

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЫСТРЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАПИСИ РАДИОГОЛОГРАММЫ

Гвоздарев А. С., Кузнецов Е. А., Артёмов Т. К.

(Россия, Ярославль)

Предлагается метод быстрого вычисления преобразований сигналов в радиологических системах, основанный на применении модифицированного метода стационарной фазы для сведения преобразования интегральной формы к преобразованию, использующему БПФ. Построена модель и определена ошибка определения объектного поля. Оценены размеры области сканирования, при которых данная ошибка не превосходит заданной величины. Проводится сравнение вычислительной эффективности предложенного метода по сравнению с полным интегральным преобразованием.

Введение. В настоящее время существует потребность в радиологических системах получения объёмных изображений объектов, находящихся в сложной радиолокационной обстановке, в том числе на близких расстояниях за препятствиями. Они измеряют амплитуду и фазу рассеянного объектом электромагнитного поля в области сканирования приёмными антеннами, и по этим данным на основе построения математической модели физических процессов осуществляется цифровое восстановление изображения [1]. Задача определения восстановленного по голограмме поля, как и обратная ей задача моделирования голограммы и распространения поля, рассеянного объектом, являются вычислительно сложными. Поэтому время восстановления определяет быстродействие цифровой части системы и является критичным фактором при работе в масштабе реального времени. При этом сведение ядра пространственного преобразования сигналов к

двумерному быстрому преобразованию Фурье (БПФ) [2] в самом интересном случае ближней локации даёт, как показали проведённые нами теоретические экспериментальные исследования, недопустимые искажения в изображении, а алгоритмы, основанные на использовании априорных сведений о симметрии объекта [3], применимы лишь в частных случаях.

Мы предлагаем применять для быстрого определения преобразованных радиоголографической системой пространственных сигналов метод стационарной фазы, ограничиваясь, однако, не первым, а вторым порядком малости при разложении числителя и знаменателя ядра преобразования.

Постановка задачи. Пусть взаимное расположение объекта и приёмника описывается в декартовой системе координат радиус-векторами \vec{r}_{uo} , \vec{r}_{on} и расстояниями источник-объект z_{uo} и объект приёмник z_{on} вдоль оси z , направленной по ходу электромагнитных волн от источника к объекту. Пусть объект, занимающий объём $V_{об}$ и описывающийся бистатической диаграммой рассеяния $\dot{\sigma}(\vec{r}_{uo}, \vec{r}_{on})$, заданной в фазовом центре рассеяния (радиус-вектор \vec{r}_{yn}), облучается монохроматическим сигналом с длиной волны λ от источника в составе радиоголографической системы, создающего амплитудно-фазовое распределение \dot{E}_0 у своей поверхности. При условии, что объект находится в дальней зоне источника, источник можно считать точечным. Тогда результат рассеяния на объекте облучающего поля $\dot{E}_0 \dot{T}_1(\vec{r}_{uo})$, наблюдаемый в области регистрации, представляет собой свёртку объектного поля $\dot{E}_0 \dot{T}_1(\vec{r}_{uo}) \dot{\sigma}(\vec{r}_{uo}, \vec{r}_{on})$ и ядра преобразования свободного пространства [4]:

$$\dot{E}_1(\vec{r}_{on}) = \int_{V_{об}} \dot{E}_0 \dot{T}_1(\vec{r}_{uo}, \vec{r}_{on}) \dot{\sigma}(\vec{r}_{uo}, \vec{r}_{on}) dV_{об}, \quad (1)$$

где ядро преобразования радиоголографической системы

$$\dot{T}(\vec{r}_{uo}, \vec{r}_{on}) = \dot{T}_1(\vec{r}_{uo}) \dot{T}_2(\vec{r}_{on}) = \frac{\exp(ikr_{uo})}{r_{uo}} \frac{\exp(ikr_{on})}{r_{on}}, \quad (2)$$

а $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число.

Модель регистрируемого поля (1) с ядром (2) требует высоких временных затрат. Однако, рассматривая объект в виде совокупности плоскопараллельных сечений (как в многочастотной радиоголографии) возможно произвести некоторые упрощения. Тогда поле запишется в виде:

$$\dot{E}_1(\vec{r}_{on}) = \dot{\sigma}(\vec{r}_{in}) \mathbf{F}_D \left\{ \mathbf{L} \left\{ \mathbf{FFT} \left[\exp \left(-\frac{ik\rho_{o\sigma}^2}{2} \left[\frac{1}{z_{uo}} + \frac{1}{z_{on}} \right] \right) \right] \right\} \right\}, \quad (3)$$

где операция вычисления БПФ выполняется для каждого из предварительно рассчитываемых сечений объекта по дальности с фиксированными в сечении расстояниями z_{uo} и z_{on} ; \mathbf{L} — оператор фокусировки, учитывающий фокусировку, как источника, так и изображения:

$$\mathbf{L} = \exp \left\{ -ik \left(\frac{\rho_{ucm}^2}{2z_{uo}} + \frac{\rho_{np}^2}{2z_{on}} \right) \right\},$$

$\rho_{ucm}, \rho_{o\sigma}, \rho_{np}$ — полярные вектора в плоскостях сечений источника, объекта и приёмника соответственно; а представляемый с помощью конечных разностей дифференциальный оператор \mathbf{F}_D описывается следующим выражением:

$$\mathbf{F}_D = \left\{ 1 + \frac{i}{k} \left(\frac{\partial}{\partial z_{uo}} + \frac{\partial}{\partial z_{on}} \right) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial z_{ou} \partial z_{on}} \right) \right\}. \quad (4)$$

Для анализа возможности применения данного метода на практике была получена формула, характеризующая связь между

относительной ошибкой регистрируемого поля δ и ошибкой разложения исходного интегрального ядра преобразования α :

$$\begin{cases} \delta = \alpha \left[\mathbf{F}_D \{ \mathbf{FFT} \{ \boldsymbol{\beta} \{ \sigma_{sc} \} \} \} - \mathbf{FFT} \{ \boldsymbol{\beta} \{ \mathbf{F}_D \{ \sigma_{sc} \} \} \} \right], \\ \boldsymbol{\beta} = \mathbf{L} \left\{ \exp \left(-ik\rho_{об}^2 \left[\frac{1}{2z_{uo}} + \frac{1}{2z_{on}} \right] \right) \right\} \end{cases} \quad (5)$$

Результаты моделирования. Возможности метода исследовались на модели записи рассеянного поля для следующих объектов. Три незатеняющих друг друга прямоугольных пластины размерами $20\lambda \times 20\lambda$, где длина волны составляла 8 мм (рис.1), разнесенные на расстояние $5/4\lambda$ по дальности, облучались изотропным излучателем, находящимся на расстоянии 80 м от объектов и расположенным симметрично относительно объектов (в центре рис. 1).

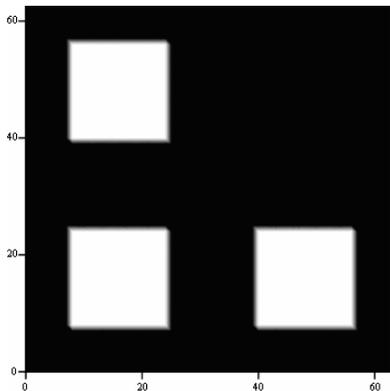


Рис. 1. Исходные объекты

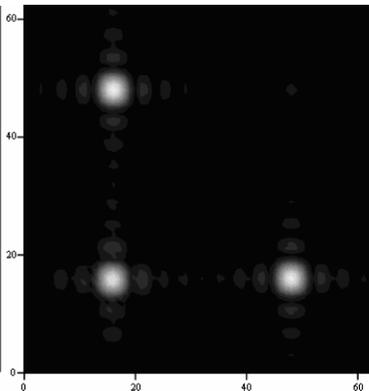


Рис. 2. Результат вычисления амплитуды поля по предложенному алгоритму

При этом были получены величины полного и приближённого полей с учётом ошибки (рис. 2).

Выражение (5) позволяет оценить диаметр области регистрации, в которой замена исходного интегрального преобразования (1) с ядром (2) на преобразование (3), использующее алгоритм БПФ, даёт ошибку, не превышающую заданную. Для объектов, приведённых на рис. 1, при наложении ограничения в 2,5%, была получена зависимость диаметра рабочей области сканирования от расстояния между объектом и источником (рис. 3).

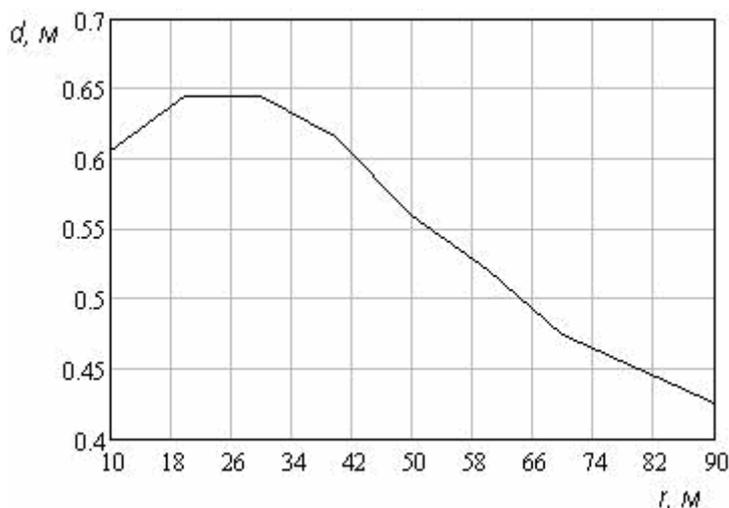


Рис. 3. Зависимость диаметра зоны, в которой ошибка разложения не превосходит заданного порогового значения (d), от расстояния между объектом и источником (r).

По результатам проведённого теоретического исследования и моделирования видно, что в моделях системы радиовидения, обеспечивающей на данном расстоянии удовлетворительное разрешение (порядка 10 см), то есть, имеющей размеры около 1–2 м, предлагаемое упрощение является допустимым, т.к. ошибка в величине поля составляет единицы процентов. В силу симметричности процессов записи–восстановления радиоголограммы можно полагать, что при восстановлении с использованием БПФ по точным данным ошибка не будет превышать определённой в

соответствии с (5) величины.

Погрешность определения рассеянного объектов поля в области регистрации можно рассматривать и как погрешность модели, и как некую погрешность измерений величины точно известного в точках приёма поля. При этом, как показано в работе [5], объектное поле, зарегистрированное с погрешностью, на которую налагается ограничение порядка единиц процентов, даёт визуально невоспринимаемые наблюдателем искажения в восстановленном по радиоголограмме изображении.

Также было проведено сравнение времени работы классического (рис. 4, отмечено кружочками) и предложенного (крестиками) алгоритмов для различного количества точек в плоскости регистрации. Расчеты производились на базе платформы PC AMD Duron 1 ГГц, 256 Мб ОЗУ.

Как видно, время вычисления можно значительно сократить, используя предложенный нами алгоритм.

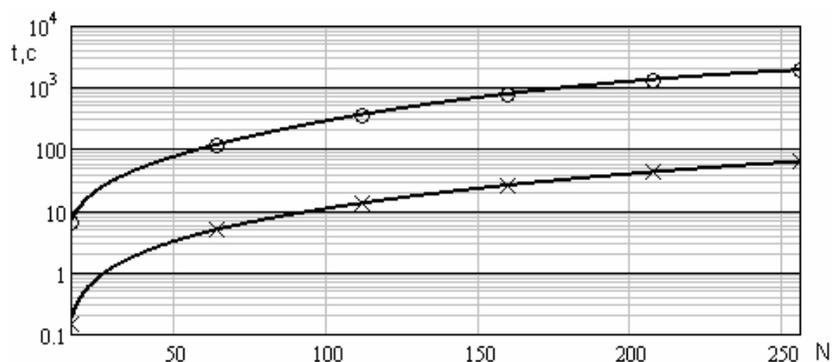


Рис. 4. Сравнение времени работы алгоритмов при определении регистрируемого поля

Заключение. Нами рассмотрена возможность упрощения математической модели процессов записи и восстановления радиоголограммы за счёт сведения интегрального ядра преобразования радиоголографической системы к ядру преобразования Фурье. Получено выражение для оценки размеров области реги-

страции голограммы, в которой использование такого упрощения даёт ошибку, не превышающую заданную. Показано, что для случая ближней локации и объектов, имеющих небольшие поперечные размеры, предлагаемое упрощение вполне применимо. Так же было проведено моделирование процесса записи и восстановления радиоголограммы с использованием классического и предложенного алгоритмов. Сравнение времени работы рассматриваемых алгоритмов приводит к заключению о том, что предлагаемое упрощение не только возможно, но и целесообразно использовать на практике, так как оно приводит к заметному выигрышу в вычислительной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.Д. Бахрах, А.П. Курочкин Голография в микроволновой технике. — М.: Советское радио, 1979.
2. Сафронов Г.С., Сафронова А.П. Введение в радиоголографию. — М.: Сов. радио, 1974.
3. Воронин Е.Н., Воронин И.Н. Радио- и акустическая избирательная голография. — М.: МАКС Пресс, 2006. — 535 с.
4. Зверев В.А. Радиооптика. — М.: Сов. радио, 1975.
5. Артёмова Т.К., Боков М.А., Гвоздарёв А.С., Кузнецов Е.А. Исследование влияния погрешностей измерения радиоголограммы на качество восстановленного изображения // Материалы межд. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2006. — Воронеж. — Т. 3. — С. 1961 – 1968.

FAST ALGORITHM IMPLEMENTATION IN RADIOHOLOGRAM REGISTRATION SIMULATION

Gvozdayev A. S., Kuznetsov E. A., Artyemova T. K.

(Russia, Yaroslavl)

An implementation of stationary phase method modification for the radioholographic system integral transformation kernel reduction to Fourier kernel of transformation is examined. Radiohologram recording simulation implying the proposed method was performed. As a result an area, in which the deviation between the field recorded with the help of the proposed simplification and without it, does not exceed given in advance bound is estimated. Computational efficiency of both methods, the classical and the proposed one, are compared.