

DOI: 10.17725/rensit.2020.12.429

Методы расчета радиоголограмм объемных объектов

Голунов В.А., Коротков В.А.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru/>

Фрязино 141190, Московская обл., Российская Федерация

E-mail: golsnow@mail.ru

Поступила 17.07.2020, рецензирована 27.07.2020, принята 10.08.2020

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым

Аннотация: В работе предложен метод расчета радиоголограмм для объемных объектов, основанный на представлении объектов в виде ансамблей виртуальных точечных источников, распределенных на множестве параллельных плоскостей. Предложенный метод является развитием известного метода, в котором объекты представляются в виде ансамбля точечных рассеивателей. Возможности предложенного метода показаны на примере расчета голограммы фрагмента сферы, на котором случайным образом выбраны 1000 точек, в которых рассеивается излучение, исходящее из центра сферы. Расчеты выполнены для диапазона частот 2...100 ГГц при радиусе сферы 0.5 м, размере двумерной голограммы 0.65×0.65 м и количестве пикселей 512×512. Показано, что в сравнении с известным методом предложенный метод позволяет рассчитывать амплитуду голограммы с удовлетворительной точностью, если виртуальные источники размещать на параллельных плоскостях в количестве свыше 64-х штук. В случае объектов, требующих представления в виде ансамбля точечных рассеивателей в количестве свыше 1000 штук, предложенный метод при расчете их голограмм оказывается существенно производительнее, чем известные методы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, радиоголограммы, объемные объекты, точечные рассеиватели, виртуальные точечные источники, параллельные плоскости, сфера
УДК 621.396

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Для цитирования: Голунов В.А., Коротков В.А. Методы расчета радиоголограмм объемных объектов. РЭНСИТ, 2020, 12(4):429-436. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.429.

Methods for Calculating Radio Holograms of Volumetric Objects

Valery A. Golunov, Vadim A. Korotkov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino branch, <http://fire.relarn.ru/>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian FederationE-mail: golsnow@mail.ru

Received July 07, 2020; peer reviewed July 27, 2020; accepted August 10, 2020

Abstract: A method for calculating holograms for volumetric objects based on the representation of objects in the form of ensembles of virtual point sources distributed on a set of parallel planes has been proposed. The proposed method is the development of the well-known method in which objects are represented as ensemble of real point scatterers. The possibilities of the proposed method are demonstrated by calculating a hologram of a fragment of a sphere, on which 1000 points are randomly selected, at which radiation emanating from the center of the sphere is scattered. The choice of a fragment of a sphere as an object under study is due to the fact that when calculating its hologram, phase errors inherent in approximate calculations are most pronounced. The calculations were performed for the frequency range of 2...100 GHz, the sphere radius of 0.5 m, a two-dimensional hologram size of 0.65×0.65 m, and a pixel count of 512×512. It is shown that,

in comparison with the known method, the proposed method makes it possible to calculate the amplitude of a hologram with satisfactory accuracy if virtual sources are placed on parallel planes in an amount of more than 64 pieces. In the case of objects that require representation in the form of an ensemble of point scatterers in the amount of more than 1000 pieces, the calculation of their holograms by the proposed method turns out to be much more efficient than the known method.

Keywords: computer modeling, radio holograms, volumetric objects, point scatterers, virtual point sources, parallel planes, sphere

UDC 621.396

Acknowledgements: The work was carried out according to the state order of the Kotelnikov IRE RAS.

For citation: Valery A. Golunov, Vadim A. Korotkov. Methods for Calculating Radio Holograms of Volumetric Objects. *RENSIT*, 2020, 12(4):429-436. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.429.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (430)
 2. МЕТОД ТОЧЕЧНЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ (МЕТОД 1) (430)
 3. МЕТОД ВИРТУАЛЬНЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ НА ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ (МЕТОД 2) (431)
 4. МЕТОД ВИРТУАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА МНОЖЕСТВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ (МЕТОД 3) (431)
 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РАДИОГОЛОГРАММ МЕТОДАМИ 1, 2, 3 (432)
 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТОВ ГОЛОГРАММ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ (434)
 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (435)
- ЛИТЕРАТУРА (435)

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений решения таких задач радиолокации, как обнаружение, определение координат местоположения и формы объектов, является радиоголография [1]. Получение радиоголограмм экспериментальными методами связано с измерением полей, рассеянных реальными объектами, что, как правило, достаточно трудоемко. В ряде случаев альтернативным методом может быть расчет радиоголограмм на основе компьютерного моделирования рассеяния электромагнитных волн объектами с заданными свойствами.

К настоящему времени не существует аналитического решения задачи рассеяния волн объектом произвольной формы. В общем случае рассеянное объектом поле рассчитывается на основе теоремы Кирхгофа [2-5]. Другим способом моделирования радиоголограмм является расчет на основе представления объекта в виде набора точечных рассеивателей [6]. В случае, если эти рассеиватели лежат на одной плоскости, можно воспользоваться свойством Фурье образа свертки и использовать для расчета быстрое преобразование Фурье (БПФ) [1]. Однако, если объекты не плоские, то использование БПФ затруднительно.

Цель данной работы состоит в развитии метода расчета радиоголограмм объемных объектов, который основан на их представлении в виде набора точечных рассеивателей.

2. МЕТОД ТОЧЕЧНЫХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ (МЕТОД 1)

Представим исследуемый объемный объект в виде ансамбля точечных рассеивателей, как показано на **рис. 1**, а источник излучения расположим в точке I . Пусть рассеянное поле измеряется в пределах прямоугольника $ABCD$, центр H которого

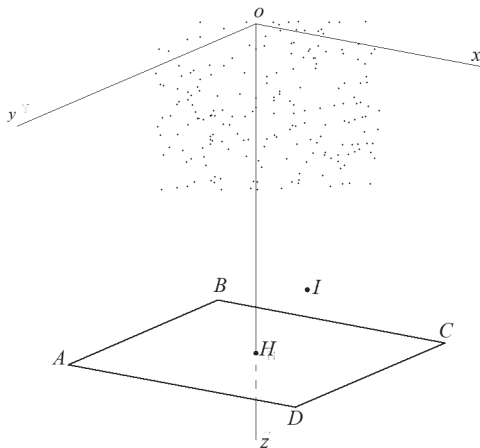


Рис. 1. Схема измерения голограммы объекта, представленного в виде ансамбля точечных рассеивателей.

находится на оси OZ .

Поле, измеренное в точке (x_p, y_p, z_p) , можно оценить в приближении Гюйгенса-Френеля [1]:

$$E(\vec{r}_h) = E_0 \sum_{n=0}^{M-1} \beta(\vec{r}_n) \frac{\exp(ik|\vec{r}_l - \vec{r}_n|)}{|\vec{r}_l - \vec{r}_n|} \frac{\exp(ik|\vec{r}_h - \vec{r}_n|)}{|\vec{r}_h - \vec{r}_n|}, \quad (1)$$

где M – количество точечных рассеивателей; $\vec{r}_l, \vec{r}_n, \vec{r}_h$ – векторы координат положения источника, n -го рассеивателя и приемника соответственно; E_0 – амплитуда источника; $\beta(\vec{r}_n)$ – коэффициент отражения (рассеяния) n -ого рассеивателя [1].

3. МЕТОД ВИРТУАЛЬНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ НА ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ (МЕТОД 2)

Представим, что каждому точечному рассеивателю объекта соответствует виртуальный источник сферической волны на плоскости $PQRS$, показанной на рис. 2. Координаты x, y рассеивателя и виртуального источника совпадают, а фаза волны виртуального источника корректируется с учетом ее набега на отрезке от рассеивателя до виртуального источника.

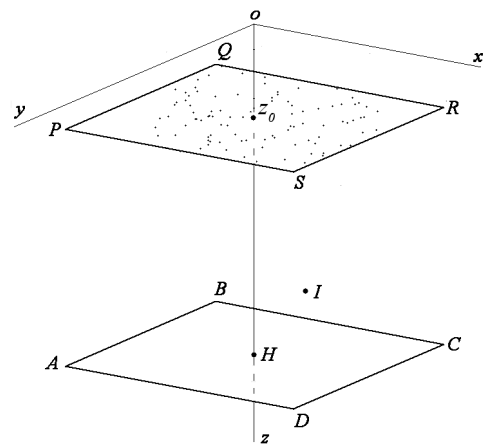


Рис. 2. Схема измерения голограммы объекта в виде ансамбля виртуальных источников на плоскости $PQRS$ при их облучении из точки I .

Поле, измеренное в точке (x_p, y_p, z_p) на плоскости $ABCD$, можно оценить с учетом коррекции фазы виртуальных источников относительно соответствующих им точечных рассеивателей с помощью следующего соотношения, аналогичного соотношению (1):

$$E_1(\vec{r}_h) = E_0 \sum_{n=0}^{M-1} \beta(\vec{r}_n) \frac{\exp(ik|\vec{r}_l - \vec{r}_n|)}{|\vec{r}_l - \vec{r}_n|} \frac{\exp(ik|\vec{r}_h - \vec{r}_n|)}{|\vec{r}_h - \vec{r}_n|} \exp(i|\vec{r}_n' - \vec{r}_n|), \quad (2)$$

где \vec{r}_n' – вектор координат n -го виртуального источника, $|\vec{r}_n' - \vec{r}_n| = |z_0 - z_n|$ – расстояние между плоскостью $ABCD$ и n -ым точечным рассеивателем, $|\vec{r}_h - \vec{r}_n'| = \sqrt{(x_h - x_n)^2 + (y_h - y_n)^2 + (z_h - z_0)^2}$ – расстояние между приемником и n -ым виртуальным источником.

Выражение (2) можно вычислить с помощью быстрого преобразования Фурье.

4. МЕТОД ВИРТУАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА МНОЖЕСТВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ (МЕТОД 3)

Из анализа (2) следует, что при значительном размере объекта вдоль оси OZ будут увеличиваться погрешности расчета голограммы по сравнению с методом 1.

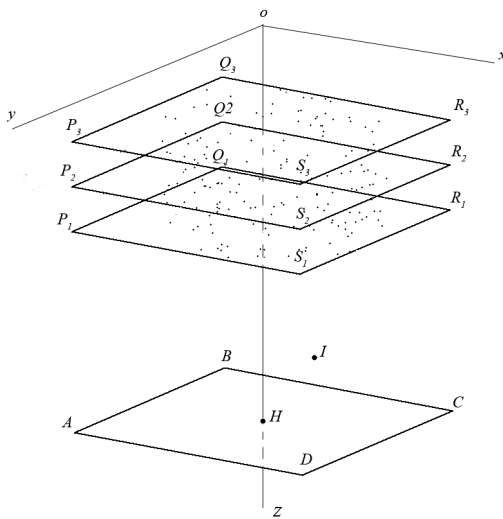


Рис. 3. Схема измерения голограммы объекта в виде ансамбля виртуальных источников на плоскостях $P_1Q_1R_1S_1$, $P_2Q_2R_2S_2$, $P_3Q_3R_3S_3$ при их облучении из точки I.

Для уменьшения ошибок спроектируем точечные рассеиватели, из которых состоит объект, на ряд параллельных плоскостей, например, на три плоскости $P_1Q_1R_1S_1$, $P_2Q_2R_2S_2$, $P_3Q_3R_3S_3$, как показано на рис. 3, так, чтобы на каждой плоскости были расположены виртуальные источники, соответствующие близлежащим к ним точечным рассеивателям.

Тогда поле в точке (x_h, y_h, z_h) можно оценить с учетом указанной выше коррекции фазы следующим образом:

$$E_1(\vec{r}_h) = E_0 \sum_{p=0}^{N_p-1} \sum_{n=0}^{M_{np}-1} \beta(\vec{r}_n) \frac{\exp(ik|\vec{r}_l - \vec{r}_n|) \exp(ik|\vec{r}_h - \vec{r}'_{np}|) \exp(i|\vec{r}'_{np} - \vec{r}_n|)}{|\vec{r}_l - \vec{r}_n| |\vec{r}_h - \vec{r}'_{np}|}, \quad (3)$$

где $|\vec{r}'_{np} - \vec{r}_n| = |z_{op} - z_n|$ – расстояние между плоскостью $P_pQ_pR_pS_p$ и n -ым точечным рассеивателем, $|\vec{r}_h - \vec{r}'_{np}| = \sqrt{(x_h - x_{np})^2 + (y_h - y_{np})^2 + (z_h - z_{op})^2}$ – расстояние между приемником и np -ым виртуальным источником, являющимся проекцией n -ого точечного источника на плоскость $P_pQ_pR_pS_p$, N_p и M_{np} – соответственно количество плоскостей и количество виртуальных источников на каждой плоскости.

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА РАДИОГОЛОГРАММ МЕТОДАМИ 1, 2, 3

Для сравнения эффективности расчетов радиоголограмм рассмотренными выше методами в качестве тестового объекта выберем часть металлической сферы, которая, как показано на рис. 4, облучается сферической волной из точки, лежащей в центре сферы.

Выбор такого тестового объекта обусловлен свойством сферы фокусировать в ее центре волны, излучаемые из ее же центра. Следовательно, в качестве критерия эффективности применения сравниваемых методов можно принять их способность в результате расчетов обеспечивать высококачественную фокусировку рассеянного излучения.

При дальнейших расчетах примем, что длина волны излучения $\lambda = 0.0025$ м, радиус сферы $R = 0.5$ м, размеры двумерной голограммы составляют 0.65×0.65 м при количестве пикселей 512×512 .

Рассеивающий фрагмент сферы выберем таким образом, чтобы его проекция

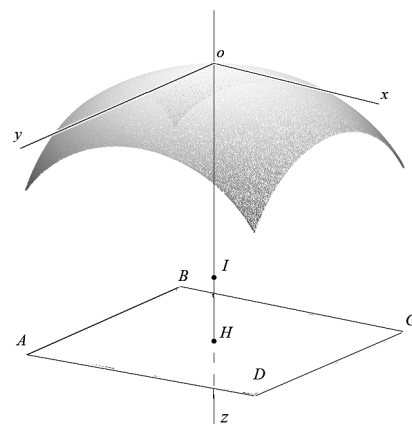


Рис. 4. Схема измерения голограммы на плоскости ABCD при облучении фрагмента сферы из ее центра I.

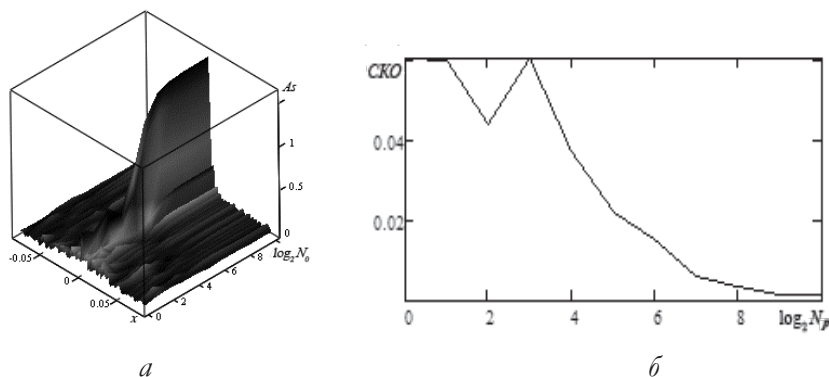


Рис. 5. Сечения поверхности амплитуды голограммы вдоль оси OX при $y = 0$ (а) и график зависимости СКО в центре голограммы (б) в зависимости от количества плоскостей с виртуальными источниками.

на плоскость измерения голограммы совпадала с ней по форме и размерам. На поверхности фрагмента сферы пусть будут выбраны случайным образом 1000 точечных рассеивателей.

Сравним среднеквадратические отклонения (СКО) между амплитудами голограмм, рассчитанных методами 1 и 3, в зависимости от количества плоскостей с виртуальными источниками в методе 3.

На рис. 5а показаны сечения поверхности амплитуды голограмм вдоль оси OX при $y = 0$, а на рис. 5б график СКО при $x = y = 0$ в зависимости от количества N_p плоскостей с виртуальными источниками. Заметим, что центр голограммы и центр сферы имеют одни и те же координаты $x = y = 0$ при отличающихся значениях z .

Из анализа рис. 5а следует, что при $\log_2 N_p > 6$ (т.е. при $N_p > 64$) величина амплитуды

стабилизируется, при этом, как следует из графика на рис. 5б, СКО становится меньше 0.01, т.е. пренебрежимо малым. В связи с этим в дальнейшем, применяя метод 3, мы будем использовать 64 плоскости с виртуальными источниками.

Далее рассмотрим рассчитанные методами 1, 2, 3 зависимости амплитуды в центре голограммы (т.е. при $x = y = 0$) от расстояния до объекта по оси OZ .

На рис. 6 представлены сечения поверхности амплитуды голограммы вдоль оси OX при $y = 0$ в зависимости от расстояния z плоскости голограммы до поверхности сферы.

Видно, что голограммы, рассчитанные методами 1 и 3, имеют в ее центре выраженные пики, которые не наблюдаются в голограмме, рассчитанной методом 2. Более точные количественные данные этих

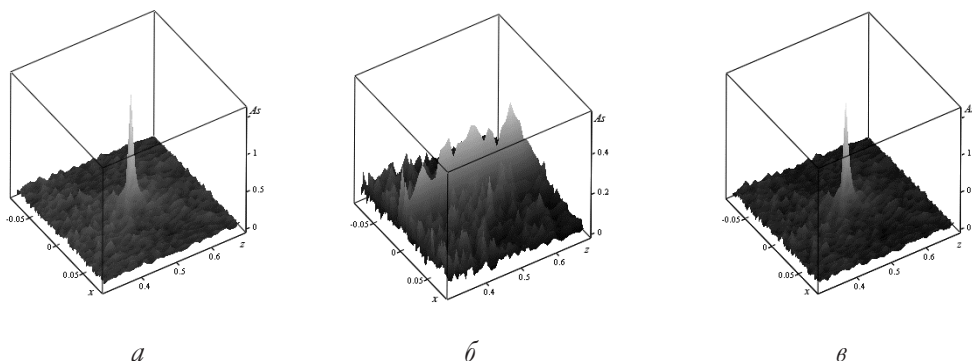


Рис. 6. Сечения поверхности амплитуды голограммы вдоль оси OX при $y = 0$ в зависимости от расстояния ее плоскости до поверхности исследуемого фрагмента сферы, рассчитанные методами 1а, 2б и 3в.

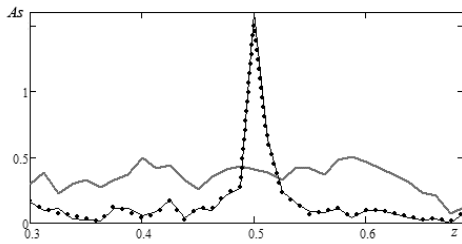


Рис. 7. Амплитуды голограмм при $x = y = 0$ в зависимости от расстояния до поверхности фрагмента сферы, рассчитанные методами 1 (сплошная линия), 2 (пунктир) и 3 (точечный пунктир).

зависимостей представлены на **рис. 7**, где показаны графики зависимостей амплитуды голограмм в их центральной точке $x = y = 0$ от расстояния z .

Из сравнения этих графиков следует, что, во-первых, результаты расчетов по методам 1 и 3 практически совпадают, и, во-вторых, в центральной точке отсутствует фокус голограммы, рассчитанной методом 2.

Далее рассмотрим зависимость амплитуды голограммы от частоты излучения. С этой целью были рассчитаны методами 1, 2, 3 сечения поверхности амплитуды голограмм вдоль оси OX при $y = 0$ в зависимости от частоты f на ее интервале 2...100 ГГц. Результаты расчетов показаны на **рис. 8а, 8б и 8в**.

Из сравнения данных на **рис. 8а, 8б и 8в** следует, что результаты расчетов методом

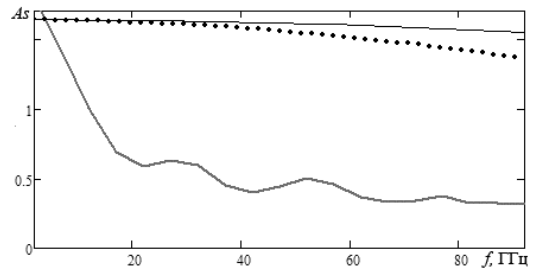


Рис. 9. Графики частотной зависимости амплитуды в центре голограммы, рассчитанные методами 1 (пунктир), 2 (точечный пунктир) и 3 (сплошная линия).

2 при высоких частотах существенно отличаются от тех, что рассчитаны методами 1 и 3. Для сравнения методов 1 и 3 на **рис. 9** показаны графики частотной зависимости амплитуд в центральной точке голограммы, совпадающей с центром сферы. Видно, что метод 3 при общем количестве плоскостей, равном 64, позволяет рассчитывать амплитуды голограмм объемных объектов с приемлемой погрешностью в сравнении с результатами расчетов исходным методом 1.

6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ РАСЧЕТОВ ГОЛОГРАММ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Из (1) следует, что время прямого расчета t_1 голограммы размером $N \times N$ и объекта, состоящего из M рассеивателей, оценивается в виде

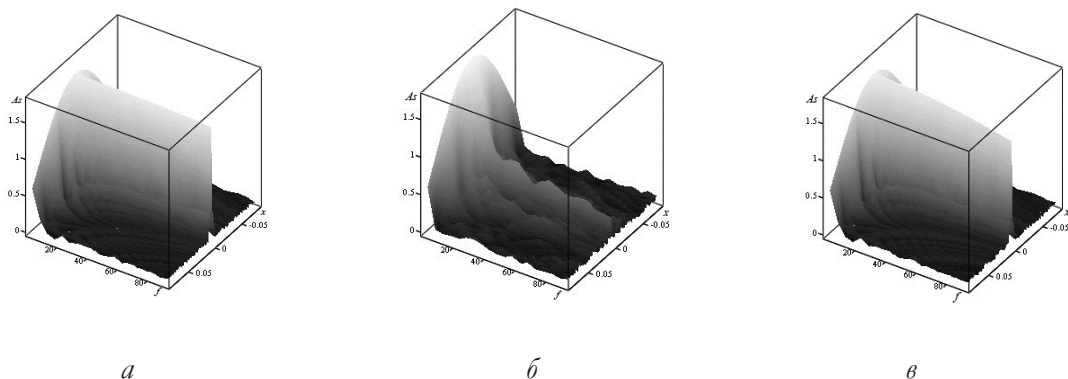


Рис. 8. Сечения поверхности амплитуды голограмм вдоль оси OX при $y = 0$ в зависимости от частоты излучения, рассчитанные методами 1а, 2б и 3в.

$$t_1 \sim M \times N \times N. \quad (4)$$

Использование такого количества рассеивателей обусловлено тем, что метод 1 требует для расчета времени, пропорционального количеству рассеивателей. Полное количество пикселей в выбранном объекте $512 \times 512 = 262\,144$. На компьютере с процессором Pentium E5400 расчеты по методу 1 будут длиться несколько десятков часов.

Выражение (2) можно вычислить с помощью быстрого преобразования Фурье, затратив время

$$t_2 \sim N \times N \times \log_2 N, \quad (5)$$

не зависящее от количества рассеивателей M .

Из анализа (3) следует, что время расчета

$$t_3 \sim N \times N \times N_p \times \log_2 N, \quad (6)$$

которое в N_p раз больше, чем в методе 2.

Из сравнения (4) и (6) следует вывод, что при $M \gg N_p \times \log_2 N$ метод виртуальных источников на множестве параллельных плоскостей позволяет существенно сократить время расчета голограммы объемных объектов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен метод расчета голограмм для объемных объектов, основанный на представлении объектов в виде ансамблей виртуальных точечных источников, распределенных на множестве параллельных плоскостей. Предложенный метод является развитием известного метода (прототипа), в котором объекты представляются в виде ансамбля реальных точечных рассеивателей.

Возможности предложенного метода показаны на примере расчета голограммы фрагмента сферы, на котором случайным образом выбраны 1000 точек, в которых рассеивается излучение, исходящее из

центра сферы. При расчете голограмм такого объекта фазовые ошибки, присущие приближенным расчетам, проявляются наиболее сильно.

Расчеты выполнены для диапазона частот 2...100 ГГц при радиусе сферы 0.5 м, размере двумерной голограммы 0.65×0.65 м и количестве пикселей 512×512 . Показано, что в сравнении с прототипом предложенный метод позволяет рассчитывать амплитуду голограммы с удовлетворительной точностью, если виртуальные источники размещать на параллельных плоскостях в количестве свыше 64-х штук. В случае объектов, требующих представления в виде ансамбля точечных рассеивателей в количестве свыше 1000 штук, предложенный метод при расчете их голограмм оказывается существенно производительнее, чем прототип.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев ВА. *Радиооптика*. М., Советское радио, 1975, 304 с.
2. Разевиг ВВ. Моделирование процесса регистрации радиоголограмм объектов сложной формы радиолокаторами малой и сверхмалой дальности. *Наука и образование*, 2014, 6:336-349.
3. Разевиг ВВ, Бугаев АС, Чапурский ВВ. Сравнительный анализ фокусировки классических и мультистатических радиоголограмм. *Радиотехника*, 2013, 8:8-17.
4. Крайний ВИ, Семенов АН, Чапурский ВВ. Фокусировка многочастотных мультистатических радиоголограмм методом неэквидистантного БПФ. *Наука и образование*, 2015, 11:292-300.
5. Razevig VV, Chizh MA, Chapursky VV, Ivashov SI, Zhuravlev AV. Numerical comparison of mono-static and multi-static

- array performance in personnel screening systems. *Proc. PIERS*. Shanghai, China, 8-11 Aug, 2016. N.Y. IEEE, 2016:2137-2141.
6. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Бесконтактная радиотомография через неплоскую границу раздела сред в приближении фазового экрана. *Естественные и математические науки в современном мире*, 2014, 18:81-90.

Голунов Валерий Алексеевич

к.ф.-м.н., с.н.с.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Фрязино 141190, Московская обл., Россия

golsnow@mail.ru

Коротков Вадим Андреевич

с.н.с.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Фрязино 141190, Московская обл., Россия.