



УДК 537.876.22

С.Н. Семенов, С.И. Воробьев, В.И. Дудкин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ

В статье рассматривается методика расчета электромагнитного поля для построения микроволнового изображения объекта. Представленная методика протестирована на экспериментальной установке АМУ256. Доказана возможность построения микроволнового изображения в режиме реального времени на используемой установке.

АМПЛИТУДА ПОЛЯ, МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ОБЪЕКТА, ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДИФРАКЦИИ, РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Задача о построении микроволнового изображения в настоящее время приобретает большую популярность в связи с быстрым развитием вычислительной техники. Физические основы метода такого построения были заложены еще в 1960-е годы и основаны на успешных работах в области голографии.

Целью данной работы является разработка методики построения изображения в микроволновом диапазоне длин волн и поиск полезных практических применений полученного метода.

Для построения микроволнового изображения решалась обратная задача дифракции. Дифракционная задача имеет два этапа: так называемые прямая и обратная задачи. Первая заключается в поиске распределения комплексной амплитуды в плоскости z от рассеянной на неоднородности плоской либо сферической волны. Обратная задача по распределению комплексной амплитуды в плоскости z восстанавливает неоднородность, рассеивающую волну. Микроволновым изображением мы будем называть распределение комплексной амплитуды в заданной плоскости пространства в микроволновом диапазоне [1], а микроволновым изображением объекта — набор точек из одного или нескольких микроволновых изображений, соответствующих геометрическому расположению на поверхности исследуемого объекта. Исходными данными для вычисления микроволнового изображения

служат расположение исследуемого объекта, а также приемников и передатчиков экспериментальной установки в избранной системе координат. На рис. 1 представлена схема их взаимного расположения.

Распределение комплексных амплитуд мы будем вычислять, исходя из системы координат, а также конфигурации приемников и передатчиков в плоскостях $z = \text{const}$.

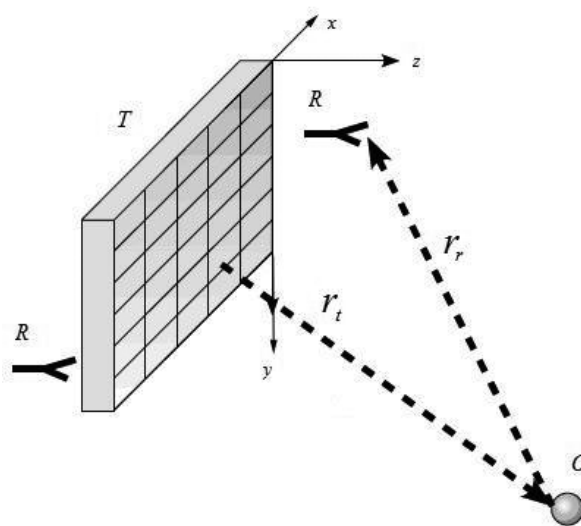


Рис. 1. Схема взаимного расположения объекта (O), плоскости решетки передатчиков (T) и приемных антенн (R) в избранной системе координат; пунктирами показаны направления распространения электромагнитных волн; r_t , r_r — расстояния от передающей антенны до объекта и от объекта до приемной антенны, соответственно

Для вычисления указанного распределения нам необходимо знать таковое для комплексных амплитуд в эталонной плоскости. За последнюю принималась плоскость, в которой распределение комплексных амплитуд известно. В качестве эталонной выбрана плоскость решетки передатчиков (ее координата z принята равной нулю). Для определения поля $p(x, y, z)$ в плоскости $z = \text{const}$ используем следующее выражение [1]:

$$p(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x', y', 0) \frac{e^{ikr}}{r} dx' dy', \quad (1)$$

где $p(x', y', 0)$ – поле в плоскости $z = 0$; λ – длина волны электромагнитного излучения; k – модуль волнового вектора; r – характерное расстояние между объектом и передающим элементом,

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}. \quad (2)$$

Выражение (1) является сверткой поля в плоскости $z = 0$ с импульсным откликом свободного пространства e^{ikr} / r . С физической точки зрения это выражение отражает принцип Гюйгенса–Френеля в интеграль-

ном виде.

Эксперименты проводились на экспериментальной установке АМУ256 (рис. 2), основой которой являлся антенный массив 1, состоящий из 256 элементарных излучателей, генерирующих микроволновое излучение в диапазоне 8–18 ГГц. Конструкция системы также включала две приемные антенны 2 и видеосистему 3 (две видеокамеры). В качестве спектра излучения был выбран набор из 14 эквидистантных частот.

Для компьютерного расчета поля была произведена дискретизация формулы (1):

$$E(\mathbf{r}) = \sum_{k=0}^{13} \sum_{i=0}^{255} f_k E_0(f_k)_{i,j} \times \exp\left(\frac{-2\pi i f_k (r_{ii} + r_{ij})}{c}\right), \quad (3)$$

где $E(\mathbf{r})$ – поле в точке с радиус-вектором \mathbf{r} ; f_k – излучаемая частота; $E_0(f_k)_{i,j}$ – напряженность поля на антенне от i -го передатчика на j -м приемнике и на k -й частоте; c – скорость света в вакууме; r_{ii} , r_{ij} – оптические пути до и после рассеяния, соответственно.

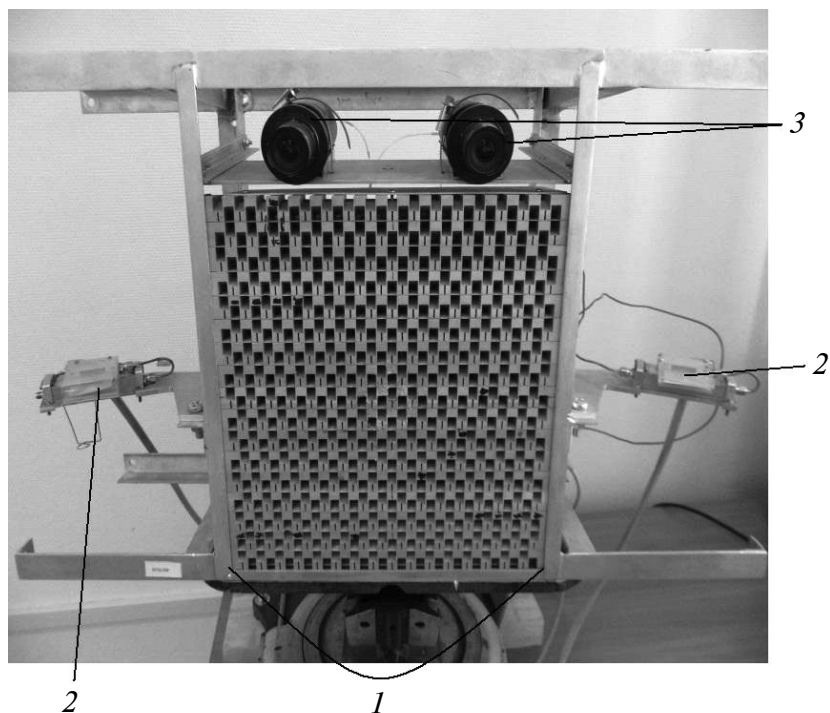


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки АМУ256: 1 – массив передающих антенн, 2 – две приемные антенны, 3 – видеосистема



В экспериментах по построению микроволнового изображения задавалась область видимости системы – ограниченная область пространства, в которой находится исследуемый объект. Ее границы определялись зоной видимости видеосистемы. В момент, когда исследуемый объект оказывается в области видимости, видеосистема его «захватывает» и определяет у него центральную точку (это точка, по координатам которой определяется центр той подобласти пространства, где восстанавливается поле). Данная подобласть представляет собой прямоугольный параллелепипед с заранее известными размерами (высота, ширина, глубина). В нем задается сетка точек (имеет равномерный шаг для каждого направления), в которых вычисляется комплексная амплитуда поля. Вычисленные комплексные амплитуды определяют набор микроволновых изображений, т. е. плоскостей с известным распределением поля. Этот набор вычисляется для каждой приемной антенны в одних и тех же точках пространства. В итоге для каждой приемной антенны мы получаем набор микроволновых изображений. Затем эти наборы для дальнейшей обработки объединяются в один набор по следующей формуле:

$$\text{Amp}_i = \sqrt{k * \text{Amp}_{0,i} + (1 - k) * \text{Amp}_{1,i}}, \quad (4)$$

где Amp_i – модуль комплексной амплитуды поля в объединенном наборе в i -й точке восстановления; $\text{Amp}_{0,i}$, $\text{Amp}_{1,i}$ – модули комплексной амплитуды на нулевой и первой приемных антеннах, соответственно (в той же точке восстановления); k – коэффициент баланса между приемными антеннами.

В наших измерениях коэффициент баланса принимался равным 0,5. После процесса объединения микроволновых изображений в один набор, производилась фильтрация поля по модулю амплитуды. Фильтрация представляла собой отброс тех точек пространства, в которых модуль комплексной амплитуды поля не превышал заранее установленного порога, поскольку точки с малыми амплитудами были, по сути, шумами восстановления и не несли информации о формируемых микроволновых изображениях. В результате процесса

фильтрации оставалось примерно 5 % от начального количества точек. По полученному после фильтрации объединенному набору микроволновых изображений необходимо было определить микроволновое изображение объекта. С этой целью в параллелепипеде, в котором производилось вычисление поля, выбирались линии преимущественного направления, проходящие через точки с идентичными координатами по ширине и высоте. В системе отсчета установки линии преимущественного направления совпадали с направлением оси z , а координаты, отвечающие ширине и высоте, соответствовали осям координат x и y соответственно. Каждая линия преимущественного направления была перпендикулярна микроволновым изображениям, т. е. перпендикулярна плоскостям, в которых восстанавливалась комплексная амплитуда поля. Вдоль каждой линии определялась точка с наибольшей по модулю комплексной амплитудой. Множество точек, в котором модуль комплексной амплитуды поля принимал максимальное значение по преимущественному направлению, принималось за микроволновое изображение объекта.

Для ускорения вычислений комплексной амплитуды поля по формуле (2) была использована технология параллельных вычислений CUDA и ATI Stream. Это дало возможность исследовать микроволновые изображения не только покоящихся объектов, но и движущихся со скоростью до 4 – 5 км/ч.

Эксперименты по построению микроволнового изображения объекта проводились на неподвижных и движущихся целях. Перед началом измерений проводилась калибровка экспериментальной установки. Процесс калибровки заключался в измерении распределения комплексной амплитуды поля в эталонной плоскости, т. е. в плоскости с координатой $z = 0$. Для измерения распределения комплексной амплитуды поля, в эталонной плоскости размещался точечный рассеиватель (металлический шарик) в положение с известными пространственными координатами. Для повышения точности, измерения с точечным рассеивателем производились несколько раз с их последующим усреднением. Полученная

калибровка экспериментальной установки замерялась один раз, затем использовалась во всех дальнейших испытаниях и не требовала повторных измерений.

Для экспериментов выбирались объекты из материалов с достаточно хорошими рассеивающими свойствами в микроволновом диапазоне. Такими свойствами обладают металлы, соляные растворы; кроме того, что представляет главную цель, — тела людей и животных. Эксперименты проводились с манекенами, т. е. с макетами человеческих тел (рис. 3, *а*) для стационарных случаев и с людьми — в движении. Стационарные случаи включали два этапа: на первом в зоне видимости системы помещали только один манекен, на втором — два.

На первом указанном этапе видеосистема производила «захват» исследуемого объекта, затем в соответствующем блоке установки вычислялась его центральная точка. По этой точке строился параллелепипед, в котором восстанавливалось микроволновое поле. Микроволновое изображение объекта визуализировалось в отдельном окне на дисплее монитора. В наших экспериментах манекены размещались на разных участках зоны видимости системы. Для микроволновых изображений манекенов при их одинаковых геометрических положениях в зоне видимости системы были характерны следующие общие свойства:

изображение не менялось по x -координате и по фиксированной z -координате

при различных положениях манекена;

качество изображения постепенно снижалось при увеличении расстояния по z -координате между системой и манекеном.

На втором этапе стационарного случая, как уже отмечалось, в зону видимости системы мы помещали одновременно два манекена. Было установлено, что на микроволновое изображение одного из манекенов наличие второго никак не влияет, если расстояние между ними составляет не менее 30 см и манекены не перекрывают друг друга по углу обзора. На рис. 3, *б* представлены микроволновые изображения макетов человеческого тела на расстоянии примерно 180 см от экспериментальной установки (взаимное расположение объектов приведено на рис. 3, *а*). Яркие круги на микроволновых изображениях манекенов соответствовали наибольшей величине модуля комплексной амплитуды поля. Небольшое (но по порогу допустимое) значение модуля комплексной амплитуды поля наблюдалось для каждого манекена по краям. Параллелепипед, в котором расположены микроволновые изображения манекенов (рис. 3, *б*), — это область видимости системы. В представленных условиях эксперимента размеры параллелепипеда составляли $2 \times 1 \times 3$ м по координатам x, y, z соответственно.

В экспериментах с двигающимися людьми размер области видимости системы составлял $2,5 \times 1,5 \times 5,0$ м по координатам x, y, z соответственно. При скорости обработки

а)



б)

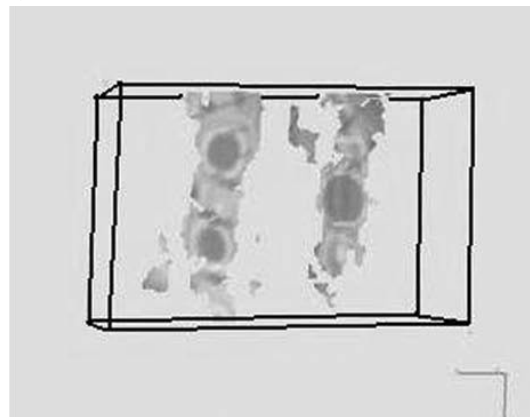


Рис. 3. Используемые макеты человеческих тел, обернутые в фольгу для создания рассеивающих свойств (*а*), и их микроволновые изображения (позиции объектов — те же самые) (*б*).
Размеры параллелепипеда — $2 \times 1 \times 3$ м

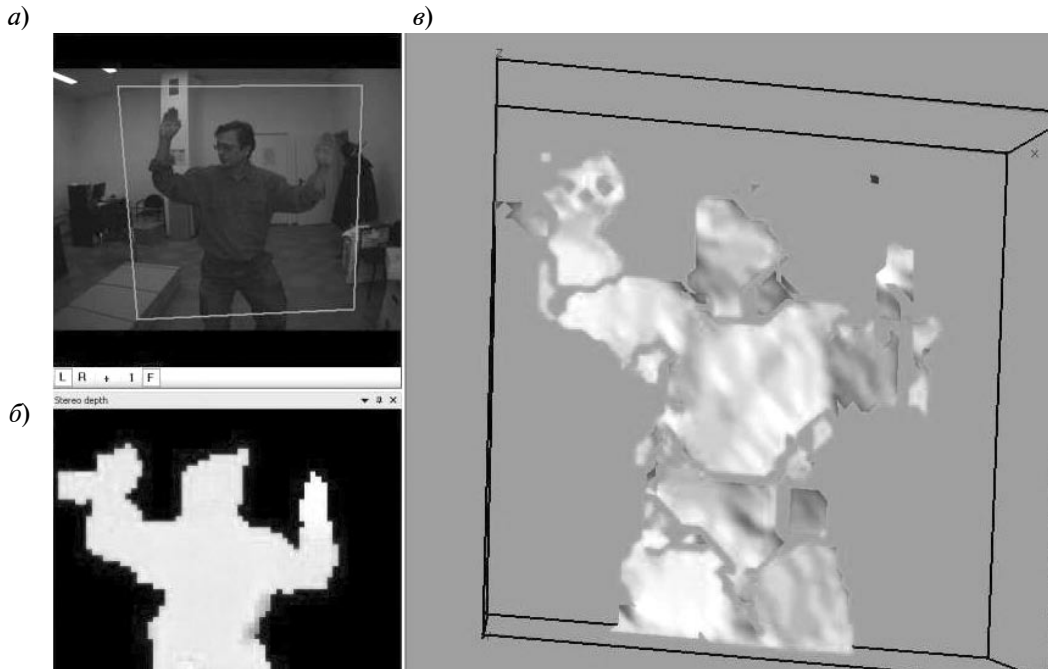


Рис. 4. Получение микроволнового изображения движущегося человека с помощью установки АМУ256:

а – ракурс с одной из видеокамер, *б* – изображение с видеосистемы, *в* – микроволновое изображение

данных в 10 – 12 кадр./с допустимая скорость человека в зоне видимости системы была 4 – 5 км/ч. На рис. 4 представлен интерфейс программы обработки данных на установке АМУ256. Видно, что микроволновое изображение человека окрашено более равномерно, чем манекена. Это означает, что модуль комплексной амплитуды поля не имеет яркой выраженной тенденции убывать по мере приближения к краям объекта.

Итак, в настоящей статье описана методика построения микроволнового изображения объекта. Представленная методика была успешно применена в методах поиска диэлектрических объектов на теле человека [2, 3].

В работах [4, 5] представлено использо-

вание аналогичной методики. В частности, в докладе [4] авторы предложили ее использовать для поиска металлических объектов под одеждой; был выбран частотный диапазон 72 – 80 ГГц. В статье [5] было предложено внедрить методику в прибор видения при плохих метеословиях (35 ГГц).

Разработанная нами методика была успешно внедрена в установку АМУ-256×2. Работа выполнена в рамках программы «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (НИОКР по проекту № 9677 «Разработка установки для обнаружения предметов, скрытых на теле человека», государственный контракт №7232р/9677 от 30.07.2009 г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.
2. Аверианов В.П., Кузнецов А.В. Способ дистанционного досмотра цели в контролируемой области пространства. Патент № 2294549, РФ. 2005. 13 с.
3. Аверианов В.П., Воробьев С.И., Горшков И.Ю. Способ определения диэлектрической

проницаемости диэлектрического объекта. Патент № 2408005, РФ. 2008. 6 с.

4. Longstaff I. D., Ashoka H., AbuShaaban M., Beere W., Liu X. A longer range body scanner // 6th EMRS DTC Technical Conference. Edinburgh 2009, A8, 7 p .

5. Sherif Sayed Ahmed, Andreas Schiessl, Lorenz-Peter Schmidt. Novel fully electronic active real-time millimeter-wave imaging sys-

tem based on a planar multistatic sparse array // Microwave Symposium Digest (MTT), 2011
IEEE MTT-S International. June 5–10, 2011, pp. 1-4.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕМЕНОВ Семён Николаевич – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
ussrcom@mail.ru

ВОРОБЬЕВ Станислав Игоревич – аспирант кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
s.vorobjev@gmail.com

ДУДКИН Валентин Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
vidoodkin@mail.ru

Semenov S.N., Vorobyov S.I., Dudkin V.I. CONSTRUCTING A MICROWAVE IMAGE OF AN OBJECT USING THE INVERSE DIFFRACTION PROBLEM.

The paper designs a calculation procedure for the electromagnetic field to construct a microwave image of an object. The procedure suggested was tested with the AMU256 experimental setup. We proved it was possible to create the construction required in real-time using this setup.

FIELD AMPLITUDE, MICROWAVE IMAGE OF OBJECT, INVERSE DIFFRACTION PROBLEM, CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD.

REFERENCES

1. **Zverev V.A.** *Fizicheskie osnovy formirovaniya izobrazheniy volnovymi polyami.* Nizhny Novgorod: IPF RAN, 1998, 252 p. (rus)

2. **Averianov V.P., Kuznetsov A.V.** Sposob distantsionnogo dosmotra tseli v kontroliruemoy oblasti prostranstva. *Patent No. 2294549, RF, 2005, 13 p. (rus)*

3. **Averianov V.P., Vorob'ev S.I., Gorshkov I.Yu.** Sposob opredeleniya dielektricheskoy pronitsaemosti dielektricheskogo ob'ekta. *Patent No. 2408005, RF, 2008, 6 p. (rus)*

4. **Longstaff I. D., Ashoka H., AbuShaaban M., Beere W., Liu X.** A longer range body scanner. *6th EMRS DTC Technical Conference.* Edinburgh 2009, A8, 7 p.

5. **Sherif Sayed Ahmed, Andreas Schiessl, Lorenz-Peter Schmidt.** Novel fully electronic active real-time millimeter-wave imaging system based on a planar multistatic sparse array. *Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International.* June 5–10, 2011, pp. 1-4.

THE AUTHORS

SEMENOV Semen N.

St. Petersburg State Polytechnical University,
29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
ussrcom@mail.ru

VOROB'YEV Stanislav I.

St. Petersburg State Polytechnical University,
29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
s.vorobjev@gmail.com

DUDKIN Valentin I.

St. Petersburg State Polytechnical University,
29, Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
vidoodkin@mail.ru