

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

И.В.Скворцов, Р.Р. Латыпов, О.Н. Шерстюков, Р.Ф. Бабаев
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2019 г.

Аннотация. Представлено описание реализованной экспериментальной установки для измерения электромагнитного излучения от излучающей структуры в ближней зоне. В качестве излучающей структуры рассматривается печатная плата. Данная экспериментальная система позволяет измерять полный вектор излучения от печатной платы за один проход. В статье приводятся результаты замеров излучения от печатной платы с использованием предлагаемой измерительной установки. Также описываются существующие в настоящее время другие типы установок и указываются их недостатки в сравнении с предлагаемой в статье системой для измерения электромагнитных полей.

Ключевые слова: измерительная установка, печатная плата, ближняя зона.

Abstract. The description of the implemented experimental setup for measuring electromagnetic radiation from a radiating structure in the near field is presented. The advantages of measurements in the near field are that the requirements for the measuring installation are reduced, the accuracy of the measurements taken is increased, and the need for an anechoic chamber is eliminated. A printed circuit board is used as an example of a radiating structure. The proposed experimental setup implements a planar scanning method. The advantages of a planar scanning method are the simplicity of calibration and motion control. The proposed measurement setup

allows us to measure the full radiation vector at each observation point in one scan pass. Information about radiation can be used to solve inverse problems with the goal of localizing the most active radiation sources located on a printed circuit board. The results of measurements of radiation from a printed circuit board using a measuring setup are presented. Other types of setups for measuring electromagnetic radiation are described: commercial and laboratory solutions. A comparison is made of known types of setups with the proposed radiation measurement system.

Key words: experimental setup, printed circuit board, near field.

Введение

Существует международный стандарт IEC-61967-3 [1], который описывает метод, позволяющий сканировать излучение от объекта. На основе данного метода реализуется экспериментальная установка для измерения излучения от объекта с использованием автоматического смещения измерительного пробника. Пробник сканирует излучение от объекта в каждой точке наблюдения. Таким образом, формируется двумерная карта распределения излучения. Информация о распределении излучения от объекта важна для решения проблемы локализации источников [2]. Обычно измерения от излучающей структуры проводится в ближней зоне. Это объясняется некоторыми преимуществами по сравнению с измерениями в дальней зоне: нет необходимости использовать безэховую камеру, точность измерения [3]. Более того, в настоящее время существуют различные преобразования, позволяющие пересчитать результаты измерений ближней зоны в дальнюю [4]. Для проведения измерений необходимо определиться с типом сканирования. Существуют три способа сканирования излучающей структуры: плоский [5], цилиндрический [6] и сферический [7]. Наиболее предпочтительным методом является метод плоского сканирования из-за простоты его реализации и калибровки [8]. Однако этот метод позволяет измерять только половину пространства без повторения эксперимента. Цилиндрические и сферические

методы сканирования имеют некоторые трудности при реализации. Например, при таких способах сканирования возникают трудности с управлением движения, калибровкой. Следующим важным шагом в реализации сканирования является выбор типа пробника [9]. В основном используются пробники трех типов: волновод с открытым концом [10], рамочная магнитная антенна [11], электрический монополь [9].

В настоящее время известно два основных подхода для измерения электромагнитного излучения от исследуемого объекта: коммерческие и лабораторные решения. К первому типу, например, относятся решения EMScan [12] или комплект анализатора спектра R&S FSH8 [13] с набором пробников ближней зоны R&S HZ-15 [14]. Данные подходы не лишены недостатков. EMScan представляет собой фиксированную измерительную двумерную сетку в узлах которой расположены пробники. Шаг сетки зафиксирован, то есть невозможно получить большее количество точек измерения. Решение R&S позволяет измерять излучение только путем ручного смещения пробника. В решении R&S отсутствует система позиционирования, что приводит к отсутствию повторяемости эксперимента.

Лабораторные решения обычно реализуются группами исследователей для изучения распределения излучения в научных целях. В таких системах обычно реализуется система позиционирования и присутствует повторяемость эксперимента [15,16].

На практике чаще всего требуется определить не только распределение амплитуды излучения, но и распределение разности фаз. Первым способом определения фазы является отсчет фазы относительно входа исследуемого объекта. На практике возникают случаи, при которых невозможно подключиться к входу объекта, то есть объект функционирует автономно. В таких случаях используется дополнительно опорный пробник, смещенный на некоторое расстояние от объекта, относительно которого и определяется разность фаз между точкой наблюдения и опорной точкой [15]. Такие системы

позволяют достаточно точно измерять излучение, но для измерения полного вектора необходимо повторять эксперимент.

С учетом перечисленных ранее недостатков существующих систем необходимо реализовать измерительную установку с системой позиционирования, позволяющей варьировать количество точек измерения и системой пробников, позволяющей измерить полный вектор излучения за один проход сканирования.

1. Конструкция измерительной установки

Как описывалось ранее, на практике возникают ситуации, когда подключиться к входу исследуемого объекта становится проблематично. В таком случае необходимо дополнительно использовать опорный пробник для измерения фазы. Схема реализации экспериментальной установки с использованием системы взаимно перпендикулярных пробников и одного опорного показана на рис. 1.

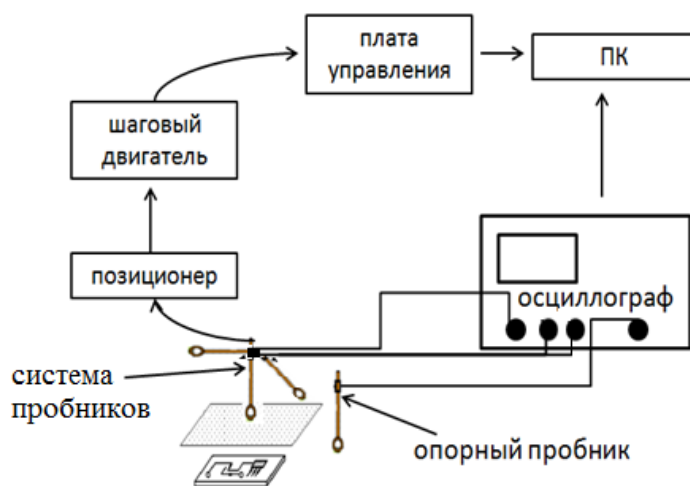


Рис. 1. Схема реализации экспериментальной установки с использованием системы взаимно перпендикулярных пробников.

На некоторой высоте h расположена система сканирующих пробников, которые перемещаются в плоскости параллельной плоскости исследуемого объекта. Опорный пробник зафиксирован. Относительно него и определяется разность фаз. Система сканирующих пробников закреплена на движущейся

каретке. Каретка имеет соединительную связь с шаговыми двигателями через натяжные ремни. Шаговый двигатель, получая команду от платы управления, реализует некоторое заранее заданное количество шагов, в результате чего и происходит смещение каретки. Каретка, плата управления (сервопанель), натяжные ремни, шаговые двигатели входят в конструкцию системы позиционирования. Подробная блок-схема системы позиционирования показана на рис.2.



Рис.2. Система позиционирования.

Сигнал смещения поступает на плату управления (сервопанель) с ПК в формате G-кода, где предварительно декодируется. После чего шаговый двигатель получает команду от сервопанели на осуществление нескольких заданных шагов и происходит смещение каретки.

На рис.3 показаны некоторые блоки системы позиционирования.

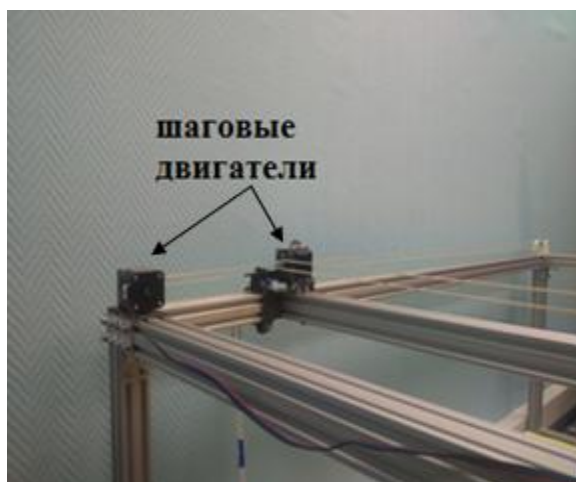


Рис.3. Вид некоторых блоков системы позиционирования.

Данная система позиционирования закреплена на жестко фиксированном каркасе, имеющем размеры $1\text{м}\times 1\text{м}\times 1\text{м}$. Измеренные пробниками значения излучения поступают с осциллографа на ПК. Такая реализация схемы осуществляет планарный способ сканирования. Для измерения полного вектора излучения используется система из трех взаимно перпендикулярных пробников и одного опорного пробника.

2. Конструкция пробников

В данной системе сканирования излучения используются изготовленные пробники на основе симметричной полосковой линии. Вид пробника изображен на рис. 4.

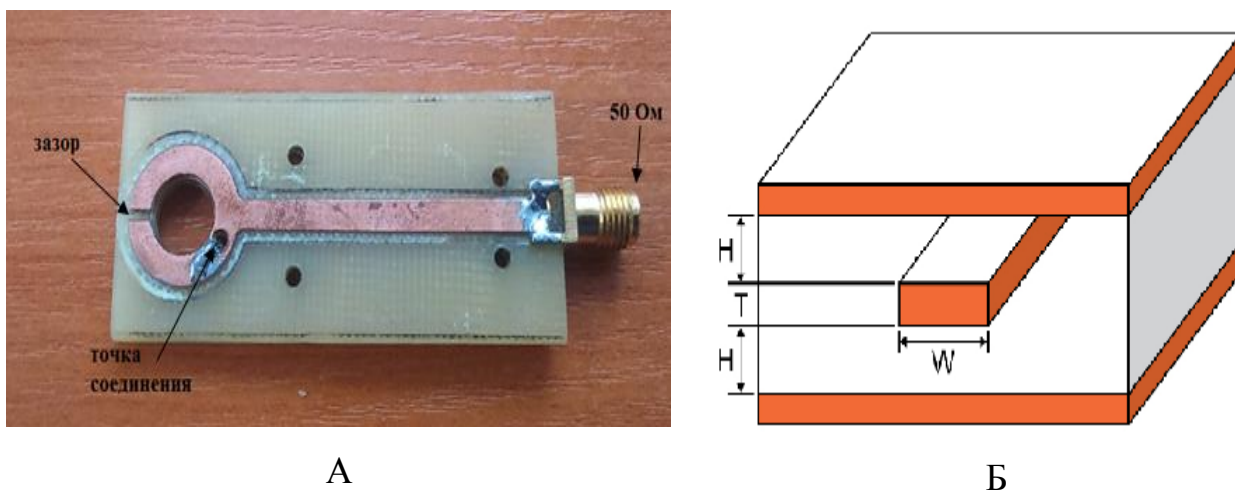


Рис. 4. Изготовленный пробник А) Вид пробника, Б) конструкция симметричной полосковой линии.

Изготовленный пробник представляет собой магнитную петлевую антенну. Для экранизации электрической составляющей в пробнике в верхней точке сделан зазор. Точка соединения является местом соединения внутренней сигнальной линии с земляным экраном. При изготовлении пробника в качестве диэлектрика использовался материал FR-4, размеры сигнальной линии (высота T , ширина W) рассчитывались на сопротивление в 50 Ом.

Основным параметром, характеризующим пробник, является коэффициент отражения от входа, который рассчитывается как параметр S_{11} . Зависимость S_{11} от частоты изображена на рис.5. Приводятся результаты сравнения

изготовленного пробника с коммерческим решением R&S HZ-15. Диаметр кольца обоих пробников составляет 1 см.

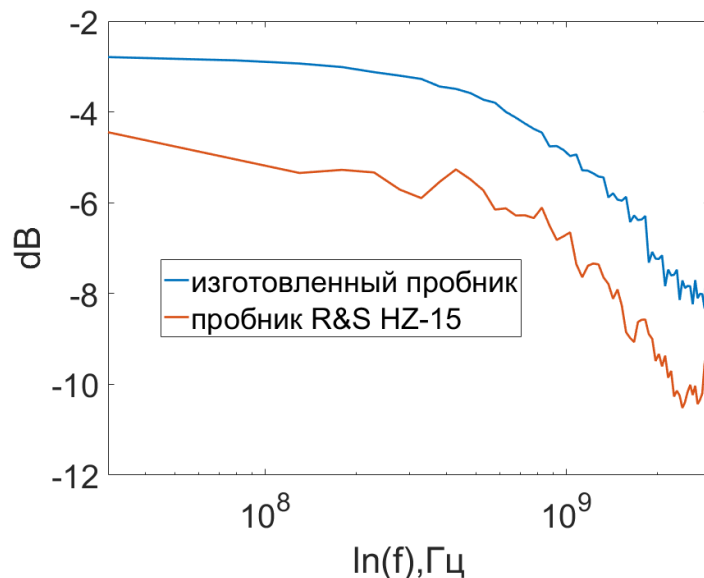


Рис. 5. Зависимость S_{11} от частоты.

Из полученных результатов следует, что оба пробника имеют большое отражение от входа, что крайне нежелательно. Однако, для пробников ближней зоны это вполне естественно. Из теории известно, что длина петли пробника должна быть сопоставима с длиной волны. При измерениях, например, на частоте 100 МГц размеры пробника будут достаточно велики, что приведет к низкой разрешающей способности пробника при измерениях в ближней зоне. Поэтому целесообразно изготовить пробники с малыми размерами и учитывать отражение при обработке результатов.

Система из 3 взаимно перпендикулярных пробников показана на рис.6.



Рис.6. Система 3-х взаимно перпендикулярных пробников.

Такая система пробников позволяет проводить сканировать все компоненты излучения от исследуемого объекта одновременно.

3. Результаты замеров излучающей структуры

В качестве излучающей структуры была исследована печатная плата.

Параметры сканирования показаны в таблице 1.

Таблица 1. Параметры сканирования печатной платы

Высота сканирования, мм	15
Размеры платы, мм	70×50
Число точек измерения	20×15
Шаг измерения, мм	4
Сканирующие компоненты	H_x, H_y, H_z

Исследуемая печатная плата состоит из цифровой и аналоговой части и имеет несколько частот излучения. Спектр излучения показан на рис.7.

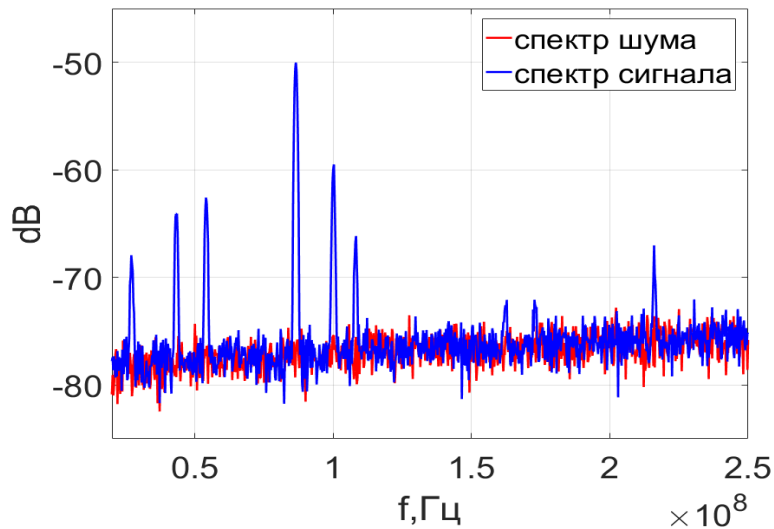


Рис.7. Спектр излучения от печатной платы.

В качестве примера исследована гармоника, соответствующая частоте 100 МГц. Полученные результаты измерения представляют собой матрицу, где в каждой ячейки записана временная реализация в точке наблюдения. После чего к каждой временной реализации применялось Фурье-преобразование.

Из рис.7 видно, что данная гармоника имеет значительный вклад в спектр излучения. Использование Фурье-преобразования к каждой временной реализации позволяет оценить распределение излучения на интересующей частоте. Распределение модуля напряженности магнитного поля на частоте 100 МГц для всех компонент показано на рис.8-10 соответственно.

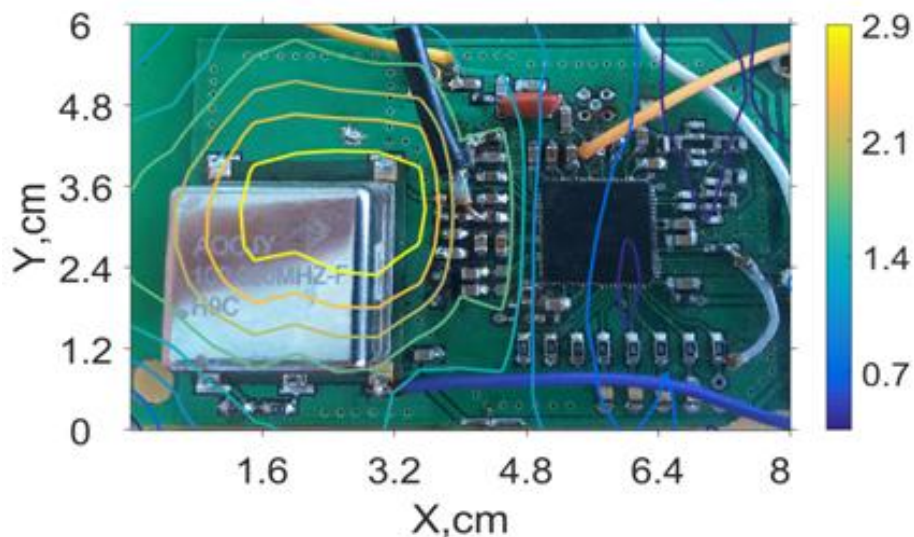


Рис.8 Распределение H_x компоненты излучения от печатной платы.

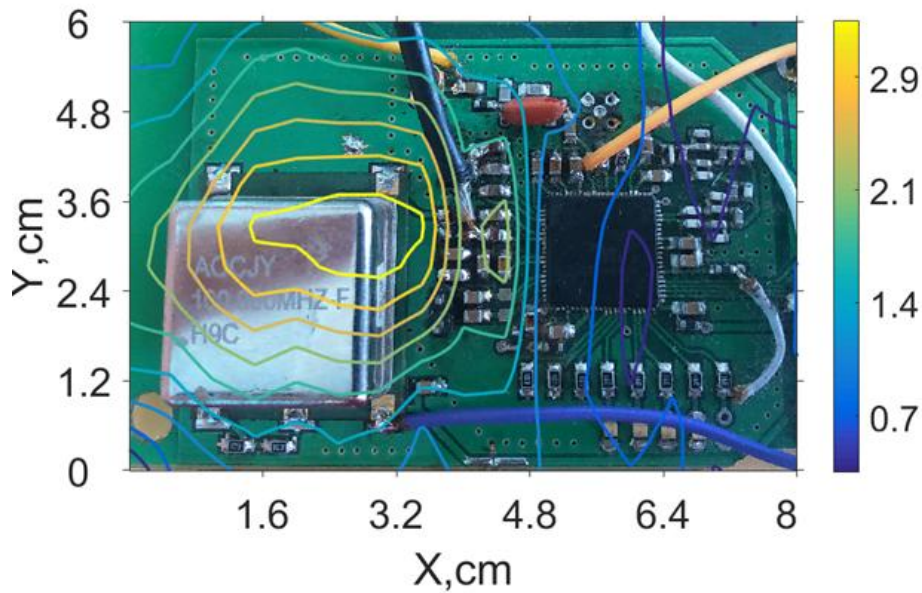


Рис.9. Распределение N_y компоненты излучения от печатной платы.

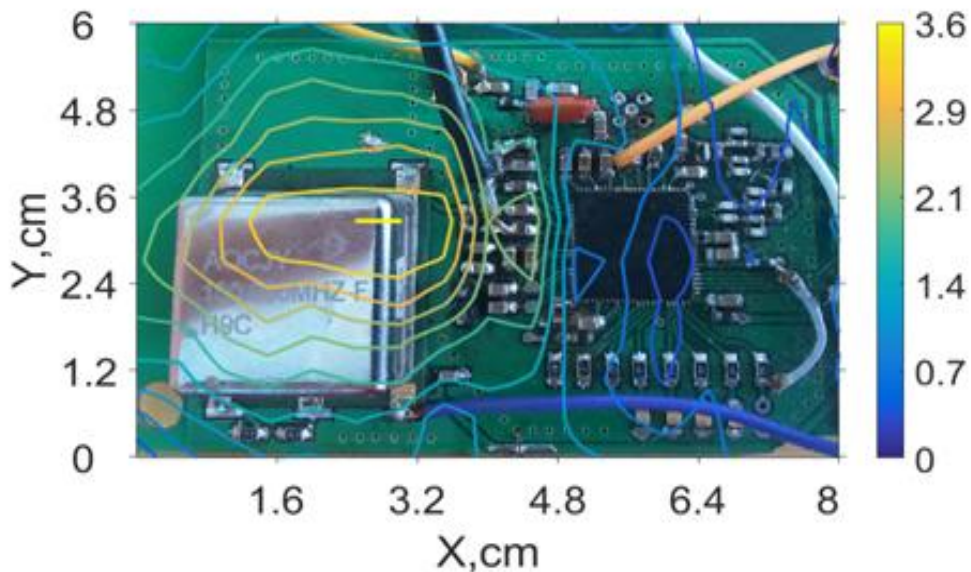


Рис.10. Распределение N_z компоненты излучения от печатной платы.

По правую сторону от каждого рисунка отложена шкала, показывающая значения амплитуды излучения. Наиболее активные области излучения расположены слева от печатной платы. В левой части печатной платы находится кварцевый генератор на 100 МГц. Именно он и является источником излучения. В локализации активных областей излучения наиболее важной задачей является определение градиента излучения. Направление градиента указывает направление возрастания модуля напряженности поля, а длина вектора определяет величину изменения модуля напряженности поля в

соседних точках наблюдения. Результаты градиента напряженности магнитного поля в плоскости и в пространстве показаны на рис. 11-13.

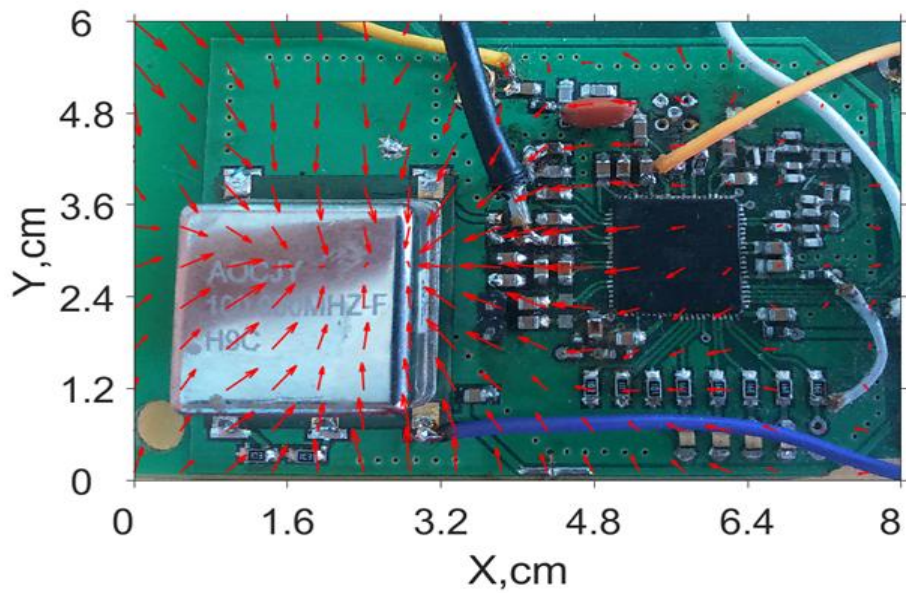


Рис.11. Градиент магнитного поля в плоскости XY.

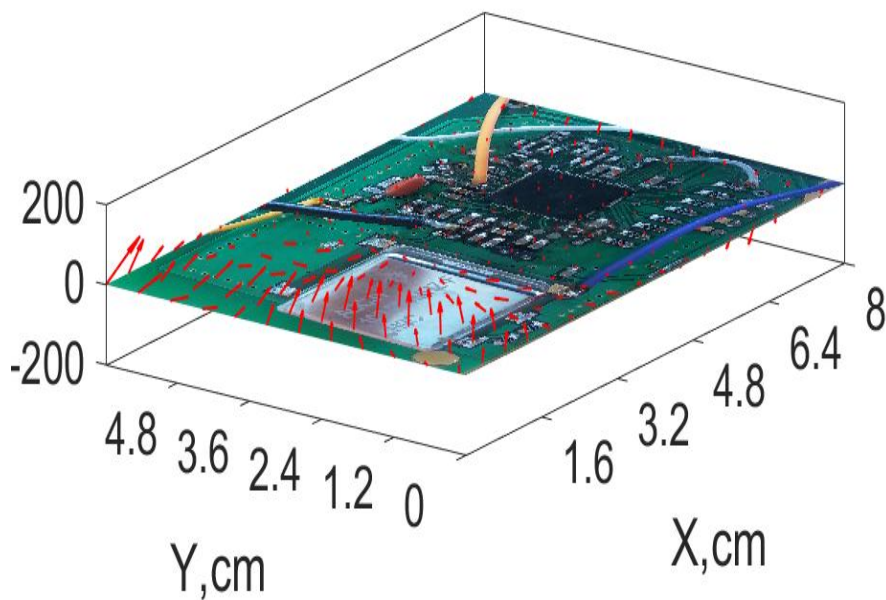


Рис.12. Градиент магнитного поля в 3-х мерном пространстве.

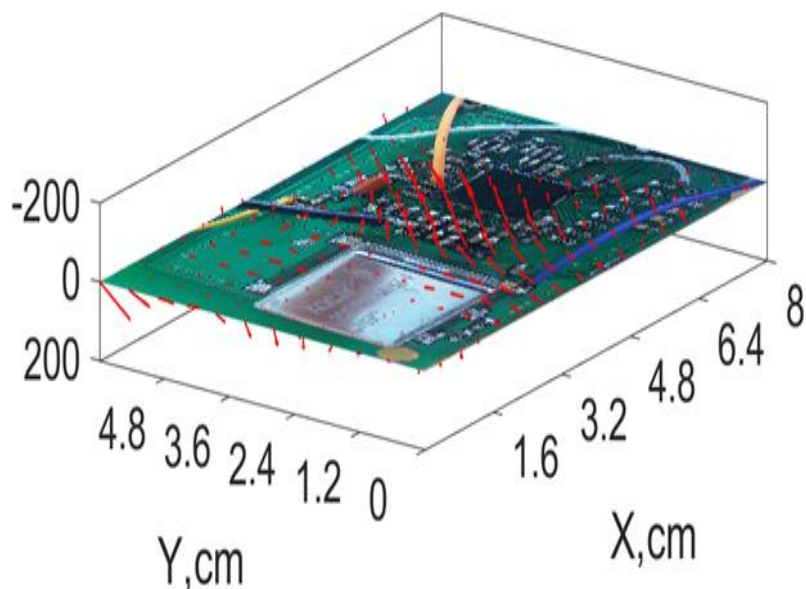


Рис.13. Градиент магнитного поля в 3-х мерном пространстве.

Необходимо учитывать, что при сканировании учитывается суммарное воздействие от всех областей излучения в текущую точку наблюдения. Также возможно взаимное влияние отдельных компонент платы. Таким образом, полученные результаты являются первичными и необходимыми для последующей задачи локализации активных источников излучения, которая является актуальной для задач электромагнитной совместимости [2,15].

Заключение

В статье описана реализация экспериментальной установки для измерения электромагнитного излучения от излучающего объекта. Основным отличием данной измерительной системы от известных типов является возможность измерения всех компонент излучения за один проход сканирования. Приведены экспериментальные результаты замеров излучающего объекта на примере печатной платы.

Литература

1. Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 3: Measurement of radiated emissions - Surface scan method, IEC 61967-3:2005, 2005.

2. Gorbunova A., Baev A., Konovalyuk A., Kuznetsov M., Localization of cyclostationary EMI sources based on near-field measurements, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, pp. 45-455.
3. Yaghjian A., An overview of near-field antenna measurements, IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 34, no. 1, 1986, pp. 30-45.
4. Sarkar T., Taaghola A., Near-Field to Near/Far-Field Transformation for Arbitrary Near-Field Geometry Utilizing an Equivalent Electric Current and MoM, IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 47, no. 3, 1999, pp. 566-573.
5. Hansen T., Yaghjian A., Planar near-field scanning in the time domain, part 2: Sampling theorems and computation schemes, IEEE Trans. Antenna Propag., vol. 42, no. 9, 1994, pp. 1292-1300.
6. Yaghjian A., Near-field antenna measurements on a cylindrical surface: A source scattering-matrix approach, National Bureau of Standards Tech. Note 696, September 1977, p. 44.
7. Wacker P., Non-planar near-field measurements: spherical scanning, National Bureau of Standards (U.S.), NBSIR, 1975.
8. Shi J., Cracraft M., Slattery K., Yamuguchi M., DuBroff R., Calibration and compensation of near-field scan measurements, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 47, no. 3, 2005, pp. 642-650.
9. Kanda M., Standard probes for electromagnetic field measurements, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-41, no. 10, 1993, pp. 1349-1364.
10. Park W.K., Oh S.S., Kang S.Y., Roblin P., Park H.D., Waveguide probe with size-reduced aperture using split-ring resonator array for near-field measurements, Electron. Lett., vol. 45, no. 6, 2009, pp. 297-298
11. Whiteside H., King R. W., The Loop Antenna as a Probe, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 12, no. 3, 1964, pp. 291-297.

12. EMxpert от 20 MHz - 1 GHz [Электронный ресурс] URL: http://dev.ccontrols.pl/cms/upload/content/news/EMxpert_Datasheet.pdf (дата обращения: 11.10.2019).
13. R&S FSH8, Анализатор спектра [Электронный ресурс] URL: <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/Rohde-Schwarz-FSH8-Datasheet.pdf> (дата обращения: 11.10.2019).
14. R&S HZ-15, Пробники ближнего поля, [Электронный ресурс] URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/service_support_30/HZ-15_16_17_bro_en_5213-6687-12_v0100.pdf (дата обращения: 11.10.2019).
15. Tong X., Simplified equivalent modelling of electromagnetic emissions from printed circuit boards, University of Nottingham, PhD thesis, 2010.
16. Chuah Y.J., Mustaffa M.T., Evaluation of PCB shielding characteristic in near field, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 542-548.

Experimental setup for measuring electromagnetic radiation from a radiating structure in the near field

I.V. Skvortsov, R.R. Latypov, O.N. Sherstyukov, R.F. Babaev

Kazan Federal University

Kremlin, 18, Kazan, 420008, Russia

References

1. Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 3: Measurement of radiated emissions - Surface scan method, IEC 61967-3:2005, 2005.

2. Gorbunova A., Baev A., Konovalyuk A., Kuznetsov M., Localization of cyclostationary EMI sources based on near-field measurements, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, pp. 45-455.
3. Yaghjian A., An overview of near-field antenna measurements, IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 34, no. 1, 1986, pp. 30-45.
4. Sarkar T., Taaghola A., Near-Field to Near/Far-Field Transformation for Arbitrary Near-Field Geometry Utilizing an Equivalent Electric Current and MoM, IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 47, no. 3, 1999, pp. 566-573.
5. Hansen T., Yaghjian A., Planar near-field scanning in the time domain, part 2: Sampling theorems and computation schemes, IEEE Trans. Antenna Propag., vol. 42, no. 9, 1994, pp. 1292-1300.
6. Yaghjian A., Near-field antenna measurements on a cylindrical surface: A source scattering-matrix approach, National Bureau of Standards Tech. Note 696, 1977, 44 p.
7. Wacker P., Non-planar near-field measurements: spherical scanning, National Bureau of Standards (U.S.), NBSIR, 1975.
8. Shi J., Cracraft M., Slattery K., Yamuguchi M., DuBroff R., Calibration and compensation of near-field scan measurements, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 47, no. 3, 2005, pp. 642-650.
9. Kanda M., Standard probes for electromagnetic field measurements, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-41, no. 10, 1993, pp. 1349-1364.
10. Park W.K., Oh S.S., Kang S.Y., Roblin P., Park H.D., Waveguide probe with size-reduced aperture using split-ring resonator array for near-field measurements, Electron. Lett., vol. 45, no. 6, 2009, pp. 297-298.
11. Whiteside H., King R. W., The Loop Antenna as a Probe, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 12, no. 3, 1964, pp. 291-297.
12. EMxpert ot 20 MHz - 1 GHz Available at: http://dev.ccontrols.pl/cms/upload/content/news/EMxpert_Datasheet.pdf

13. R&S FSH8, Spectrum analyzer, Available at: <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/Rohde-Schwarz-FSH8-Datasheet.pdf>
14. R&S HZ-15, Near field probes, Available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/service_support_30/HZ-15_16_17_bro_en_5213-6687-12_v0100.pdf
15. Tong X., Simplified equivalent modelling of electromagnetic emissions from printed circuit boards, University of Nottingham, PhD thesis,2010,
16. Chuah Y.J.,Mustaffa M.T.,Evaluation of PCB shielding characteristic in near field, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 542-548.