

Восстановление диаграммы направленности антенны, измеренной в неидеальных условиях

Ю.И. Чони¹, И.Ю. Данилов²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

² АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва»
662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск
ул. Ленина, 52

Анализируется процедура измерения диаграммы направленности испытуемой антенны, включающая обследование облучающего поля с помощью зонда, перемещаемого вокруг рабочей зоны. Это поле представляется в виде сходящегося пучка плоских волн, пространственный спектр которого используется на этапе восстановления диаграммы направленности. На примере двумерной скалярной задачи (измерение в плоскости и в условиях, когда поляризации антенны и облучающего поля одинаковы) внутри и вне рабочей зоны демонстрируются рельефы полей, образованных пучками плоских волн при аппроксимации сферической волны от относительно близкого источника. Сопоставляется методическая погрешность восстановления диаграммы направленности при использовании изотропного зонда и зонда с кардиоидной диаграммы направленности. Худшая обусловленность соответствующей системы алгебраических уравнений в первом варианте приводит к яркому росту осцилляций в аппроксимированном облучающем поле и к менее точному восстановлению диаграммы направленности.

Ключевые слова: диаграмма направленности антенны, измерение, плоская электромагнитная волна, сходящийся пучок плоских волн, пространственный спектр, зонд, реконструкция, точность.

Введение

На современном этапе развития техники измерений наблюдается устойчивая тенденция к расширению сфер применения косвенных методов, сопряженных со все более сложными процедурами обработки первичных данных. Одним из типичных представителей этого направления является восстановление истинной диаграммы направленности (ДН) антенны по результатам измерения в неидеальных условиях. Возможность таких измерений была обозначена давно [1], но актуальности не потеряла до сих пор. Это, например, подтверждает тот факт, что первой же темой конференции по «антенным измерениям и приложениям» [2] обозначены антенные измерения в не безэховых условиях (Antenna Measurements in Non-anechoic Environments), не говоря уже о недавних диссертациях по этой тематике [3; 4].

1. Сходящийся пучок плоских волн как средство восстановления ДН

Как известно, функция Грина свободного пространства, а вместе с ней и поле в любой обла-

сти, лишенной источников, в декартовой системе координат представимы интегральным преобразованием [5, с. 53, формула (2.26)]

$$G(x, y, z) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\exp(\pm \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 - k^2} z - i\beta_x x - i\beta_y y)] / \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 - k^2} d\beta_x d\beta_y,$$

которое с физической точки зрения можно интерпретировать как сплошной пучок плоских электромагнитных волн (ПЭМВ), расходящихся от расположенного в начале координат источника. Этот пучок включает в себя как однородные $\beta_x^2 + \beta_y^2 \geq k^2$, так и неоднородные (поверхностные) $\beta_x^2 + \beta_y^2 < k^2$ волны. Имея в виду, что при антенных измерениях неоднородности, способные породить поверхностные волны, значительно удалены от испытуемой антенны, вкладом неоднородных волн в облучающее поле можно пренебречь.

Ради простоты ограничимся двумерной скалярной ситуацией (рис. 1), когда ДН $F(\varphi)$ измеряется в плоскости и облучающее ее поле есть пучок ПЭМВ в той же плоскости. Поскольку источники поля расположены за пределами рабо-

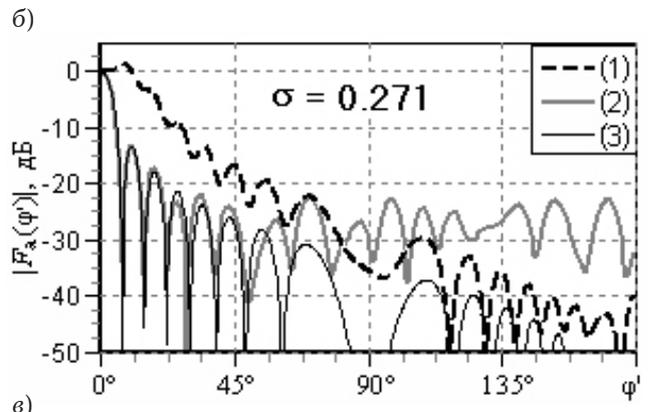
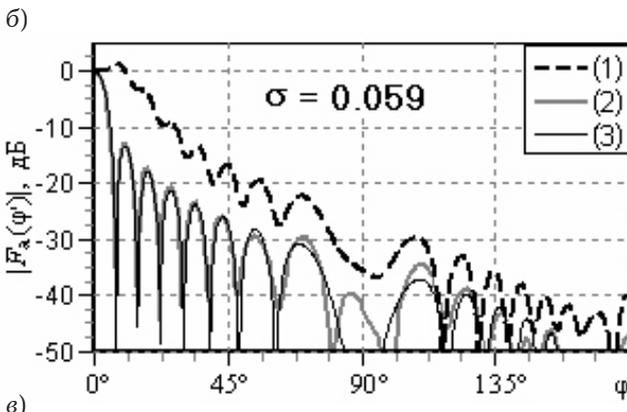
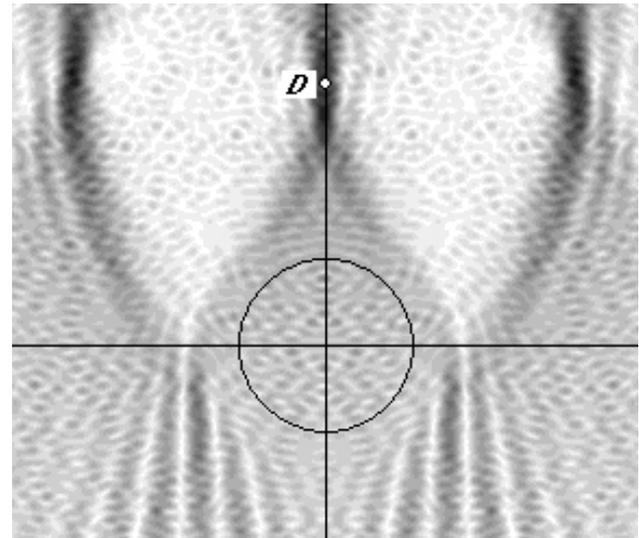
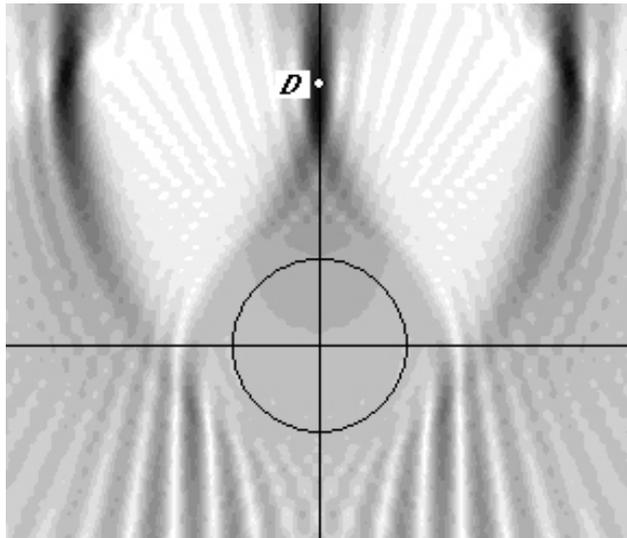
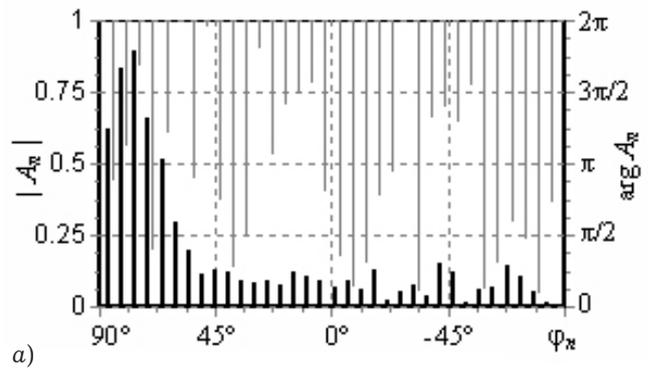
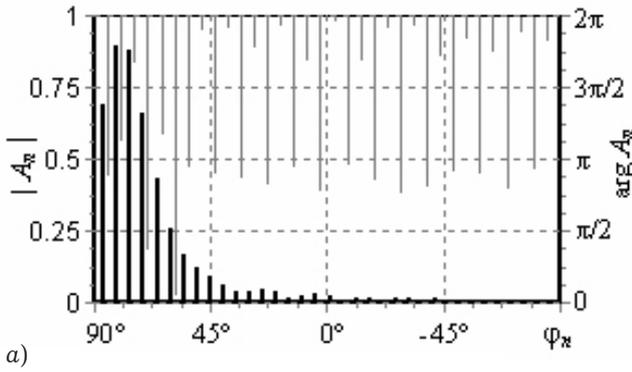


Рис. 2. Восстановление ДН с использованием кардиоидного зонда: а) спектр СППВ; б) рельеф поля СППВ; в) ДН: истинная (1), измеренная (2) и восстановленная (3)

Рис. 3. Восстановление ДН с использованием изотропного зонда: а) спектр СППВ; б) рельеф поля СППВ; в) ДН: истинная (1), измеренная (2) и восстановленная (3)

В приведенных ниже расчетных примерах испытываемой антенной является синфазно и равномерно возбужденная щель длиной $L = 8\lambda$ из элементов Гюйгенса, а на небольшом расстоянии $D = 12\lambda$ располагается источник сферической волны¹, что порождает «неидеальность» облучающего поля. Соответственно фигурирующая в уравнении (1) функция $U_a(\varphi')$ задается следующим выражением

$$U_a(\varphi') = \frac{1}{2} \int_{-L_a/2}^{L_a/2} [1 + \cos(\beta(x', \varphi'))] \frac{e^{ikr(x', \varphi')}}{r(x', \varphi')} dx', \quad (3)$$

где

$$r(x', \varphi') = \sqrt{D^2 + x'^2 - 2Dx' \sin \varphi'}$$

– расстояние от точки интегрирования x' до точки D источника,

$$\cos(\beta(x', \varphi')) = D \cos(\varphi') / r(x', \varphi')$$

– косинус угла между нормалью к линейной антенне и направлением из точки интегрирования в точку D как атрибут кардиоидной ДН элемен-

¹ Ясно, что двумерному варианту соответствует цилиндрическая волна, но сферическая волна интереснее в практическом плане.

та в точке x' (рис. 1). Интеграл (3) вычислялся по методу Симпсона с точностью 10^{-5} .

На рис. 2, а представлены амплитуды и фазы $\{A_n = A(\varphi_n)\}$ волн пучка, полученного в результате вращения кардиоидного зонда по окружности радиуса $R_0 = 4\lambda$. Амплитудный рельеф результирующего поля пучка $\{A_n\}$ изображен на рис. 2, б. Здесь окружность – это трасса зонда; белая точка – точка D облучателя. Наконец, рис. 2, в иллюстрирует результаты восстановления ДН антенны: «измеренная» угловая зависимость $U_a(\varphi')$ представлена пунктирной кривой (1), а восстановленная $F_b(\varphi')$ и истинная ДН $F_a(\varphi')$ – жирной серой (2) и тонкой черной (3) линиями соответственно. Среднеквадратичное отклонение $\sigma = \|F_a(\varphi') - F_b(\varphi')\| / \|F_a(\varphi')\|$ характеризует точность восстановления ДН.

В аналогичной манере на рис. 3 представлены результаты применения изотропного зонда при обследовании облучающего поля. Подтверждается преимущество кардиоидного зонда. Видно (рис. 3, а), что в случае с изотропным зондом в составе пучка возрастает интенсивность волн обратных направлений (от 0° до -90°), что проявляется в интерференционных осцилляциях результирующего поля и снижении точности восстановления ДН. Первопричиной этого является ухудшение устойчивости системы уравнений, к которой преобразуется уравнение (2) в случае изотропного зонда [6]. Наряду с типом зонда решающую роль в обеспечении устойчивости соответствующей системы уравнений играет число волн N_{\max} сходящегося пучка. Численные эксперименты подтверждают целесообразность применения в рассматриваемой двухмерной ситуации следующего эвристического соотношения $N_{\max} = \text{trunc}(16R/\lambda) + 3$, где trunc – функция выделения целой части числа.

Заключение

Анализируемая процедура восстановления ДН, в основе которой лежит аппроксимация облучающего поля сходящимся пучком плоских волн, понятным образом обобщается на трехмерный случай в векторной формулировке, когда заранее неизвестны поляризации облучающего поля и испытываемой антенны.

Список литературы

1. Чони Ю.И., Пироженов С.А. Восстановление ДН антенны по результатам измерений в неидеальных условиях // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1992. Т. 35. № 2. С. 43–50.
2. International Conference on Antenna Measurements & Applications, 30 November – 2 December 2015, Chiang Mai, Thailand. URL: <http://2015ieecama.org> (дата обращения: 12.07.15)
3. Кривошеев Ю.В. Измерение характеристик антенн в зоне Френеля на разреженной сетке углов: дис. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», 2014. URL: http://www.mpei.ru/Science/Dissertations/KrivosheevYV_diss.pdf (дата обращения: 10.08.15)
4. 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. URL: <http://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=etd> (дата обращения: 12.09.15)
5. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1979. 376 с.
6. Чони Ю.И., Данилов И.Ю., Устойчивость задачи восстановления ДН антенны при измерениях в неидеальных условиях: материалы конф. АНТЭ-2015 (в печати).

Retrieval of antenna pattern through data measured in non-ideal environment

Yu.I. Choni, I.Yu. Danilov

A measurement procedure, which includes investigation of the illuminating field with a probe being moved around the work area, is analyzed. This field is represented by a convergent cluster of plane waves, the spatial spectrum of which is used at the stage of pattern reconstruction. On examples of two-dimensional scalar tasks (measuring in the plane and under condition that polarization antenna and illuminating field are the same), very interesting reliefs of fields formed by plane waves cluster, which approximates a spherical wave from a relatively close source, are shown inside and outside the working area. Methodical accuracy of the pattern retrieval with using an isotropic probe and a probe with a cardioid pattern is compared. In the first embodiment, strengthening of the ill-posed problem of an appropriate algebraic equations system leads to a growth of oscillations of approximating field and less accurate retrieval of the antenna pattern.

Keywords: antenna pattern, measurements, plane electromagnetic wave, cluster of plane waves, spatial spectrum, probe, retrieval procedure, accuracy.
