

Radiotomography with scanning by arbitrary trajectory

Dmitry Ya. Sukhanov¹, Sergey N. Roslyakov¹

¹Tomsk State University
Tomsk, 634050, Russian Federation
sdy@mail.tsu.ru

Abstract: Proposed radio tomography-image restoration method based on measurements of unfilled monostatic single ultra-wideband radar, moving along an arbitrary three-dimensional trajectory. The developed solution is based on the method of approach and Stolt phase screen. Due to the application of the algorithm to the three-dimensional Fourier transform, strictly carrying out the restoration of radio images much faster than by diffraction summation during-the art. The proposed solution is checked by numerical simulation and experiment.

Keywords. radar, radio tomography, inverse problems, local three-dimensional positioning

Радиотомография со сканированием по произвольной траектории

¹Суханов Д.Я., ¹Росляков С.Н.

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского Томский государственный университет
г. Томск, 634050, Российская Федерация
sdy@mail.tsu.ru

Аннотация: Предлагается метод восстановления радиотомографических изображений на основе незаполненных измерений одиночным моностатическим сверхширокополосным радиолокатором, перемещающимся по произвольной трёхмерной траектории. Разработанное решение основано на методе Столта и приближении фазового экрана. За счёт применения алгоритма трёхмерного быстрого преобразования Фурье восстановление радиоизображений осуществляется намного быстрее, чем методом дифракционного суммирования во временной области. Предложенное решение проверено путём численного моделирования и экспериментально.

Ключевые слова: радиолокация, радиотомография, обратные задачи, локальное трёхмерное позиционирование.

Copyright © 2016 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes.
Proceedings of the 26th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2016)
Sevastopol, Russia, September 4—10, 2016

1. Введение

Подповерхностное радиозондирование в настоящее время находит широкое применение для обнаружения и визуализации объектов, скрытых под поверхностью земли, в стенах или строительных конструкциях. Наиболее высокое разрешение позволяют получить методы зондирования, основанные на технологии радара с синтезируемой апертурой. Данная технология требует проведения радиоизмерений в различных точках некоторой поверхности, линейные размеры которой больше расстояния до зондируемого объекта. Для этого возможно применение антенных решёток, однако данное решение является весьма дорогостоящим. Другой подход основан на пространственном сканировании одиночным радиолокатором. В этом случае для корректной обработки и восстановления радиоизображений необходима оценка координат радиолокатора в процессе сканирования. Точность оценки координат при этом должна быть не хуже четверти длины волны. Для позиционирования радиолокатора может использоваться технология GPS, позволяющая определить его координаты с точностью до сантиметра. Однако, для частот зондирования порядка 10 ГГц и выше, предпочтительных для получения радиоизображений высокого разрешения, данной точности недостаточно. Кроме того, GPS не работает в помещениях, и при наличии препятствия для сигнала со спутника. В таких случаях применяются системы локального позиционирования [1-4]. Возможно применение лазерных, ультразвуковых или радиоволновых технологий позиционирования [1-3]. Однако подобные технологии требуют применения специализированного калиброванного оборудования, что приводит к удорожанию системы подповерхностного радиозондирования. Одним из наиболее доступных способов позиционирования является позиционирование по видеоизображению [4]. Например, возможно размещение на георадаре определённого уникального контрастного изображения (маркера), которое легко распознаётся на растровом изображении с видеокамеры. При этом видеокамера размещается в фиксированной точке. По одному растровому изображению маркера возможно определить его трёхмерное положение. Точность позиционирования зависит от разрешения камеры и дальности до маркера.

В данной работе предлагается быстросействующий метод восстановления радиоизображений по сверхширокополосным радиолокационным сигналам измеренным моноэлектронным радиолокатором перемещаемым по произвольной трёхмерной траектории, при этом координата радиолокатора определяется системой локального позиционирования.

2. Метод повышения разрешения магнитоиндукционных изображений

Предлагается рассмотреть схему измерений представленную на рис. 1. Радиолокатор с установленным на нём маркером перемещается по произвольной траектории, в то время как видеокамера фиксирует изображения маркера для каждого положения радиолокатора, что обеспечивает трёхмерное позиционирование. С определённым периодом радиолокатор производит зондирование среды сверхширокополосными сигналами и принимает рассеянный сигнал.

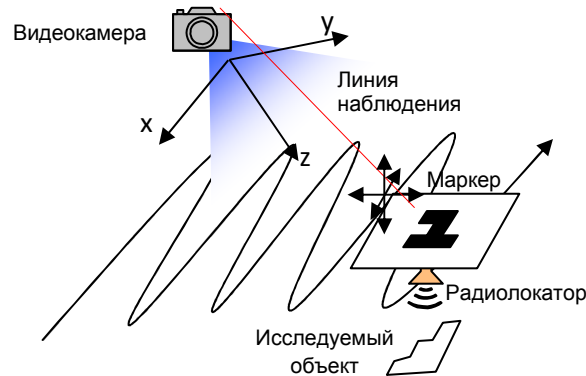


Рис.1. Схема радиозондирования измерений с произвольным перемещением радиолокатора

Для восстановления радиоизображений предлагается применить метод Слотта [6]. Но данный метод применим только для случая сканирования по плоскости. Предлагается предварительно скорректировать данные измерений в приближении фазового экрана. Обозначим измеренное поле функцией $S_n(X_n, Y_n, Z_n, \omega)$, где (X_n, Y_n, Z_n) – координаты радиолокатора в процессе измерений, ω – частота зондирующего сигнала. Пусть $z=0$ – является средней высотой для всех точек перемещения радиолокатора. Вычислим скорректированное поле на плоскости $z=0$ в дискретной пространственной сетке по формуле:

$$U(x, y, \omega) = \begin{cases} S_n(\omega) e^{-i2kZ_n} & \text{если } \left\lfloor \frac{x}{\Delta x} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{X_n}{\Delta x} \right\rfloor \text{ и } \left\lfloor \frac{y}{\Delta y} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{Y_n}{\Delta y} \right\rfloor, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}$$

где $k = \omega/c$ – волновое число, c – скорость света, $\lfloor \dots \rfloor$ – операция округления вниз; Δx , Δy – шаг пространственной сетки по осям x и y . Восстановление трёхмерного радиоизображения согласно методу Столта осуществляется по формуле:

$$P(x, y, z) = \int_{k_{z_{\min}}}^{k_{z_{\max}}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}\left(k_x, k_y, \frac{c}{2} \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}\right) e^{-ik_x x - ik_y y - ik_z z} \frac{ck_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}} dk_x dk_y dk_z,$$

где $\tilde{U}(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, \omega) \exp(ik_x x + ik_y y) dx dy$ – пространственный спектр скорректированного измеренного поля.

Для проверки данного метода, было проведено численное моделирование точечного рассеивателя в среде, на глубине 30 см при зондировании в полосе частот от 6 до 10 ГГц. Траектория сканирования случайна с максимальным разбросом высот 15 см (рис. 2).

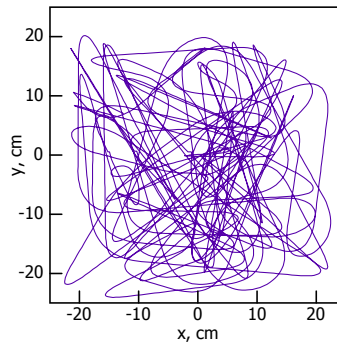


Рис. 2. Моделируемая траектория сканирования с максимальным разбросом высот 15 см.

Fig. 1. Modeled trajectory of scanning with maximum deviation 15 cm

После обработки методом Столта смоделированных данных без учёта разброса по высоте было восстановлено изображение точечного рассеивателя, представленное на рис. 3а. Видно, что рассеиватель не визуализируется. После корректировки поля в приближении фазового экрана было получено изображение рассеивателя, представленное на рис. 3б.

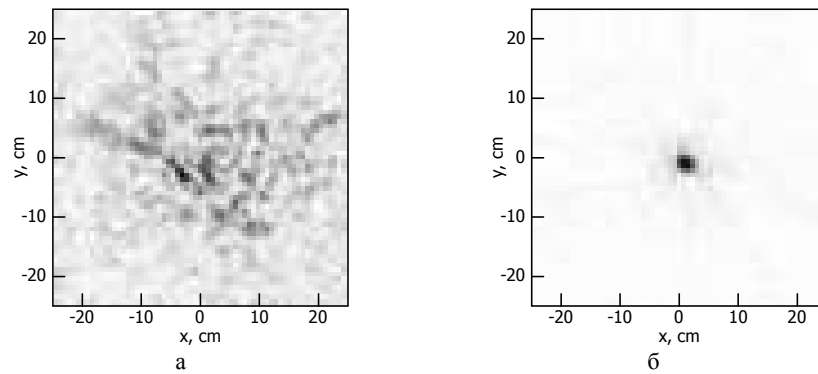


Рис. 3. Восстановление изображения точечного рассеивателя
(а – без учёта разброса по высоте сканирования;
б – с учётом разброса по высоте в приближении фазового экрана).
Fig. 3. Reconstruction of image of point scatterer
(a – not considering height deviation of scanning trajectory;
b – considering of height deviation with approximation of phase screen)

Видно, что учёт высоты радиолокатора в приближении фазового экрана позволяет значительно снизить уровень артефактов и восстановить изображение рассеивателя.

3. Экспериментальная проверка метода

Для экспериментальной проверки предложенного метода был разработан ручной радиолокатор с перестраиваемым по частоте генератором от 6 до 10 ГГц [7] и радиоголографическим принципом измерений [8] (рис. 4). Позиционирование радиолокатора производилось по видеонаблюдению маркера.



Рис. 4. Фотография ручного радиолокатора с позиционированием по маркеру
Fig. 4. Photo of handheld radar with marker positioning

Был проведён эксперимент по зондированию металлической сферы диаметром 5 см. Траектория сканирования представлена на рис. 5а. В результате обработки данных эксперимента было получено радиоизображение металлической сферы – рис.5 б.

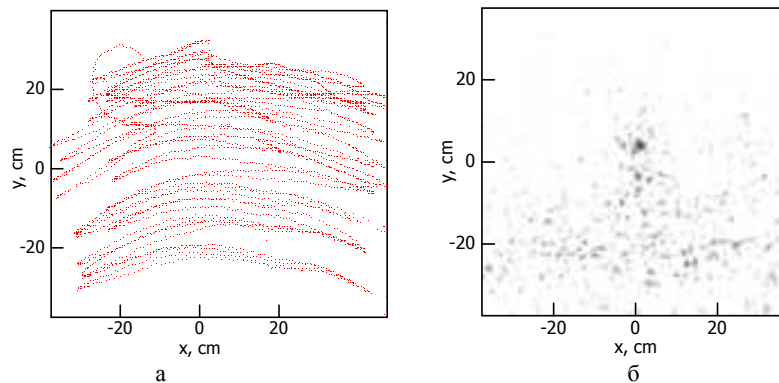


Рис. 5. Траектория сканирования (а) и результат обработки (б)
Fig. 5. Scanning trajectory (a) and processing results (b)

Объект визуализируется, однако уровень артефактов достаточно высок, что связано с неточностью позиционирования радиолокатора и разреженностью синтезируемой апертуры.

4. Заключение

Предложен метод учёта неплоской траектории движения радиолокатора для метода Столта в приближении фазового экрана. Метод проверен численно и экспериментально в диапазоне частот от 6 до 10 ГГц и показал возможность восстановления радиоизображений при неплоской траектории сканирования. Появление артефактов связано с не заполненностью апертуры и неточностью определения координат радиолокатора.

Источники финансирования и выражение признательности

Статья написана в рамках научного проекта (№ НУ 8.1.12.2015 Л), выполненного при поддержке Программы «Научный фонд Томского государственного университета им. Д.И. Менделеева» в 2014- 2016 гг.

Список литературы

[1] Holm S. Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength // IEEE Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), International Conference on. 2012. P. 1-6.

Copyright © 2016 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes.
Proceedings of the 26th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2016)
Sevastopol, Russia, September 4—10, 2016

- [2] Grasmueck M., Viggiano D.A. Integration of Ground-Penetrating Radar and Laser Position Sensors for Real-Time 3-D Data Fusion // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, January 2007. Vol. 45. No. 1. – P. 130-137.
- [3] Hartmann B., Link N., Trommer G.F. Indoor 3D position estimation using low-cost inertial sensors and marker-based video-tracking // *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, IEEE/ION. 2010. P. 319-326.
- [4] Borstell H., Pathan S., Cao L., Richter K., Nykolaychuk M. Vehicle Positioning System based on passive planar image markers // *2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. October 2013. P. 1-9.
- [5] Yakubov V. P., Sukhanov D. Ya. Solution of a subsurface radio-imaging inverse problem in the approximation of a strongly refractive medium // *Radiophysics and quantum electronics*, vol. 50, Issue 4, pp. 299–307.
- [6] Stolt R.H. Migration by Fourier transform // *Geophysics*, vol. 43, no. 1, pp. 23-48, 1978.
- [7] Sukhanov D. Ya., Yakubov V. P. Application of linear frequency modulated signals in three-dimensional radio tomography // *Technical physics*, vol. 55, Issue 4, pp. 546-550.
- [8] Sukhanov D. Ya., Zav'yalova K.V. Reconstruction of 3D radio images from multifrequency holographic measurements // *Technical physics*, vol. 57, Issue 6, Jun 2012. pp: 819-823.

References

- [1] Holm S. Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength. *IEEE Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, *International Conference on*, 2012. pp. 1-6.
- [2] Grasmueck M., Viggiano D.A. Integration of Ground-Penetrating Radar and Laser Position Sensors for Real-Time 3-D Data Fusion. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, January 2007. Vol. 45. No. 1. pp. 130-137.
- [3] Hartmann B., Link N., Trommer G.F. Indoor 3D position estimation using low-cost inertial sensors and marker-based video-tracking. *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, IEEE/ION., 2010. pp. 319-326.
- [4] Borstell H., Pathan S., Cao L., Richter K., Nykolaychuk M. Vehicle Positioning System based on passive planar image markers. *2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, October 2013. P. 1-9.
- [5] Yakubov V. P., Sukhanov D. Ya. Solution of a subsurface radio-imaging inverse problem in the approximation of a strongly refractive medium. *Radiophysics and quantum electronics*, vol. 50, Issue 4, pp. 299–307.
- [6] Stolt R.H. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, vol. 43, no. 1, pp. 23-48, 1978.
- [7] Sukhanov D. Ya., Yakubov V. P. Application of linear frequency modulated signals in three-dimensional radio tomography. *Technical physics*, vol. 55, Issue 4, pp. 546-550.
- [8] Sukhanov D. Ya., Zav'yalova K.V. Reconstruction of 3D radio images from multifrequency holographic measurements. *Technical physics*, vol. 57, Issue 6, Jun 2012. pp: 819-823.