

УДК 621.396.67.012.12

ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ В РАМКАХ МЕТОДОЛОГИИ СХОДЯЩЕГОСЯ ПУЧКА ПЛОСКИХ ВОЛН

Л. К. Т. Абухадма, А. В. Дардымов, В. Н. Лаврушев, Ю. И. Чони

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10

Статья поступила в редакцию 12 июня 2019 г.

Аннотация. Обсуждаются результаты физического эксперимента по реконструкции диаграммы направленности (ДН) антенны, выполненного в условиях учебной лаборатории. Измерительным прибором служил переносной векторный анализатор цепей R&S FSH-8. Файлы результатов считывались программой обработки, реализующей методологию сходящегося пучка плоских волн. При габарите тестовой антенны в плоскости измерений 1.5λ она облучалась с короткого расстояния в 4λ . Одной из целей эксперимента была проверка применимости двухмерного подхода (измерения и восстановление ДН в плоскости) в реальной неизбежно трехмерной ситуации. Средний квадрат отклонения (СКО) реконструированной ДН от истинной ДН составил 0.04 при его значении 0.23 для первичных результатов. Таким образом, результаты эксперимента следует признать обнадеживающими, тем более что в обрабатываемых данных присутствует инструментальная погрешность.

Ключевые слова: экспериментальная установка, измерения, сходящийся пучок плоских волн, пространственный спектр, диаграмма направленности, алгоритм восстановления.

Abstract. The results of the physical experiment on the reconstruction of the radiation pattern (DN) of the antenna performed in the educational laboratory are discussed. The R & S FSH8 handheld vector network analyzer served as a measuring instrument. Our processing program that implements the methodology of a convergent cluster of plane waves (CCPW) reads a data file from the HSF8 unit. In the measurement plane, the antenna under test has dimension of 1.5λ . It was

irradiated from a short distance of 4λ . One of the objectives of the experiment was to test the applicability of the two-dimensional approach (measurement and retrieval of the antenna radiation pattern (ARP) in the plane) for an inevitably three-dimensional situation in reality. The mean square deviation of the retrieval ARP from the true one was 0.04, while its value for the primary data was 0.23. Thus, the results of the experiment are quite encouraging, especially given the instrumental error in the processed data.

Key words: experimental setup, measurements, convergent cluster of plane waves, spatial spectrum, radiation pattern, reconstruction algorithm.

Введение

Исследования по проблеме реконструкции диаграмм направленности (ДН) антенн по результатам измерений в условиях далеких от идеальных (например, из-за близости вспомогательной антенны и наличия отражений) начинались лет тридцать назад и носили исключительно теоретический характер [1 – 3].

С появлением современных векторных анализаторов цепей таких фирм, как Rohde&Schwarz (Германия), Agilent Technologies (США), Micran (Россия), стало возможным проводить амплифазометрические измерения с последующей цифровой обработкой накопленных данных. По-видимому, этот фактор играет не малую роль в возобновлении интереса к проблеме реконструкции ДН [4 – 9]. Однако, по-прежнему предметом исследований остается вычислительная сторона дела: алгоритмы и их устойчивость, подтверждаемая результатами или вытекающая из результатов компьютерного моделирования процесса измерений и вторичной обработки полученных данных. Причем, превалирует двумерная постановка задач. Наши предыдущие публикации [8 – 9] принадлежат этому «мейнстриму». Их отличие от работ других авторов порождается тем, что облучающее поле представляется в виде сходящегося пучка плоских волн (СППВ). В остальном, та же классика: скалярная двумерная постановка задачи плюс числовое моделирование.

Предмет настоящей публикации – результаты не виртуального, а

реального эксперимента по реконструкции ДН при облучении испытуемой антенны недостаточно удаленной вспомогательной антенной. Будучи ограниченными условиями и возможностями учебной лаборатории, мы провели весьма скромный эксперимент. Однако, кроме естественного интереса к тому, как на практике проявят себя достаточно абстрактные и изощренные математические приемы реконструкции ДН, была и другая цель. Естественно, что реальный эксперимент по природе своей неизбежно трехмерен. Но интуитивные соображения, в частности, упомянутые в [8], дает надежду на то, что для плоской антенны и ДН, измеряемой и восстанавливаемой в той же плоскости, двухмерный вариант измерений и обработки может дать приемлемые результаты. Так ли это, должен был показать эксперимент.

1. Реконструкция ДН в рамках методологии СППВ

Ограничимся кратким изложением применяемого подхода для двухмерной скалярной ситуации (рис. 1), когда ДН антенны $F_a(\psi)$ измеряется в плоскости, и облучающее ее поле есть СППВ в той же плоскости.

Пусть облучающее поле создается источником сферической волны, расположенным относительно близко в точке D . На первом этапе находят пространственный спектр СППВ, т.е. комплексные амплитуды волн $\{A_n = A(\varphi_n)\}$ пучка, воспроизводящего это поле. Для этого зонд (рис. 1), ДН которого $f_3(\psi)$ точно известна, вращают по окружности радиуса R_0 с шагом δ .

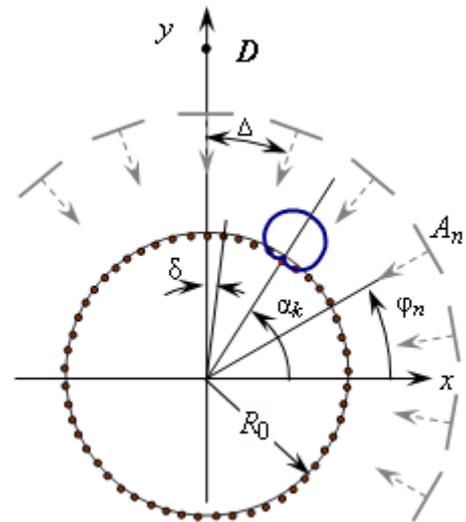


Рис. 1. Геометрия задачи

Очевидно, что с точностью до постоянного множителя сигнал $V_3(\alpha_k)$, принимаемый зондом в K точках ($k = 1..K$), связан со спектром СППВ равенством

$$V_3(\alpha_k) = \sum_{n=1}^N A(\varphi_n) f_3(\varphi_n - \alpha_k) \exp(jk R_0 \cos(\varphi_n - \alpha_k)), \quad (1)$$

где α – угол поворота зонда, $\{\varphi_n\}$ – направления прихода N волн пучка с угловым дискретом Δ кратным δ , фазовый сомножитель $\exp(jk R_0 \cos(\varphi_n - \alpha_k))$ учитывает смещение зонда от начала координат. Решая СЛАУ (1), по измеренным сигналам $V_3(\alpha_k)$ находят пространственный спектр $\{A_n = A(\varphi_n)\}$.

На втором этапе вращают испытываемую антенну, измеряют принимаемый ею сигнал $U_a(\alpha_k)$ и восстанавливают ДН антенны $F_a(\psi)$. При этом искомую ДН целесообразно представить разложением по M базисным функциям [9]

$$F_a(\psi) = \sum_{m=1}^M a_m g_m(\psi),$$

в качестве которых естественно выбрать равное число

синусов и косинусов.

Поскольку ДН антенны $F_a(\psi)$ есть реакция антенны на плоскую волну, приходящую с направления ψ , то имеем следующую СЛАУ из K уравнений относительно M неизвестных коэффициентов $\{a_m\}$

$$U_a(\alpha_k) = \sum_{m=1}^M a_m \left[\sum_{n=1}^N A_n g_m(\varphi_n - \alpha_k) \right]. \quad (2)$$

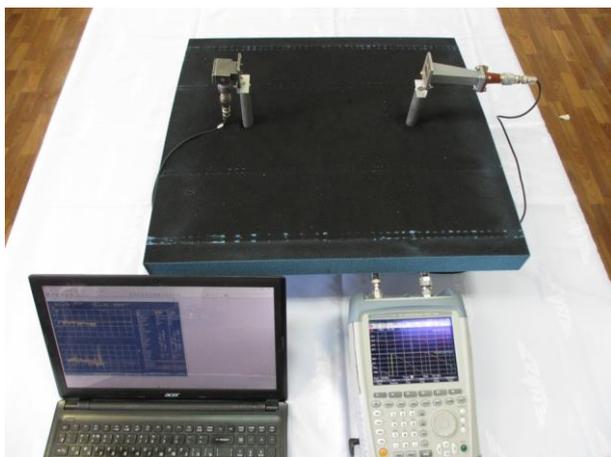
С формальной точки зрения на числа K , N и M накладываются лишь два ограничения: $K \geq N$ и $K \geq M$. Ясно однако, что значения N и M ограничены снизу условием достаточно точного представления, соответственно, облучающего поля и ДН антенны, а сверху они ограничены условием приемлемой обусловленности СЛАУ (1) и (2).

Что же касается числа K точек измерений, то, в принципе, чем их больше, тем лучше. Однако, если угловой дискрет отсчетов δ (рис. 1) меньше разрешающей способности испытываемой антенны, что проявляется в условии $K > M$, то его дальнейшее сокращение (рост числа K) практически не влияет на результаты решения СЛАУ (2). Аналогичным образом обстоят дела и с условием $K \geq N$. Таким образом, в конкретной ситуации нет однозначного сочетания значений K , N и M , но существуют целесообразные интервалы.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Измерительная установка

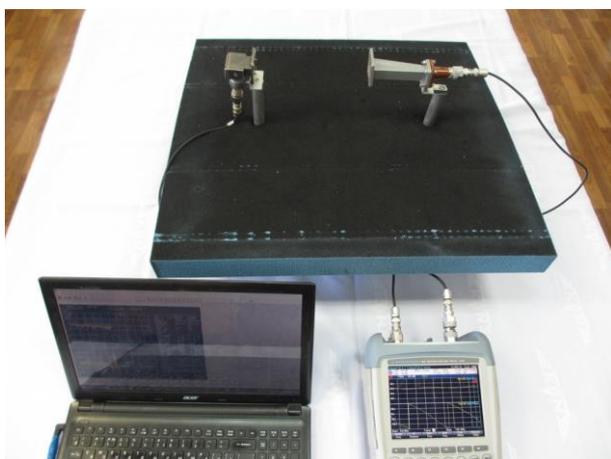
На рис. 2 представлены фотографии установки, собранной в учебной лаборатории на различных этапах измерений. Она состоит из неподвижной стойки (слева) со вспомогательной антенной, в качестве которой служил открытый конец волновода с фланцем; поворотной стойки (справа), на которой крепится зонд или испытываемая антенна; листа $70 \times 70 \text{ см}^2$ радиопоглощающего материала; портативного векторного анализатора цепей R&S FSH8; и ПК для программной обработки данных. К сожалению, трехсантиметровый диапазон волн, с имеющимся в лаборатории набором щелевых и апертурных антенн, лежит за пределами рабочего диапазона прибора FSH8, и измерения проводились на частоте $f = 7 \text{ ГГц}$.



а) измерение ДН зонда



б) измерение ДН рупора



в) Этап 1: синтез СППВ



г) Этап 2: реконструкция ДН

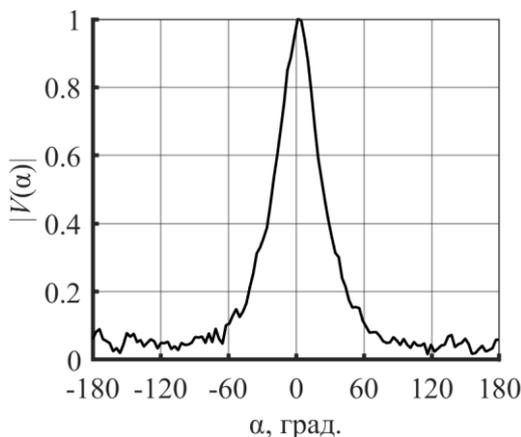
Рис. 2. Экспериментальная установка

Расстояние D между стойками составляло 30см, зондом служил открытый конец волновода WG-15 с фланцем, который вращался по окружности радиуса $R_0 = 14.5$ см (рис.2в), испытуемой антенной – Н-плоскостной рупор с раскрывом $65 \times 12 \text{ мм}^2$, смещенный с оси вращения на длину $L = 12.5$ см (рис. 2г). Расстояние D достаточно велико для измерения ДН не смещенных зонда и рупора (рис. 2а, 2б). Измеренная ДН зонда $f_3(\psi)$ использовалась при расчете спектра $\{A_n\}$ при формировании матрицы СЛАУ (1), а измеренная ДН рупора – при оценке результата реконструкции. Вращение и зонда, и антенны осуществлялось с угловым дискретом $\delta = 3^\circ$ (число отсчетов $K = 120$).

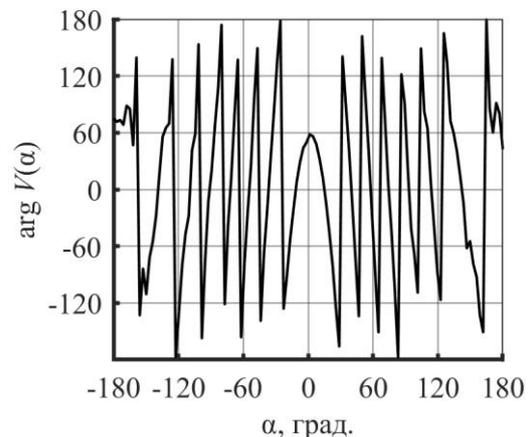
2.2. Восстановление пространственного спектра СППВ (Этап 1)

Массив отсчетов комплексных амплитуд $V_3(\alpha_k)$ формировался в следующем формате: угол в градусах, реальная и мнимая части коэффициента передачи. Фрагмент соответствующего файла приведен ниже, а в графическом виде, как зависимости амплитуды и фазы – на рис. 3.

```
-180.000000; 0.107840; 0.045633
-177.000000; 0.110519; 0.021558
-174.000000; 0.108029; -0.000782
-171.000000; 0.101984; -0.021003
-168.000000; 0.093387; -0.039515
-165.000000; 0.082262; -0.056880
```



а) амплитуда сигнала $|V_3(\alpha_k)|$



б) фаза сигнала $\arg V_3(\alpha_k)$

Рис. 3. Сигнал зонда $V_3(\alpha)$

На рис. 4 представлен полученный как решение СЛАУ (1) пространственный спектр $\{A(\varphi_n)\}$ СППВ, аппроксимирующего сферическую

волну вспомогательной антенны (открытый конец волновода с фланцем), расположенной в точке D .

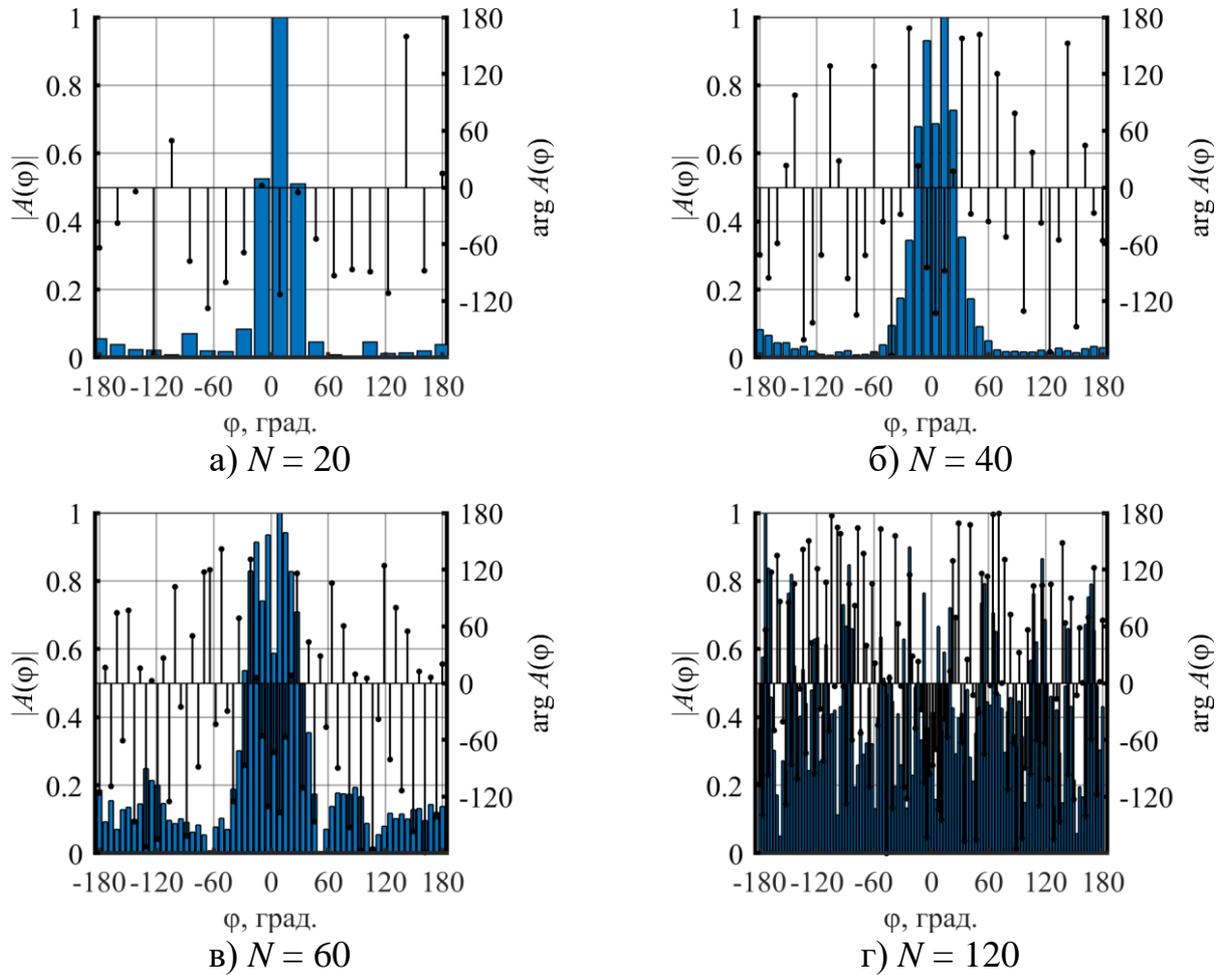
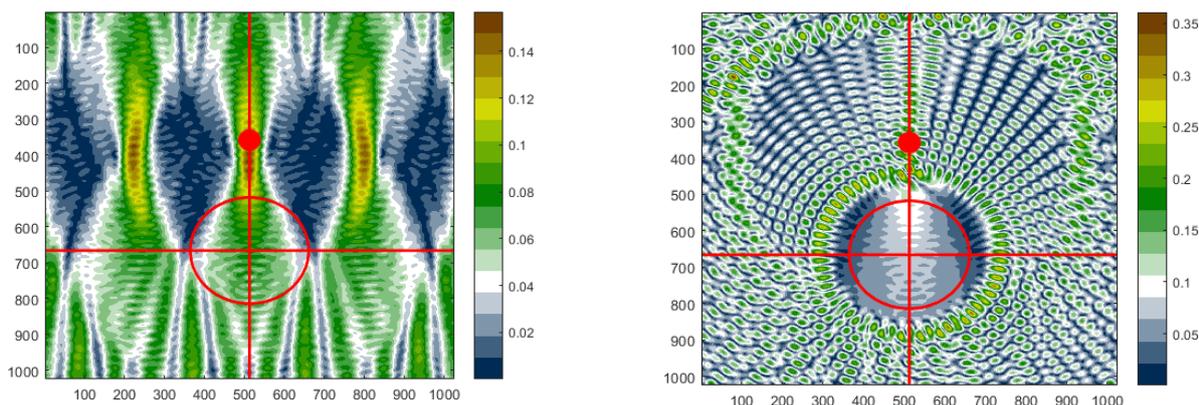


Рис.4. Пространственный спектр $\{A_n\}$ СППВ

На рис. 4а, 4б ожидаемо преобладают волны лучей из окрестности точки D . Число волн пучка $N = 60$ велико, а $N = 120$ слишком велико для области S , ограниченной радиусом $R_0 = 3.4\lambda$, как следствие – плохая обусловленность СЛАУ (1), приводящая к доминированию в спектре СРРВ резко осциллирующих высокочастотных пространственных гармоник.

На рис. 5 приведены амплитудные рельефы полей, порождаемых соответствующими СППВ, для двух ситуаций: «хорошей» и «плохой». Здесь жирная красная точка отмечает положение вспомогательной антенны. Эти рельефы по структуре аналогичны полям, полученным при имитационном моделировании двумерной задачи [8].



а) $N = 40$

б) $N = 120$

Рис. 5. Амплитудные рельефы полей СППВ

Рельеф поля СППВ вне рабочей области радиуса R_0 не имеет никакого отношения к реальному полю, а в пределах этой области соответствует структуре поля от вспомогательной антенны. При этом осцилляции рельефа поля, обусловленные наличием в пространственном спектре «встречных» волн (при $\varphi_n \approx 180^\circ$), не очень велики. Для определенности, на рис. 6

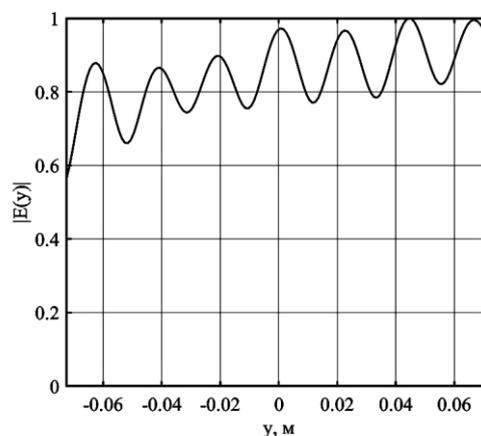


Рис. 6. Поле СППВ на оси $0y$

представлен график изменения амплитуды поля вдоль оси $0y$. Доминирующим фактором является ослабление этого поля по мере удаления от точки D .

2.3. Восстановление пространственного спектра СППВ (Этап 2)

На рис. 7 представлена зависимость $U_a(\alpha_k)$, полученная при вращении испытуемой антенны.

На этапе реконструкции ДН испытуемой антенны искалась в виде разложения по 20-ти четным и 20-ти нечетным базисным функциям: $\cos(m\psi)$ и $\sin(m\psi)$ при $m = 0..19$. На рис. 8 представлены полученные результаты.

Здесь черные линии относятся к восстановленной ДН антенны, красные – к рассчитанной в среде CST ДН испытуемой антенны, синие – к измеренной ДН антенны. Для сравнения, на рис. 8а пунктиром повторена зависимость $|U_a(\alpha_k)|$ с рис. 7а, т.е. амплитудная ДН антенны до реконструкции. Естественно,

эта зависимость обусловлена по двум причинам: при вращении рупора направление в точку D изменяется резко, чем угол поворота α , плюс изменение расстояния до вспомогательной антенны усиливает ослабление сигнала $U_a(\alpha_k)$.

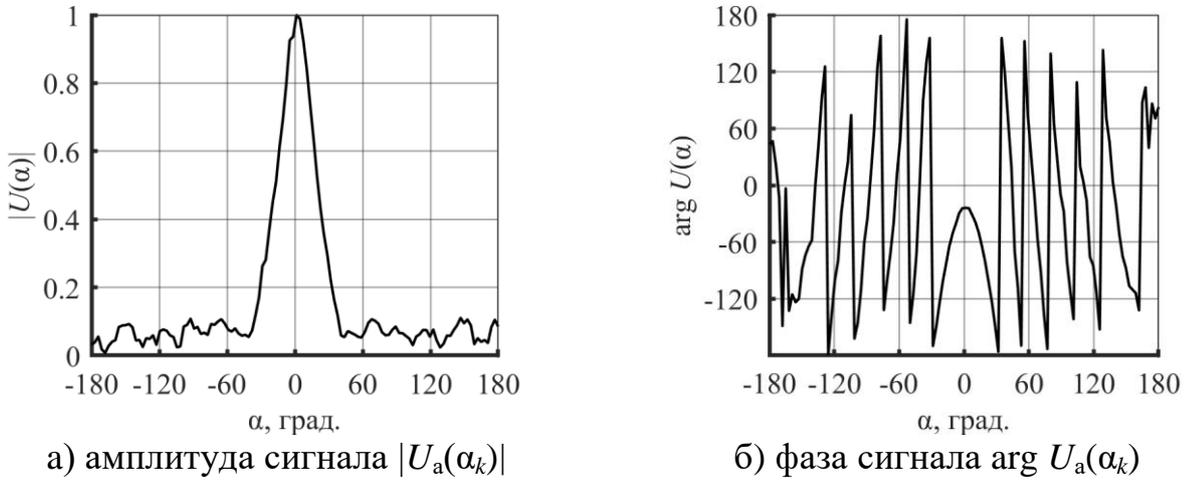


Рис. 7. Сигнал от испытуемой антенны $U_a(\alpha)$

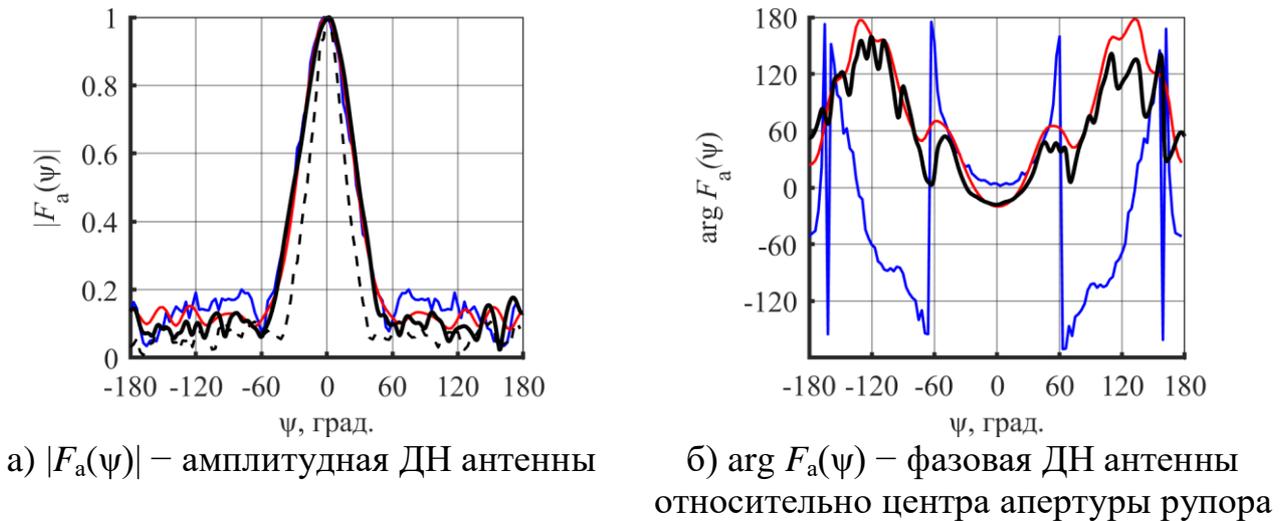


Рис. 8. Реконструированная ДН испытуемой антенны

Корректность расчетов в CST подтверждается хорошим совпадением расчетной с измеренной диаграмм. Для наглядности и удобства фазовые ДН антенны приведены без множителя $\exp(j kL \cos(\psi))$, т.е. относительно центра раскрыва рупора. Обращает на себя внимание тот факт, что кривизна фазовой диаграммы в области малых углов ψ обратна (по знаку) кривизне фазовой диаграммы на рис. 7б, соответствующей смещению рупора, а вместе с ним и фазового центра, вперед на расстояние L от оси вращения. Это полностью

согласуется с тем фактом, что фазовый центр рупора слегка смещен внутрь рупора.

Средний квадрат отклонения реконструированной ДН от истинной ДН антенны составил 0.04 при его значении 0.23 для первичных данных. При этом под истинной ДН понималась как измеренная, так и рассчитанная в среде CST ДН рупора с дополнительной фазовой подставкой $\exp(j kL \cos(\psi))$, учитывающей смещение рупора с оси вращения.

Заключение

Результаты эксперимента убедительно свидетельствуют не только о состоятельности алгоритма реконструкции в рамках методологии СППВ, но и о применимости его двухмерного варианта при измерении реальной ДН в плоскости.

В случае антенны, протяженной не только в плоскости измерений, но и в поперечном направлении, заманчивая в практическом отношении применимость двухмерного подхода требует дополнительных исследований.

Литература

1. Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий, А. П. Курочкин. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне. – Л.: «Наука». 1985. 272 с.
2. С. А. Плохих, Д. М. Сазонов, В. И. Щербаков. Восстановление диаграмм направленности антенн методом эталонной антенны по амплифазометрическим измерениям в ближней зоне // Известия вузов. Радиоэлектроника, т. 30. 1987. № 2. С. 59 – 64.
3. Ю. И. Чони, С. А. Пироженко. Восстановление ДН антенны по результатам измерений в неидеальных условиях // Известия вузов. Радиоэлектроника. т. 35. 1992. №2. С. 43-50.
4. Loredo, S., M. R. Pino, F. Las-Heras Andres, and T. K. Sarkar, "Echo identification and cancellation techniques for antenna measurement in non-

- anechoic test sites" IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 100-107.
5. Weixin Zhao. Retrieval of free space radiation patterns through measured data in a non-anechoic environment. PhD dissertation. Syracuse University. USA. December 2013. 165 p. // [Электронный ресурс]. URL: <http://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=etd>
 6. М. В. Инденбом. Восстановление диаграммы направленности линейной антенны и устранение влияния отражений по измерениям в зоне Френеля // Антенны, 2013, № 3, С. 46-57.
 7. Ю. В. Кривошеев. Измерение характеристик антенн в зоне Френеля на разреженной сетке углов. Канд. дисс. ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». 2014
 8. И. Ю. Данилов, Ю. И. Чони. Методическая и шумовая погрешности восстановления диаграммы направленности антенны при измерениях в неидеальных условиях, представимых сходящимся пучком плоских волн. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/16/text.pdf>
 9. Yu. I. Choni, I. Yu. Danilov, L. K. T. Abuhadma. Antenna pattern retrieval from measurements in non-ideal anechoic chamber. // «2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications». Moscow, Russia 14-15 March 2018, pp. 198-204.

Для цитирования:

Л. К. Т. Абухадма, А. В. Дардымов, В. Н. Лаврушев, Ю. И. Чони. Физический эксперимент по реконструкции диаграммы направленности антенны в рамках методологии сходящегося пучка плоских волн. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/11/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.11