φ_1 и Φ_2 первой и второй из упомянутых выше интерферограмм, причем дробная часть этой линейной комбинации является репрезентативной для упомянутых неевклидовых эффектов, оказывающих влияние на радиолокационные изображения двух упомянутых спутниковых станций, служащих для получения упомянутых интерферограмм. В предпочтительном варианте реализации предлагаемого изобретения $m = 2$ или $m = 3$ и $n = 1$.

Объектом изобретения является также спутник, предназначенный для осуществления описанного выше способа, отличающийся тем, что он оборудован двумя радиолокационными станциями, способными работать соответственно на длинах волн λ_1 и λ_2 .

Еще одним объектом изобретения является представление неевклидовых эффектов, полученное при использовании упомянутого способа.

На фиг. 1 представлен перспективный вид платформы спутника наблюдения или разведывательного спутника, оборудованного двумя спутниковыми радиолокационными станциями в соответствии с изобретением; на фиг. 2 - предельно упрощенная иллюстрация процесса обработки радиолокационных изображений, поступающих от каждой из двух упомянутых спутниковых радиолокационных станций, установленных на данном спутнике.

На фиг. 1 весьма схематично представлены две спутниковые радиолокационные станции 1 и 2 с синтезом апертуры, известны сами по себе и поэтому подробно не описываемые, установленные на некоторой общей несущей платформе 3 спутника наблюдения земли.

Две упомянутые выше радиолокационные станции предназначены для работы на длинах волн электромагнитного излучения соответственно λ_1 и λ_2 , подтверждающих соотношение $m\lambda_1 = n\lambda_2$, где m и n представляют собой некоторые целые числа.

Каждая из двух упомянутых выше радиолокационных станций используется для формирования пары радиолокационных изображений земного рельефа, обозначенных позициями 1а и 1б для первой радиолокационной станции и позициями 2а и 2б для второй радиолокационной станции, на основе которых известным образом производится построение соответственно двух интерферограмм 1с и 2с. Упомянутые радиолокационные изображения 1а и 2а формируются одновременно. То же самое можно сказать и о радиолокационных изображениях 1б и 2б.

В этом случае для одного и того же геометрического хода D на упомянутых интерферограммах 1с и 2с имеют место следующие соотношения:

$$D + E(\lambda_1) = k_1 \lambda_1 + \lambda_1 \Phi_1, \quad (1)$$

$$D + E(\lambda_2) = k_2 \lambda_2 + \lambda_2 \Phi_2, \quad (2)$$

$$m\lambda_1 = n\lambda_2, \quad (3)$$

где k_1 и k_2 представляют собой некоторые целые числа;

Φ_1 и Φ_2 представляют собой

соответственно фазы, измеренные на интерферограммах 1с и 2с;

функции $E(\lambda_1)$ и $E(\lambda_2)$ выражают неевклидовы эффекты, оказывающие влияние на распространение радиолокационных волн, длины которых имеют значение λ_1 и λ_2 , которое подлежит оценке в данном случае.

Уравнения (1) и (2) могут быть записаны также в следующем виде:

$$D = k_1 \lambda_1 + \lambda_1 \Phi_1 - E(\lambda_1) / \lambda_1, \quad (4)$$

$$D = k_2 \lambda_2 + \lambda_2 \Phi_2 - E(\lambda_2) / \lambda_2. \quad (5)$$

После преобразования уравнений (4) и (5) получаем

$$k_2 \lambda_2 - k_1 \lambda_1 = \lambda_1 \Phi_1 - E(\lambda_1) / \lambda_1 - \lambda_2 \Phi_2 - E(\lambda_2) / \lambda_2. \quad (6)$$

Принимая во внимание уравнения (3) и (6), получаем соотношение

$$[mk_2 - nk_1] \lambda_1 = n\lambda_1 \Phi_1 - E(\lambda_1) / \lambda_1 - m\lambda_1 \Phi_2 - E(\lambda_2) / \lambda_2. \quad (7)$$

Принимая во внимание дробную часть соотношения (7), получаем выражение

Дробная часть $(n \Phi_1 - m \Phi_2) =$ дробной части $mE(\lambda_2)/\lambda_2 - nE(\lambda_1)/\lambda_1$.

Зная численные значения фаз Φ_1 и Φ_2 путем считывания интерферограмм 1с и 2с, можно картографировать упомянутые неевклидовы эффекты в соответствии с величиной дробной части выражения: $mE(\lambda_2)/\lambda_2 - nE(\lambda_1)/\lambda_1$.

Упомянутые выше величины параметров m и n в предпочтительном варианте реализации предлагаемого изобретения ограничены значениями от 2 до 3 максимум по соображениям увеличения удельного веса шума в размноженных и комбинированных интерферограммах, который возрастает в соответствии с выражением: $(m_2 + n_2)^{1/2}$.

В конечном счете изобретение, при условии использования двух радиолокационных станций, установленных на одной опорной платформе данного спутника и работающих с использованием длин волн в целом или простом дробном отношении, обеспечивает возможность отделения достаточно простым и удобным образом упомянутых неевклидовых эффектов от других эффектов, оказывающих влияние на фазу, причем умножение фазы на некоторое целое число не вызовет затруднений у специалиста в данной области техники.

Таким образом, путем формирования комбинаций линейного характера из полученных интерферограмм и без необходимости "развертывания" фазы имеется возможность:

- картографировать эффекты распространения радиолокационных электромагнитных волн ионосферного происхождения;
- формировать интерферограммы, свободные от таких эффектов.

Изобретение может найти применение для измерения относительно небольших перемещений земной поверхности, в частности, для:

- измерения сейсмических смещений

земной поверхности и исследования таких смещений в период до землетрясения или после него;

- выявления вздутия вулканов перед их извержением;
- измерения смещений или сдвигов земной поверхности;
- измерений скорости движения ледников;
- наблюдения за возможным процессом погружения морских нефте- или газодобывающих платформ;
- наблюдения за оседанием грунта в процессе выполнения взрывных работ, работ по добыче полезных ископаемых, нефти, газа, а также при проведении подземных ядерных испытаний;
- классификации сельскохозяйственных культур при помощи непосредственного измерения скорости роста растений.

Формула изобретения:

1. Способ оценки неевклидовых эффектов, оказывающих влияние на изображение, получаемое при помощи спутниковой радиолокационной станции, в частности на смещение фазы, связанное с распространением электромагнитной волны, излученной данной радиолокационной станцией, сквозь ионосферу, отличающийся тем, что формируют первую 1с и вторую 2с интерферограммы на основе пар радиолокационных изображений 1а, 1б, 2а, 2б, полученных соответственно с использованием двух спутниковых радиолокационных станций, работающих на длинах волн соответственно λ_1 и λ_2 и выдерживающих соотношением $m\lambda_1 = n\lambda_2$, где m и n представляют собой некоторые целые числа, причем упомянутые две

радиолокационные станции установлены на одном и том же спутнике, осуществляют линейную комбинацию $n\Phi_1 - m\Phi_2$ соответствующих фаз Φ_1 и Φ_2 первой и второй интерферограмм, причем дробная часть этой линейной комбинации является репрезентативной для упомянутых неевклидовых эффектов, оказывающих влияние на упомянутые радиолокационные изображения двух упомянутых спутниковых радиолокационных станций, служащих для построения упомянутых интерферограмм.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что упомянутый параметр m выбирается в диапазоне 2 - 3, а параметр n = 1.

3. Устройство для осуществления способа по любому из пп. 1 и 2, отличающееся тем, что содержит искусственный спутник земли, оборудованный двумя спутниковыми радиолокационными станциями, выполненными с возможностью функционирования соответственно на упомянутых длинах волн λ_1 и λ_2 и вырабатывать пары радиолокационных изображений земного рельефа 1а, 1б, 2а, 2б, средства, предназначенные для формирования упомянутых первой 1с и второй 2с интерферограмм на основе упомянутых пар радиолокационных изображений земного рельефа, и средства, предназначенные для осуществления линейной комбинации соответствующих фаз первой и второй интерферограмм.

4. Устройство по п. 3, отличающийся тем, что упомянутые спутниковые радиолокационные станции представляют собой радиолокационные станции с синтезом апертуры.

35

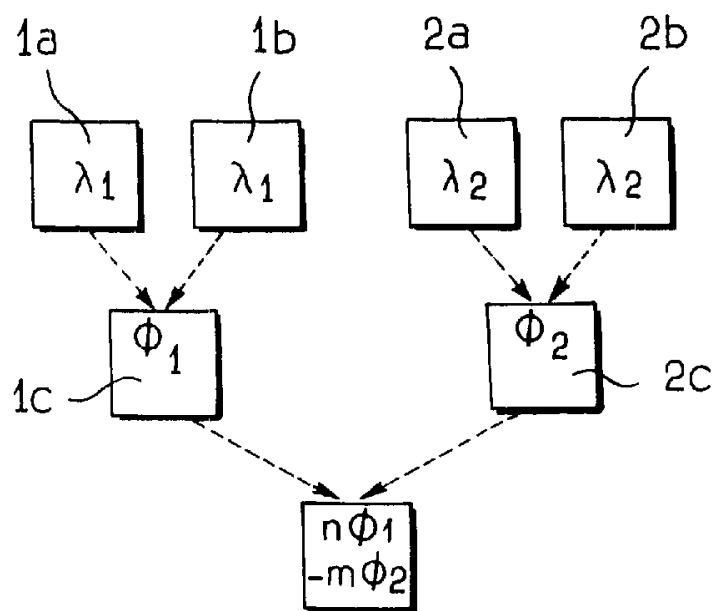
40

45

50

55

60



Фиг.2