

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.396.96

О возможности достижения высокого пространственного разрешения космических радиолокаторов с синтезированной апертурой УКВ диапазона частот

О.В. Горячкин

Рассматривается задача реализации радиолокационного наблюдения поверхности Земли из космоса в УКВ диапазоне частот. Для телескопического режима работы радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) предлагается непараметрическая адаптивная техника синтеза радиолокационных изображений. Показано, что: 1) потенциальное разрешение РСА УКВ диапазона при использовании адаптивных непараметрических методов формирования изображений можно оценить как $\sqrt{\Delta_c \lambda}$, где Δ_c — максимально возможная разрешающая способность РСА с учетом влияния фактора атмосферы при использовании неадаптивных алгоритмов; 2) алгоритмы непараметрической фокусировки могут быть использованы для формирования радиолокационных изображений космических РСА УКВ диапазона в телескопическом режиме и обеспечивают потенциальное разрешение в зависимости от длины волны 10-20 м для спокойной ионосферы и 10-100 м для возмущенной ионосферы. При этом качество работы этих алгоритмов не зависит от сюжета радиолокационного изображения.

1. Введение

В последние годы широко обсуждаются проблемы реализации космических низкочастотных РСА дистанционного зондирования Земли, и в частности РСА, работающие в УКВ диапазоне частот. Связано это с высокой эффективностью применения этих систем для таких задач ДЗЗ как измерение биомассы растительных покровов и подповерхностного зондирования. К сожалению, размещение этих систем в космосе сопровождается рядом технических проблем. Одной из основных является потеря когерентности вследствие эффектов распространения радиоволн УКВ диапазона через атмосферу Земли. Эти эффекты приводят к значительному снижению потенциального пространственного разрешения этих систем, геометрическим и поляризационным искажениям [1,2,4,7,8,10].

В последнее время рядом авторов предлагаются различные адаптивные алгоритмы формирования изображений, позволяющие преодолеть эти трудности, по крайней мере, в отношении достижения заданного пространственного разрешения [3,8]. Эти подходы основаны на использовании алгоритмов автофокусировки радиолокационных изображений. В большинстве случаев эти алгоритмы позволяют получить заданное высокое пространственное разрешение только по сюжетам, содержащим яркие точечные цели.

Т.о. достижение высокого разрешения в этих системах не является гарантированным. Кроме того, до сих пор остается открытым вопрос о потенциальном разрешении космических РСА с учетом влияния атмосферы при использовании подобной адаптивной техники обработки сигналов.

2. Восстановление РЛИ космической РСА

На основе анализа эффектов распространения сигнала РСА в атмосфере Земли в [4] были получены общие выражения, описывающие отраженный сигнал космической РСА:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t, kT) = & \iint g_a(kT - \theta, \sigma) g_r(\theta, \sigma) \xi(\theta, \sigma) \times \\ & \times \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} \dot{h}(j\omega) \cdot \dot{K}_n(j\omega) \cdot \dot{K}_{re}(j\omega) \times \\ & \times \exp(j(\omega_0 - \omega) \cdot (t - kT - \Delta t(kT - \theta, \sigma))) \times \\ & \times \exp(-j(\omega_0 - \omega) \cdot (kT, \theta, \sigma)) d\omega d\theta d\sigma. \end{aligned} \quad (1)$$

В этом выражении: $\xi(\theta, \sigma)$ — коэффициент отражения подстилающей поверхности; $\dot{h}(j\omega)$ — комплексная огибающая зондирующего сигнала; $\dot{K}_{re}(j\omega)$ — описывает рефракцию зондирующего сигнала в регулярной атмосфере; $\dot{K}_n(j\omega)$ — передаточная характеристика аппаратного тракта; $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$ — регулярная часть временного запаздывания сигнала в атмосфере; $\delta(kT, \theta, \sigma)$ — флуктуационная компонента временного запаздывания сигнала в турбулентной атмосфере; t, kT — координаты (задержка,

О.В. Горячкин

г. Самара, Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

номер зондирующего сигнала); θ, σ — координаты элемента подстилающей поверхности (азимут, дальность); g_A и g_R вещественные функции описывающие модуляцию сигнала ДН антенны РСА. Данная модель описывает все основные эффекты, приводящие к искажениям РЛИ вследствие эффектов распространения радиоволн в атмосфере Земли.

Задача восстановления $\xi(\theta, \sigma)$ была сформулирована как задача обращения оператора (1) при неизвестном (вследствие эффектов распространения) азимутальном и дальностном сечении ядра уравнения.

Алгоритм восстановления изображения РСА на основе адаптивной байесовской схемы предполагает использование максимально правдоподобной оценки неизвестного ядра оператора (1). В [3] предложен подход к непараметрической оценке ядра оператора свертки только по наблюдаемым сигналам. Суть данного подхода заключается в оценке неизвестного сечения импульсной характеристика канала РСА по статистикам второго порядка отраженного сигнала, которые содержат информацию об амплитуде и фазе передаточной функции канала при условии нестационарного входного воздействия.

Восстановление неизвестных фазовых флуктуаций непосредственно по (1) ограничено вследствие зависимости $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$ от задержки. В тоже время как было показано ранее в [3,5] обработка по дальности в рамках данного подхода не вызывает каких либо ограничений принципиального характера на разрешающую способность РСА.

Рассмотрим проблему получения изображения РСА в УКВ диапазоне в предположении, что оценка дальностного ядра проведена на первом этапе обработки с использованием алгоритма [3] и известна с достаточной точностью. Предположим также, что нам известна точная модель движения РСА и адекватная модель регулярной атмосферы [5].

Неизвестная для нас фаза атмосферных флуктуаций $\omega_0 \delta(\theta)$ образует в (1) разностное ядро при условии ограничения азимутального размера кадра при телескопическом режиме обзора в РСА (это было показано в [4,10,11] и в УКВ диапазоне составляет 15-25 км), но существенная зависимость $\Delta t(kT - \theta, \sigma)$ от задержки не дает нам эффективно воспользоваться тем же алгоритмом оценки, который мы использовали в сечении дальности. Поэтому покажем возможность компенсации этих искажений уже после проведения реконструкции изображения РСА на первом этапе обработки обычным способом. В этом случае модель искаженного изображения РСА можно представить в виде:

$$\dot{I}(\theta_0, \sigma_0) = \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \int_{\Delta t(0, \sigma) - T/2}^{\Delta t(0, \sigma) + T/2} \Psi(\theta, \theta_0, \sigma, \sigma_0) \dot{\eta}(\theta, \sigma) d\theta d\sigma, \quad (2)$$

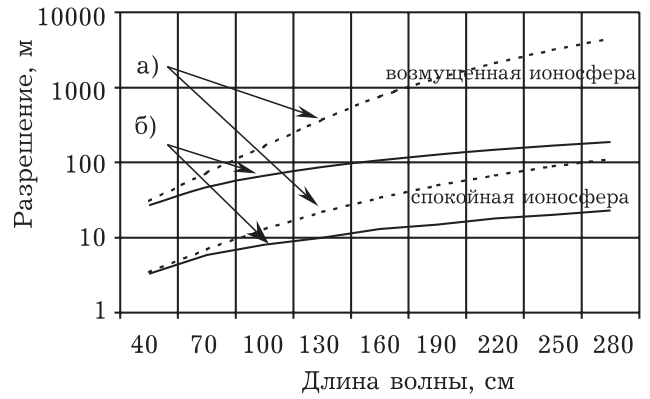


Рис. 1. Оценка потенциального пространственного разрешения РСА УКВ диапазона: а) для обычного алгоритма (1-й этап обработки); б) для адаптивного алгоритма (2-й этап обработки)

$$\begin{aligned} \Psi(\theta, \theta_0, \sigma, \sigma_0) &= \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \exp(j\omega_0 \delta(kT - \theta)) \times \\ &\times \dot{\Phi}(\Delta t(kT - \theta_0), \sigma_0) - \Delta t(kT - \theta, \sigma)) dkT, \\ \dot{\Phi}(t) &= \int \dot{K}_R(\tau) K_R^*(\tau - t) d\tau \cdot \exp(j\omega_0 t). \end{aligned}$$

При использовании соответствующей весовой обработки [6] основная энергия $\Psi(\theta, \theta_0, \sigma, \sigma_0)$ сосредоточена в области $(\Delta x, \Delta y)$, т.е. $|\Psi(\theta, \theta_0, \sigma, \sigma_0)| \approx 0$ если $|\theta - \theta_0| > \Delta x$ и $|\sigma - \sigma_0| > \Delta y$. Т.о., если выполняются ограничения:

$$\begin{cases} \Delta x < \Delta_A \Delta_R / \lambda, \\ \Delta y < \Delta_A^2 / \lambda, \end{cases} \quad (3)$$

то выражение (2) после соответствующей замены переменных [5] можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \dot{I}(\theta'_0, \sigma'_0) &= \iint \dot{\Phi}_A(\theta' - \theta'_0) \times \\ &\times \dot{\Phi}_R(\sigma' - \sigma'_0) \dot{\eta}(\theta', \sigma') d\theta' d\sigma', \end{aligned} \quad (4)$$

где: $\Delta_A \Delta_R$ — разрешающая способность РСА по азимуту и дальности соответственно, без учета влияния атмосферы. Вид выражения (4) означает, что мы можем применить алгоритм восстановления [3] не только в сечении дальности, но и в сечении азимута без каких либо принципиальных ограничений на потенциальную разрешающую способность, поскольку, как показано в [3], разрешение рассматриваемого алгоритма определяется только степенью нестационарности сигнала (размером кадра в РСА), числом накапливаемых реализаций и уровнем аддитивного шума.

4. Основные результаты и выводы

Полученные границы (3) позволяет ответить на вопрос о потенциальном разрешении непараметрической адаптивной техники синтеза апертуры, независящим от сюжета РЛИ.

На рис. 1 показаны результаты расчетов потенциального пространственного разрешения РСА для

случая спокойной ионосферы (дисперсия флуктуаций электронной плотности $\sigma_e = 0.001N_e$) и возмущенной ионосферы ($\sigma_e = 0.025N_e$). Отметим также, что полученные оценки пространственного разрешения не зависят от «исходного» разрешения РСА и определяются только параметрами атмосферы.

Полученные оценки свидетельствуют о перспективности подготовки и проведения в ближайшие годы соответствующего эксперимента по зондированию природных сред в УКВ диапазоне с борта Международной космической станции.

Литература

1. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Радиотехника и электроника. — 1992. — № 1. — С. 90-95.
2. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J. and other Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz // Radio Science (USA). — 1999. — Vol. 34. — № 1. — P. 257-268.
3. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. New Method for Wideband Low Frequency SAR Data Processing // Proceedings Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark. — 1997. — Vol. 2. — P. 147-154.
4. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. The Some Problems of Realization Spaceborne SAR's in P, UHF, VHF Bands // Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany. — 1999. — Vol. 2. — P. 1271-1273.
5. Goriachkin O.V. Estimations of the Maximum Spatial Resolution Space-borne VHF-band SAR for Adaptive Synthetic Aperture Techniques // Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA. — 2000. — Vol. 1. — P. 93-95.
6. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. — М.: Радиотехника, 2003. — 512 с.
7. Ефимов А.И., Калинин А.А., Кукуза Б.Г. Использование радиолокатора синтезированной апертуры Р-диапазона в космических экспериментах // Радиотехника. — 1998. — № 2. — С. 19-24.
8. Штейншлейгер В.Б., Дзенкевич А.В., Манаков В.Ю. и др. О разрешающей способности трансionoсферных РЛС для дистанционного зондирования Земли в УКВ-диапазоне волн // Радиотехника и электроника. — 1997. — Т. 42. — № 6. — С. 725-732.
9. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. — М.: Советское радио, 1972, — 160 с.
10. Горячкин О.В. Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. — 2002. — Вып. 24. — С. 177-183.
11. Горячкин О.В. Статистические характеристики фазовых флуктуаций траекторного сигнала трансionoсферных РЛС с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2003. — Т. 6. — № 3. — С. 33-38.

About Possibility of Achievement of High Spatial Resolution in Spaceborne VHF-Band SAR

O.V. Goriachkin

In the paper is showed an appropriate analysis for a non-parametrical adaptive algorithm of a SAR image reconstruction based on the use of the non-stationary model echo-signals SAR and so winnings of the non-parametrical adaptive techniques of SAR processing in comparison with conventional synthetic aperture techniques, at least, for VHF-band. Thus, maximum spatial resolution of the VHF-band SAR for adaptive non-parametrical techniques is $\sqrt{\Delta_c \lambda}$, where Δ_c — maximum resolution of the SAR subject to of the propagation effects.



Горячкин Олег Валериевич, 1965 года рождения. В 1988 году окончил радиотехнический факультет Куйбышевского авиационного института (специальность «радиотехника»). В 1988-2000гг. работал ведущим инженером-конструктором отдела радиотехнических систем Государственного Научно-производственного Ракетно-Космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Участвовал в разработке ряда авиационных и космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли различного назначения. В 1993 году окончил механико-математический факультет Самарского государственного университе-

та по специальности «прикладная математика». После окончания аспирантуры Поволжской государственной академии информатики, радиотехники и связи по специальности «системы и устройства радиотехники и связи» в 1997 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Обработка радиолокационных данных при априорной неопределенности характеристик пространственно-временного сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой». С 1999 г. доцент, с 2000 г. докторант кафедры теоретических основ радиотехники и связи ПГАТИ. Автор более 70 научных работ. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в системах радиотехники и связи, радиолокация с синтезированием апертуры, слепая идентификация систем.