

УДК 621.317.2

## Измерительный стенд на основе компактного планарного сканера ближнего электромагнитного поля

Можаров Э.О.<sup>1,2,\*</sup>,

[\\*eduardmozharov@yandex.ru](mailto:eduardmozharov@yandex.ru)

Михайлов-Овсянников Д.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Разработан и изготовлен лабораторный стенд, предназначенный для измерения характеристик излучения антенн СВЧ и КВЧ диапазонов частот, на основе экономичного компактного планарного сканера ближнего электромагнитного поля. Выполнена серия экспериментов по измерению диаграмм направленности облучателя Ку-диапазона длин волн, разработанного для радиоколлиматора компактного полигона АКК1-05 (ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана). Сравнительный анализ характеристик излучения, полученных расчетным методом, методом планарных измерений ближнего поля и методом «точка-точка» в дальней зоне, показал эффективность разработанного компактного планарного сканера.

**Ключевые слова:** облучатель, столобразная диаграмма направленности, коллиматор, ближнее поле, планарный сканер, диаграмма направленности, компактный полигон, Ку-диапазон длин волн

---

### Введение

Существует большое разнообразие методов измерения характеристик излучения антенн [1-5]. В последние годы с развитием высокоточной механики и ростом скорости измерения векторных анализаторов цепей широкое применение нашли ближнеполевые методы измерения [6]: планарные [7], по цилиндру и по сфере [8]. Стоит выделить ряд преимуществ данных методов, по сравнению с классическими методами дальней зоны «точка-точка»:

- 1) В результате промера получается трехмерная диаграмма направленности.
- 2) Малые габариты измерительного стенда (соизмерим с размерами исследуемой антенны).
- 3) Более низкие требования к «безэховости» помещений.

Существует ряд недостатков, такие как:

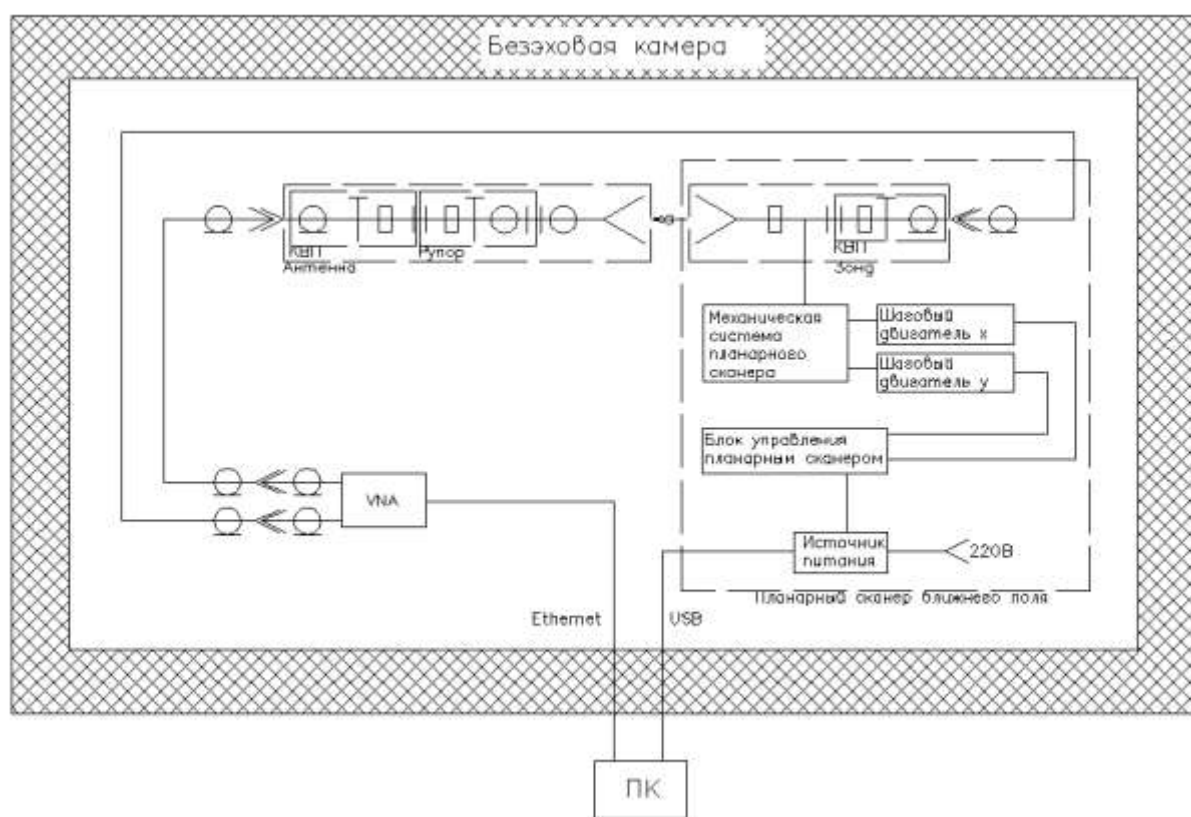
- 1) Измерения проводятся дольше, чем при съеме сечения ДН антенны.
- 2) Требуется постобработка полученных данных.

3) Относительно высокая стоимость планарного сканера.

Нами предлагается устранить третий недостаток ближнеполевых измерений при контроле характеристик слабонаправленных антенн за счет применения экономичных механических автоматических конструкций, подобных тем, что используются в 3D-принтерах, работающих по методу послойной укладки полимера (FDM) [9].

## 1. Конструкция измерительного стенда на основе компактного планарного сканера ближнего электромагнитного поля

Для измерения характеристик излучения слабонаправленных антенн СВЧ и КВЧ диапазонов частот предложен и опробован стенд, который реализует метод планарных измерений ближнего электромагнитного поля. Схема стенда представлена на рис. 1.

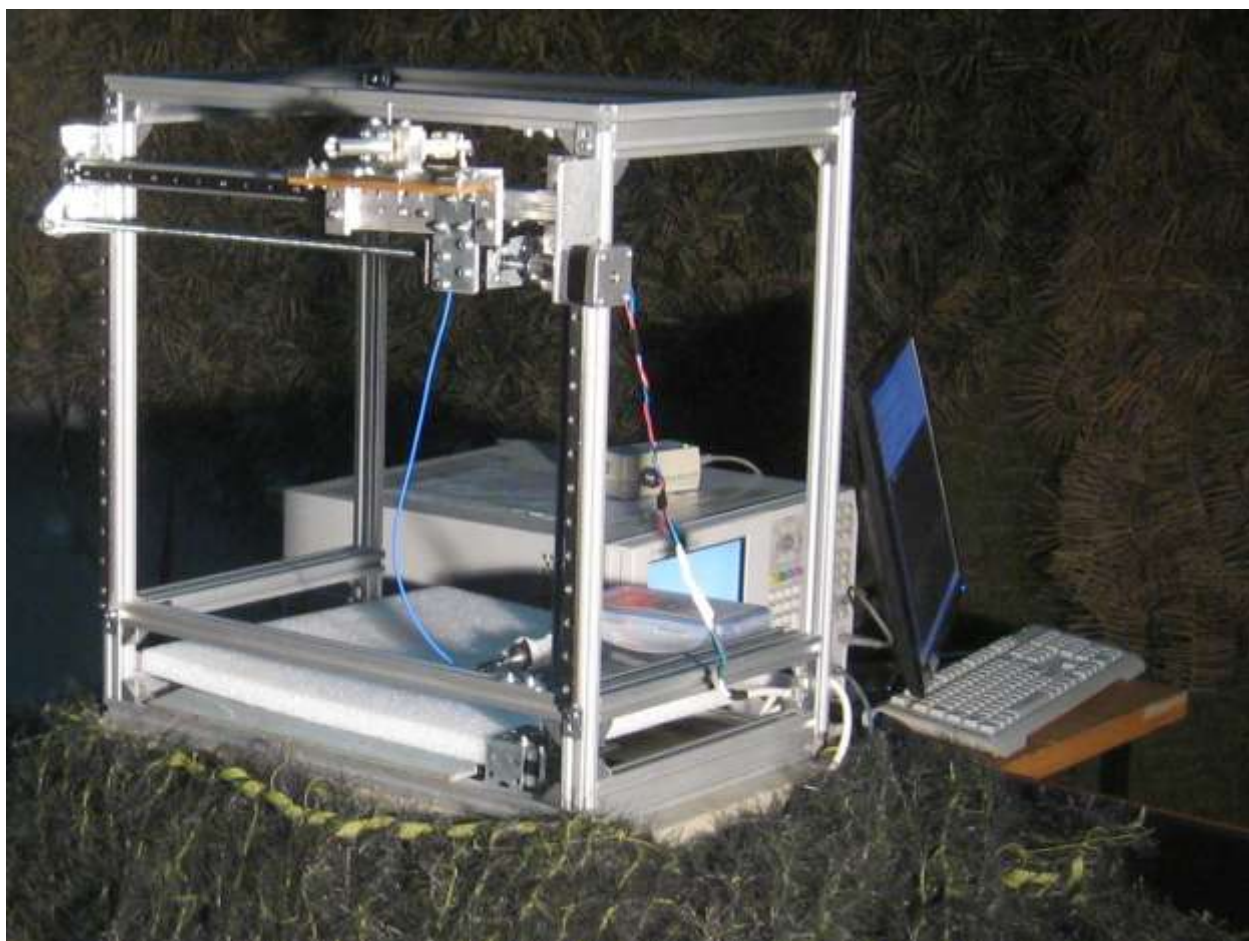


**Рис.1.** Схема стенд измерения характеристик излучения антенн методом планарных измерений ближнего электромагнитного поля

В состав измерительного ближнеполевого стенда входит три основные части: планарный сканер, СВЧ измерительный блок с измерительным зондом и персональный компьютер со специальным программным обеспечением. Область сканирования составляет  $300 \times 300 \text{ мм}^2$ , диапазон рабочих частот от 1 ГГц до 40 ГГц определен техническими параметрами векторного анализатора цепей и точностью позиционирования зонда (80 мкм).

Планарный сканер (рис. 2) построен по схеме, подобной той, что используется в 3D-принтерах, работающих по методу FDM. На сборный алюминиевый каркас установлены

три высокоточные направляющие, два шаговых двигателя и две винтовые системы передачи.

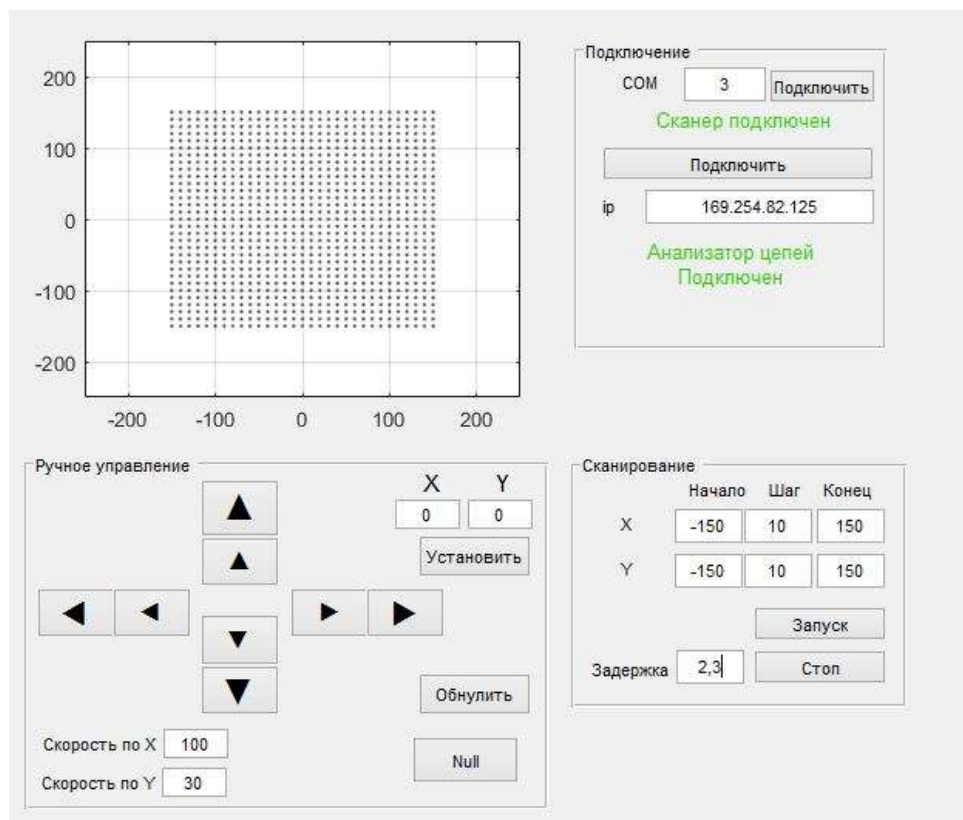


**Рис.2.** Компактный планарный сканер ближнего электромагнитного поля

Измерительный зонд ближнего поля располагается на горизонтальной оси сканера, так же на этой оси размещены элементы системы линейного перемещения: высокоточная направляющая с кареткой, шаговый двигатель, винтовая система передачи и оснастка закрепления зонда. Горизонтальная ось перемещается по двум вертикальным высокоточным направляющим. В качестве блока управления планарным сканером используется контроллер Arduino UNO R3 с модулем Arduino motor shield V2, подключенные по USB интерфейсу к ПЭВМ. Контроллер Arduino UNO R3 подключен к источнику постоянного напряжения 12 В.

В качестве СВЧ измерительного блока задействован векторный анализатор цепей Agilent PNA E8363B. Первый канал анализатора цепей был подключен к измерительному зонду, второй канал ко входу исследуемой антенны. Передача данных осуществляется по протоколу TCP/IP.

Для управления и получения данных используется специализированный программный комплекс, который включает в себя: программу управления планарным сканером и программу вычисления ДН. Интерфейс программы представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Интерфейс программы управления планарным сканером ближнего поля

Программа управления планарным сканером написана в среде Matlab и позволяет управлять шаговыми двигателями и управлять векторным анализатором цепей, сохранять данные с него. Для съема показаний с векторного анализатора цепей используется модуль «Instrument control toolbox» среды Matlab [13], в котором реализована возможность отправлять команды оборудованию на языке программирования SCPI через протокол VISA. Подключение и управление контроллером Arduino UNO R3 с модулем Arduino motor shield V2 осуществлено так же в среде Matlab при использовании вспомогательного пакета «Arduino support» [14].

В программе управления планарным сканером реализованы следующие режимы:

- проверка подключения контроллера Arduino UNO R3;
- проверка подключения векторного анализатора цепей;
- управление скоростью перемещения зонда ближнего поля;
- «Ручное управление», обеспечивающее первоначальное позиционирование зонда;
- режим «Сканирование», обеспечивающий автоматический режим измерения ближнего поля за счет перемещения зонда вдоль осей X и Y с заданным шагом. Предусмотрена задержка между соседними позициями зонда, необходимая для того, чтобы векторный анализатор цепей провел необходимые измерения и передал данные на ПЭВМ.

Предусмотрен полуавтоматический режим измерений, при котором данные сохраняются на векторном анализаторе цепей, что позволяет сократить время измерений.

## 2. Характеристики излучения облучателя К<sub>u</sub>-диапазона длин волн зеркального радиоколлиматора АКК1-05 методом планарных измерений ближнего поля

Для зеркального радиоколлиматора АКК1-05 [10] был разработан и изготовлен специальный облучатель (рис. 4). Диаграмма направленности данного облучателя имеет столообразную форму [11, 12] в заданном секторе углов и хорошее согласование в полосе частот от 12,5 ГГц до 17 ГГц, что охватывает практически весь К<sub>u</sub>-диапазон длин волн. На рис. 4 показана структура облучателя: трансформатор с прямоугольного волновода на круглый, конический рупор и фланец с пятью проточками. Габариты облучателя составляют 150x96,6x96,6 мм<sup>3</sup>.

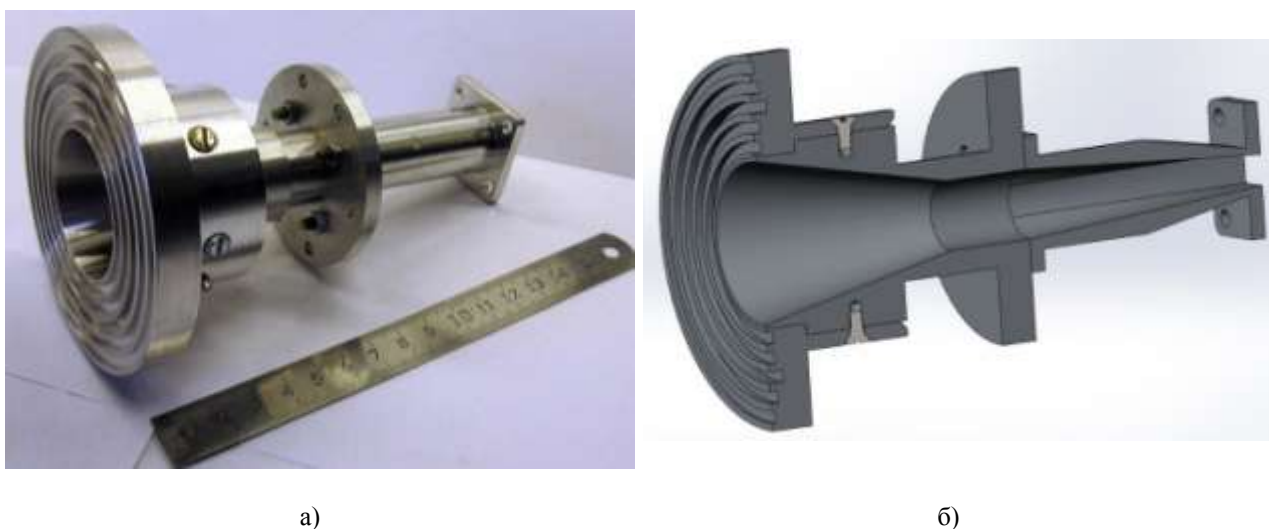


Рис. 4. Облучателя зеркала радиоколлиматора АКК1-05: после сборки (а), трехмерная модель в разрезе (б)

Амплитудно-фазовое распределение в раскрытии облучателя, формирующие столообразную ДН, обеспечено за счет выбора глубины и ширины проточек, их взаимного расположения. Сечения в Е- и Н-плоскостях расчетной диаграммы направленности облучателя на частоте 14 ГГц представлены на рис. 5. Расчет выполнен в программе электродинамического моделирования на основе метода конечных разностей во временной области.

Проведена серия измерений ДН облучателя радиоколлиматора на разработанном лабораторном стенде на основе планарного сканера ближнего электромагнитного поля (рис. 6). Согласно требованиям к измерениям ближнего поля планарными сканерами [6, 15] расстояние  $R$  от раскрытия облучателя до зонда составляет не менее  $3\lambda$  (где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве). При расстоянии  $R=60$  мм и размере области измерения вдоль каждой оси планарного сканера  $L=300$  мм по формуле (1) вычислен сектор углов  $\theta=60^\circ$ , в котором будет восстановлена ДН исследуемой антенны.

$$L = 2 \cdot \tan \theta \cdot R + D_{\text{ант}}. \quad (1)$$

В таблице 1 представлены параметры измерительного стенда.

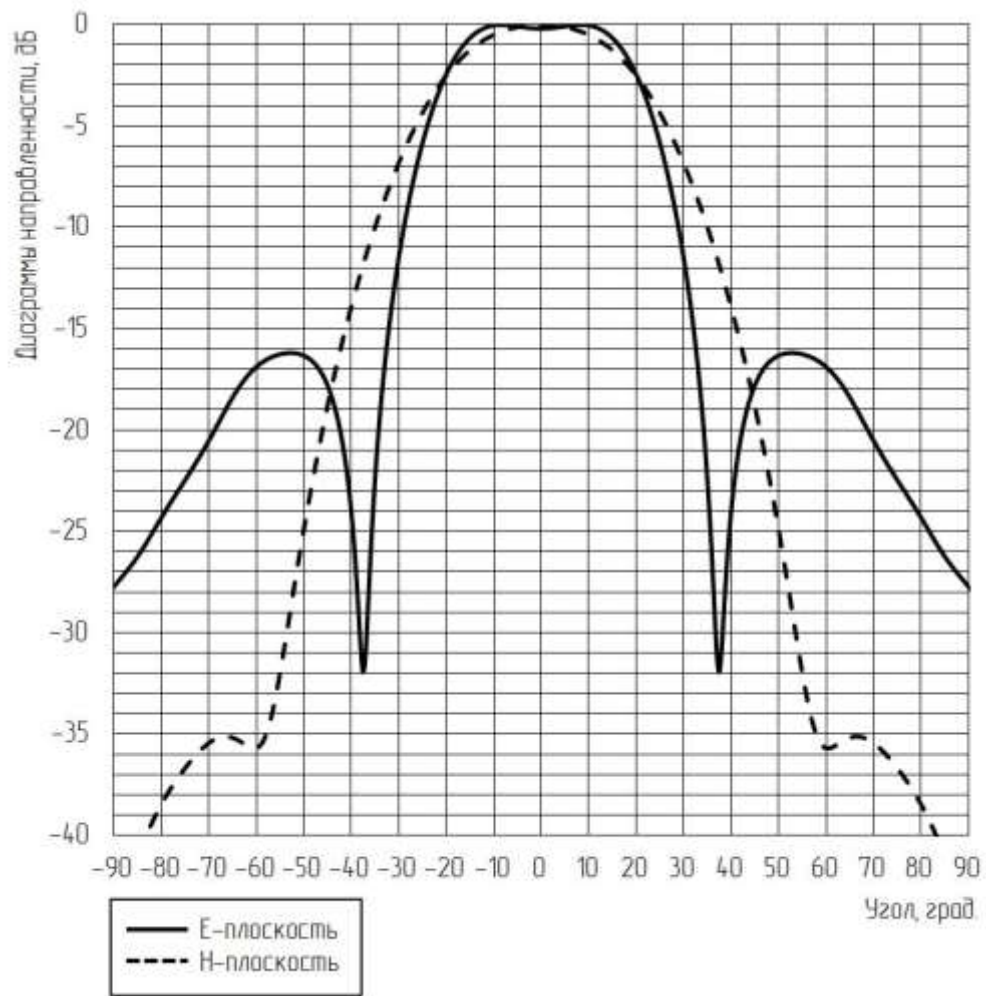


Рис. 5. Сечения нормированной диаграммы облучателя в E и H-плоскостях на частоте 14 ГГц



а)



б)

Рис.6. Стенд измерения характеристик излучения антенн методом планарных измерений ближнего электромагнитного поля

Таблица 1. Параметры измерительного стенда

№	Параметр	Значение	Примечание
1	Полоса частот $\Delta F$ , ГГц	10 – 18	
2	Поляризация поля	линейная	вертикальная
3	Расстояние между зондом и антенной, мм	60	
4	Количество измеренных точек в полосе частот	1601	$\Delta f=5\text{МГц}$ – дискрет частотного спектра
5	Ширина фильтра, кГц	10	
6	Временное окно, нс	1,4 нс	опционально
7	Излученная мощность, дБм	0	1 мВт
8	Измеряемый параметр	S21	коэффициент передачи
9	Шаг перемещения по осям, мм	X	10
		Y	10
10	Количество точек	X	31
		Y	31
		Всего	961
11	Диаметр раскрыва исследуемой антенны, мм	96,6	

На рис. 7 представлены измеренные распределения амплитуды и фазы основной составляющей ( $E_y$ ) вектора напряженности электромагнитного ближнего поля.

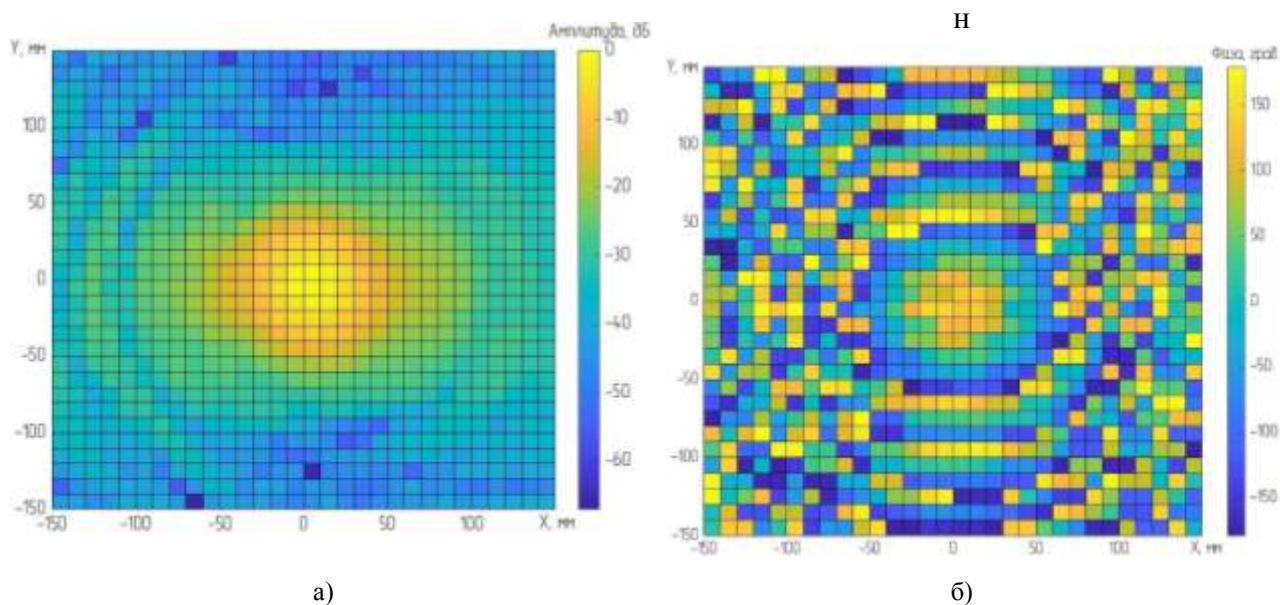


Рис.7. Амплитуда (а) и фаза (б)  $E_y$  ближнего электромагнитного поля

### 3. Измерение характеристик излучения облучателя коллиматора АКК1-05 в дальней зоне

Для проверки качества облучателя и соответствия его ДН расчетным значениям проведены классические измерения облучателя в дальней зоне методом «точка-точка». Для проведения данного эксперимента собран лабораторный стенд, состоящий из приемной и

передающей частей. Генератор СВЧ-сигналов, излучающий гармонический сигнал на частоте 14 ГГц, подключался к пирамидальному рупору. К исследуемой антенне, расположенной на опорно-поворотном устройстве (ОПУ) (рис. 8), присоединялся СВЧ измеритель мощности. Управление ОПУ, съем данных с угловых датчиков и измерителя мощности осуществлено с помощью специального программного обеспечения на ПЭВМ.



Рис. 8. Облучатель радиоколлиматора АКК1-05 на ОПУ

Расстояние между приемной и передающей антеннами выбрано исходя из условия для обеспечения дальней зоны. Граница дальней зоны вычислена по формуле (2).

$$R \geq R_{\text{д.з.}} = \frac{2 \cdot (D_1 + D_2)^2}{\lambda}, \quad (2)$$

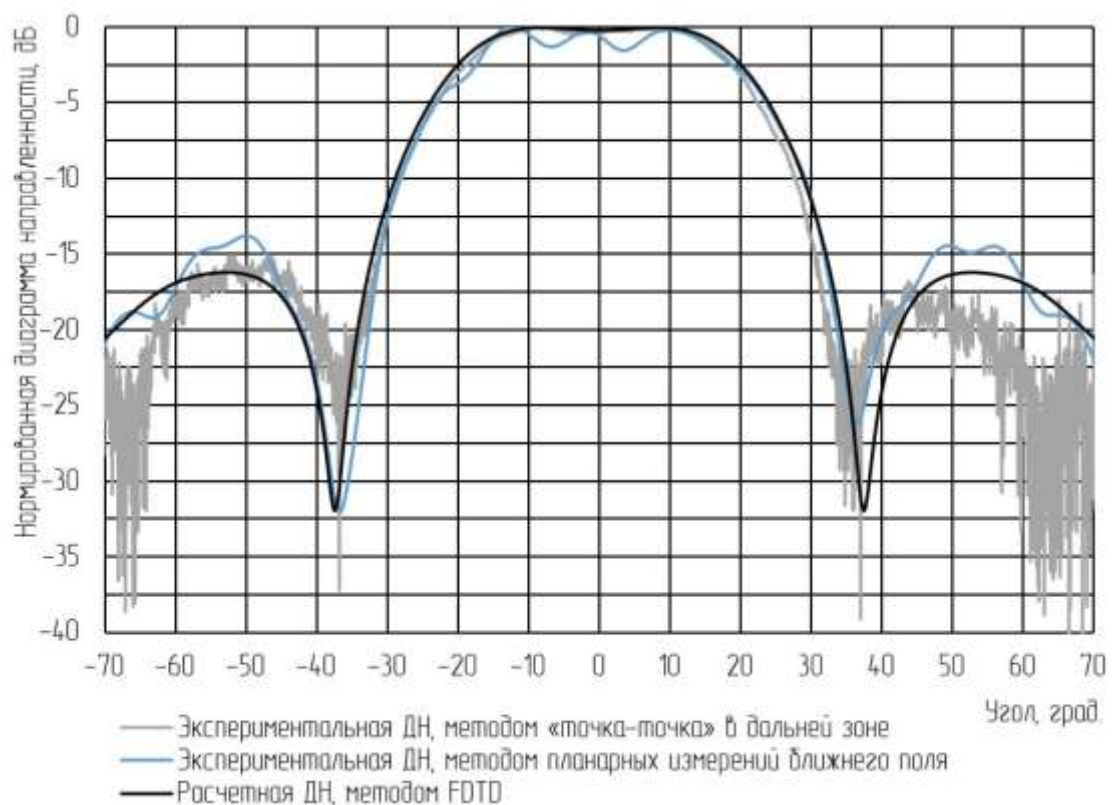
где,  $R$  – расстояние между фазовыми центрами антенн, м;

$R_{\text{д.з.}}$  – граница дальней зоны, м;

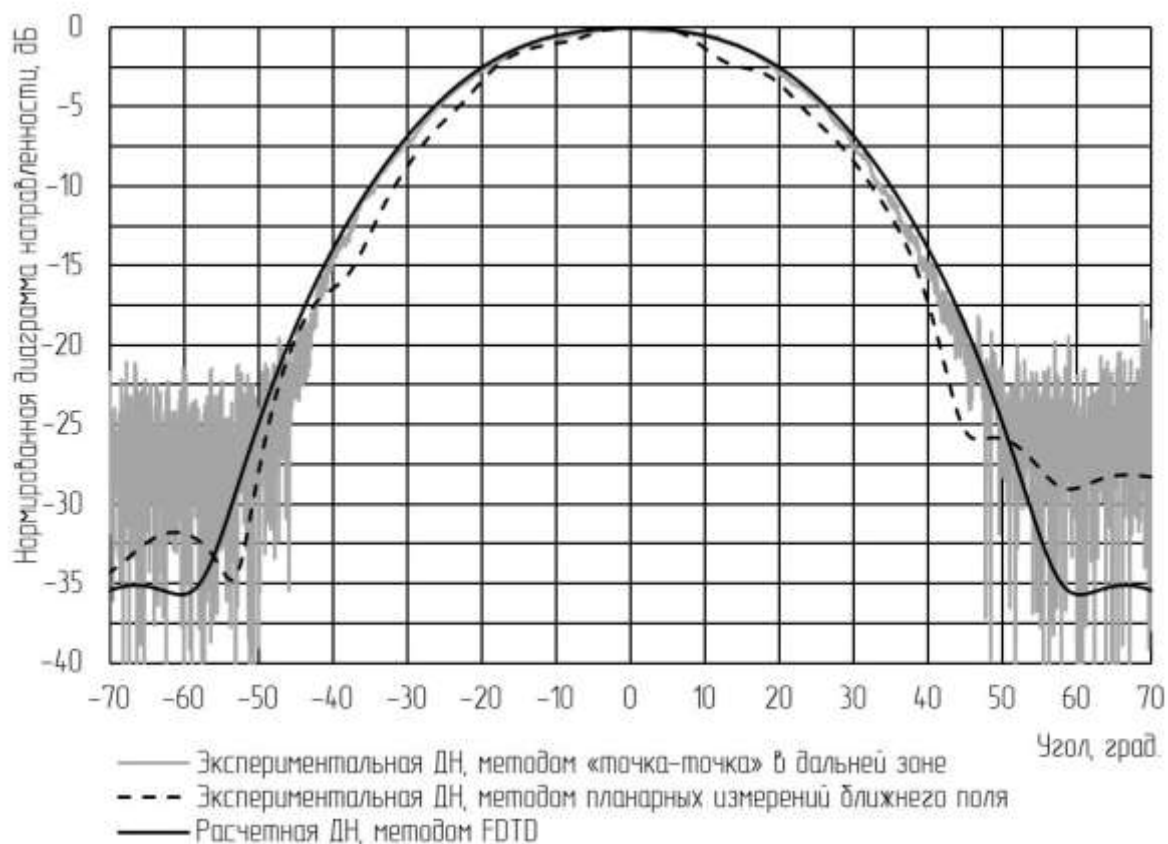
$D_1$  – диаметр раскрыва исследуемой антенны, м;

$D_2$  – диаметр раскрыва передающей антенны (пирамидального рупора), м.

Сечения диаграмм направленности исследуемого облучателя радиоколлиматора АКК1-05 в Е- и Н-плоскостях на частоте 14 ГГц, полученные расчетным методом, методом планарных измерений ближнего поля и методом «точка-точка» в дальней зоне, представлены на рис. 9-10, соответственно.



**Рис. 9.** Сечения ДН в E-плоскости на частоте 14 ГГц, полученные различными методами



**Рис.10.** Сечения ДН в H-плоскости на частоте 14 ГГц, полученные различными методами

Из графиков на рис. 9-10 видно, что в пределах  $\pm 40^\circ$  расчетная и экспериментальные ДН значительно совпадают. Вне этого сектора углов значения экспериментальных ДН начинают расходиться. В дальней зоне это объясняется низким уровнем динамического диапазона данного стенда из-за значительного расстояния (8 м). Диаграмма направленности, измеренная методом «точка-точка» в дальней зоне, зашумлена начиная с уровня минус 22 дБ. Данный недостаток устраняется при установке дополнительного усилителя СВЧ мощности в передающем тракте. Диаграмма направленности, полученная методом планарных измерений ближнего поля, лишена данного недостатка, так как расстояние между исследуемыми объектами мало (6 см). Незначительные отклонения формы ДН, полученной с помощью планарного сканера, вызваны тем, что в алгоритм обработки не внесена компенсация формы ДН зонда [16, 17].

### Заключение

На основе экономичного компактного планарного сканера ближнего электромагнитного поля разработан и изготовлен лабораторный стенд, предназначенный для измерения характеристик излучения антенн СВЧ и КВЧ диапазонов частот. Разработан и изготовлен облучатель Ку-диапазона длин волн для радиоколлиматора компактного полигона АКК1-05 (ДФ МГТУ им. Н.Э. Баумана). Конструкция фланца с проточками обеспечивает столбовую диаграмму направленности облучателя и хорошее согласование в полосе частот от 12,5 ГГц до 17 ГГц

Экспериментальные диаграммы направленности облучателя в ближней зоне методом планарных измерений и методом «точка-точка» в дальней зоне сошлись с расчетными диаграммами направленности. Проведенный эксперимент показал эффективность разработанного компактного планарного сканера.

### Список литературы

1. Курочкин А.П. Теория и техника антенных измерений // Антенны. 2009. № 7(146). С. 39-44.
2. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. Измерения параметров антенно-фидерных устройств. 2-е изд. М.: Связь, 1972. 352 с.
3. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Отв. ред. Л.Д. Бахрах. Л.: Наука, 1985. 272 с.
4. Picard D. Antenna measurement // Microwave and millimeter wave technologies: Modern UWB antennas and equipment / Ed. by I. Minin. Olajnica: In-Teh, 2010. Pp. 193-214.
5. Antenna engineering handbook / Ed. by J.L. Volakis. 4<sup>th</sup> ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2007.
6. Yaghjian A. An overview of near-field antenna measurements // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34. No. 1. Pp. 30-45. DOI: [10.1109/TAP.1986.1143727](https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143727)
7. Калинин Ю.Н. Измерение диаграмм направленности антенн в планарном сканере без измерения фазы // Антенны. 2015. № 1 (212). С. 61-68.

8. Кривошеев Ю.В., Шишлов А.В. Сравнение методов восстановления диаграммы направленности по измерениям в зоне Френеля и в ближней зоне // Антенны. 2015. № 2 (213). С. 55-63.
9. Радченко В.Ю., Зимницкая Л.В., Кравченко М.А. FDM технологии // Gaudeamus Igitur. 2015. № 1. С. 129-131.
10. Бей Н.А., Митрохин В.Н., Парщиков А.А., Ямашкин В.П. Антенный полигон с зеркальным коллиматором // Антенны. 2006. № 7. С. 83-84.
11. Митрохин В.Н., Можаров Э.О., Пропастин А.А. Облучатель Ka-диапазона волн с секторной диаграммой направленности // Антенны. 2015. № 9(220). С. 3-8.
12. Можаров Э.О. Исследование качества работы зеркального коллиматора Ka-диапазона волн с использованием тестовых антенн // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2013. № 2. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/550923.html> (дата обращения 18.09.2017).
13. Instrument control toolbox – Работа с данными. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/instrumcontrol/index.php> (дата обращения 10.09.2017).
14. Ashok Kumar V., Narasimha Raju K., Venu Gopala Rao M. Cost effective implementation of 3D space vector modulation using Matlab-Aurduino interface // Intern. J. of Applied Engineering Research (IJAER). 2014. Vol. 9. No. 20. Pp. 6525-6541.
15. Bing Yan B, Saoudy S.A., Sinha B.P. A low cost planar near-field/far-field antenna measurement system // Antennas and Propagation Soc. Intern. Symp. (Montreal, Canada, July 13-18, 1997): Digest. Vol. 1. N.Y.: IEEE, 1997. Pp. 152-155. DOI: [10.1109/APS.1997.630109](https://doi.org/10.1109/APS.1997.630109)
16. Joy E.B. Near-field qualification methodology // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1988. Vol. 36. No. 6. Pp. 836-844. DOI: [10.1109/8.1186](https://doi.org/10.1109/8.1186)
17. IEEE recommended practice for near-field antenna measurements: IEEE Standard 1720-2012. N.Y.: IEEE, 2012. 90 p. DOI: [10.1109/IEEESTD.2012.6375745](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6375745)

## Measuring Bench Based on a Compact Planar Scanner of the Near Electromagnetic Field

E.O. Mozharov<sup>1,2,\*</sup>,

\*[eduardmozharov@yandex.ru](mailto:eduardmozharov@yandex.ru)

D.S. Mikhaylov-Ovsyannikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Research Institute of Radio Electronic Technology by Bauman

Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** irradiator, table far-field pattern, collimator, near-field, planar scanner, far-field pattern, compact range, Ku-band of wavelengths

---

The introduction presents main advantages and disadvantages of the actively developed near-field methods to measure the far-field patterns of antennas. The article's proposal is to eliminate the shortcoming of high costly planar near-field scanners, used to verify the characteristics of weakly directional antennas, through the economical automatic designs similar to those used in FDM-based 3D printers. A laboratory bench for planar near-field measurements designed and assembled ad hoc to measure radiation characteristics of microwave antennas. Its main parts are the planar scanner, the microwave-measuring unit with a measuring probe and the PC with special software.

The electromagnetic near-field planar scanner with a positioning accuracy of 80  $\mu\text{m}$  was developed and put into operation. The Arduino UNO R3 controller with the Arduino motor shield V2 module was used to provide PC-based control of the planar scanner through USB interface.

The specialized software package developed in Matlab environment for bench control and data retrieval includes a planar scanner control program and a far-field patterns calculation program based on the amplitude-phase field distribution in the plane in front of antenna. The developed control program with a graphical interface allows us to synchronise operation of the vector network analyzer and planar scanner, control the probe position, read data from the vector network analyzer.

A Ku-band reflector radio-collimator irradiator with a table-shaped radiation pattern and good agreement within the 12.5 - 17 GHz frequency band was designed and manufactured. The comparative analysis of the calculated irradiator far-field pattern with the measured ones is carried out. Experimental far-field patterns were obtained both on the developed laboratory near-field bench and by the "point-to-point" method on the far-field bench.

The conducted experiment has shown that the developed laboratory bench based on the economical compact near-field planar scanner is efficient.

## References

1. Kurochkin A.P. Theory and technique of antenna measurements. *Antenny* [Antennas], 2009, no. 7(146), pp. 39-44 (in Russian).
2. Fradin A.Z., Ryzhkov E.V. *Izmereniia parametrov antenno-fidernykh ustroystv* [Measurements of the parameters of antenna-feeder devices]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Sviaz Publ., 1972. 352 p. (in Russian).
3. *Metody izmerenij parametrov izluchayushchikh sistem v blizhnej zone* [Methods for measuring the parameters of radiating systems in the near zone] / Ed. by L.D. Bakhrakh. Leningrad: Nauka Publ., 1985. 272 p. (in Russian).
4. Picard D. Antenna measurement. *Microwave and millimeter wave technologies: Modern UWB antennas and equipment* / Ed. by I. Minin. Olajnica: In-Teh, 2010. Pp. 193-214.
5. Antenna engineering handbook / Ed. by J.L. Volakis. 4<sup>th</sup> ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2007.
6. Yaghjian A. An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 1, pp. 30-45. DOI: [10.1109/TAP.1986.1143727](https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143727)
7. Kalinin Yu.N. Phaseless planar near-field measurements of antenna directional patterns. *Antenny* [Antennas], 2015, no. 1 (212), pp. 61-68 (in Russian).
8. Krivosheev Yu.V., Shishlov A.V. Comparison of Fresnel-field to far-field and near-field to far-field transformations. *Antenny* [Antennas], 2015, no. 2 (213), pp. 55-63 (in Russian).
9. Radchenko V.Yu., Zimnitskaya L.V., Kravchenko M.A. FDM technology. *Gaudeamus Igitur* [Gaudeamus Igitur], 2015, no. 1, pp. 129-131 (in Russian).
10. Bej N.A., Mitrokhin V.N., Parshchikov A.A., Yamashkin V.P. Antenna polygon with reflector collimator. *Antenny* [Antennas], 2006, no. 7, pp. 83-84 (in Russian).
11. Mitrokhin V.N., Mozharov E.O., Propastin A.A. Ka-band feed antenna with flat-topped radiation pattern. *Antenny* [Antennas], 2015, no. 9(220), pp. 3-8 (in Russian).
12. Mozharov E.O. Investigation of the quality of the Ka-band mirror collimator using test antennas. *Molodezhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik MGTU im. N.E. Baumana* [Youth Scientific and Technical Herald of the Bauman MSTU], 2013, no. 2. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/550923.html>, accessed 18.09.2017.
13. *Rabota s dannymi* [Instrument control toolbox]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/instrumcontrol/index.php>, accessed 10.09.2017 (in Russian).
14. Ashok Kumar V., Narasimha Raju K., Venu Gopala Rao M. Cost effective implementation of 3D space vector modulation using Matlab-Aurduino interface. *Intern. J. of Applied Engineering Research (IJAER)*, 2014, vol. 9, no. 20, pp. 6525-6541.
15. Bing Yan, Saoudy S.A., Sinha B.P. A low cost planar near-field/far-field antenna measurement system. *Antennas and Propagation Soc. Intern. Symp. (Montreal, Canada, July 13-18, 1997): Digest. Vol. 1.* N.Y.: IEEE, 1997. Pp. 152-155. DOI: [10.1109/APS.1997.630109](https://doi.org/10.1109/APS.1997.630109)

16. Joy E.B. Near-field qualification methodology. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, vol. 36, no. 6, pp. 836-844. DOI: [10.1109/8.1186](https://doi.org/10.1109/8.1186)
17. IEEE recommended practice for near-field antenna measurements: IEEE Standard 1720-2012. N.Y.: IEEE, 2012. 90 p. DOI: [10.1109/IEEESTD.2012.6375745](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6375745)