



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-1-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.31

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПЛОСКОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА ОШИБКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

ЮРЦЕВ О.А., ШИМАНОВСКИЙ Р.Ч.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 21 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье исследуется голографический метод измерения диаграммы направленности антенн. В качестве тестируемой антенны используется плоская антенная решетка, а в качестве поверхности, на которой измеряется амплитудно-фазовое распределение в ближней зоне, использована плоская воображаемая поверхность прямоугольной формы. На примере плоской антенной решетки рассматривается влияние размера поверхности измерения амплитудно-фазового распределения поля в плоскости, ортогональной плоскости восстановления диаграммы направленности. Излучатели антенной решетки возбуждаются с комбинированным амплитудным распределением и линейным фазовым распределением. Поле в дальней зоне решетки определяется при помощи интеграла Кирхгофа. Делается оценка восстановленных диаграмм направленности при использовании амплитудно-фазового распределения на всей плоскости измерения в сравнении с диаграммой направленности решетки в дальней зоне. Также проводится численный анализ влияния на погрешности определения параметров диаграммы направленности решетки при использовании голографического метода: числа столбцов амплитудно-фазового распределения на плоскости измерения, положения этой плоскости по трем координатам относительно плоскости раскрытия решетки. Показывается, что при равенстве шага расположения точек измерения амплитудно-фазового распределения и шага решетки для восстановления диаграммы направленности голографическим методом достаточно использовать один столбец амплитудно-фазового распределения на плоскости измерения. Это существенно упрощает и удешевляет процесс измерения и необходимое оборудование. Приводятся примеры определения погрешностей измерения параметров антенной решетки при смещении плоскости измерения амплитудно-фазового распределения по трем координатам.

Ключевые слова: антенная решетка, голографический метод измерения диаграммы направленности, ошибка восстановления диаграммы направленности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Юрцев О.А., Шимановский Р.Ч. Влияние размеров плоскости измерения амплитудно-фазового распределения поля на ошибки восстановления диаграммы направленности антенной решетки голографическим методом. Доклады БГУИР. 2020; 18(1): 5-13.

AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION MEASUREMENT PLANE DIMENSIONS INFLUENCE ON THE HOLOGRAPHIC METHOD ANTENNA ARRAY RADIATION PATTERN RECONSTRUCTION ERRORS

OLEG A. YURTSEV, ROMAN Ch. SHIMANOUSKI

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article explores the holographic method of measuring the antenna pattern. A flat antenna array is used as the antenna under test, and a planar rectangular surface is used as the surface on which the amplitude-phase distribution in the near field is measured. Using the example of a flat antenna array, we consider the influence of the size of the measurement surface of the amplitude-phase distribution of the field in a plane orthogonal to the reconstruction plane of the radiation pattern. Antenna emitters are excited with a combined amplitude distribution and linear phase distribution. The field in the longitudinal zone of the lattice is determined using the Kirchhoff integral. The reconstructed radiation patterns are estimated using the amplitude-phase distribution over the entire measurement plane in comparison with the array radiation pattern in the far zone. A numerical analysis of the influence on the errors in determining the parameters of the lattice radiation pattern using the holographic method is also carried out: the number of columns of the amplitude-phase distribution on the measurement plane, the position of this plane in three coordinates relative to the plane of the aperture of the lattice. It is shown that if the spacing of the points of measurement of the amplitude-phase distribution and the pitch of the lattice are equal, to restore the radiation pattern using the holographic method, it is sufficient to use one column of the amplitude-phase distribution on the measurement plane. This greatly simplifies and reduces the cost of the measurement process and the necessary equipment. Examples of determining errors in measuring the parameters of the antenna array when shifting the plane of measurement of the amplitude-phase distribution in three coordinates are given.

Keywords: antenna array, radiation pattern measure holographic method, radiation pattern reconstruction error.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Yurtsev O.A., Shimanouski R.Ch. Amplitude-phase distribution measurement plane dimensions influence on the holographic method antenna array radiation pattern reconstruction errors. Doklady BGUIR. 2020; 18(1): 5-13.

Введение

Голографический метод определения диаграммы направленности (ДН) остронаправленных антенн по результатам измерения распределения поля в ближней зоне широко используется в практике разработки крупногабаритных антенн. Анализ этого метода посвящен целый ряд публикаций в виде статей и монографий. В статье [1] со ссылкой на публикации [2–4] и в статье [5] рассмотрены возможности применения голографического метода определения ДН антенн по измеренному полю в ближней зоне с использованием оптического диапазона для обработки радиоголограммы. Разработаны математические модели метода при использовании плоскости, цилиндра, сферы в качестве поверхности для измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в ближней зоне [6]. Рассмотрены требования к размерам поверхности измерения АФР и шагу расположения точек измерения АФР в плоскости восстановления ДН голографическим методом. В статье [7] определен угловой сектор, в котором необходимо измерить АФР в ближней зоне для того, чтобы восстановить ДН в заданном угловом секторе дальней зоны. В статье [8] анализируются ошибки определения параметров ДН по полю, измеренному в раскрыте линейной антенной решетки диполей. Показано, что расстояние между решеткой и плоскостью измерения целесообразно выбирать

равным $(2-4)\lambda$, где λ – длина волны, а точки измерения АФР располагать в плоскости восстановления ДН с шагом $0,5\lambda$. При таком шаге и длине антенны 150λ среднеквадратичная погрешность определения уровня первого бокового лепестка не превосходит 0,5 %. В ряде работ рассматривается влияние случайных ошибок измерения АФР в ближней зоне на точность восстановления ДН голографическим методом [9–11].

Во всех публикациях по голографическому методу иллюстрация метода, его возможностей и систематических погрешностей производится на примерах восстановления ДН линейных антенн. Не все вопросы, связанные с анализом погрешностей восстановления ДН голографическим методом, рассмотрены в литературе. К таким вопросам, в частности, относится вопрос о влиянии размеров и положения поверхности измерения АФР в плоскости, ортогональной плоскости восстановления ДН. Не рассмотрен вопрос о влиянии отношения шага расположения излучателей в тестируемой решетке и шага расположения точек измерения АФР на поверхности измерения в плоскости восстановления на погрешности определения параметров восстановленной ДН. Эти вопросы рассматриваются в настоящей статье.

Математическая модель голографического метода измерения диаграммы направленности антенной решетки

В качестве тестируемой антенны используется плоская антенная решетка, показанная на рис. 1, а в качестве поверхности, на которой измеряется АФР в ближней зоне, использована плоская воображаемая поверхность прямоугольной формы S .

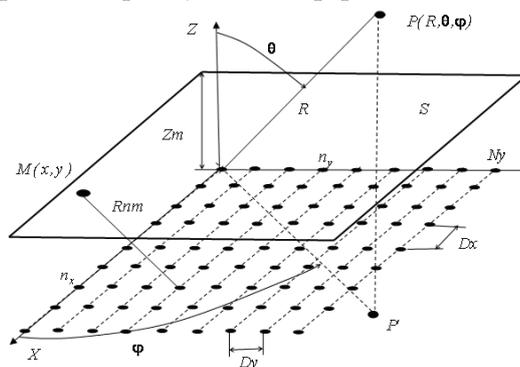


Рис. 1. Антенная решетка и плоскость измерения АФР
Fig. 1. Antenna array and plane for measuring the amplitude-phase distribution

На рис. 1 использованы следующие обозначения: S – поверхность, на которой измеряется АФР; $M(x, y)$ – точка на этой поверхности. Эта точка расположена на пересечении двух систем линий на этой поверхности с шагом расположения D_x – по оси X и D_y – по оси Y . Число линий равно: M_x – по оси X , M_y – по оси Y . Номера линий обозначены символами m_x, m_y – по осям X, Y соответственно. Число линий M_x и M_y на поверхности измерения S рассчитываются по шагу между ними D_x и D_y и размерам поверхности измерения L_x и L_y , которые, в свою очередь, определяются по заданным координатам границ этой поверхности X_{\min}, X_{\max} – по оси X и Y_{\min}, Y_{\max} – по оси Y . Значения $D_x, D_y, X_{\min}, X_{\max}, Y_{\min}, Y_{\max}$ на рис. 1 не показаны. Z_m – расстояние между раскрытием решетки и поверхностью S ; $P(R, \theta, \phi)$ – точка наблюдения в пространстве (точка, в которой определяется поле решетки); R, θ, ϕ – сферические координаты точки P ; P' – проекция точки P на плоскость XY ; D_x – шаг расположения излучателей вдоль оси X (в троках решетки); излучатели обозначены черными точками; D_y – шаг расположения излучателей вдоль оси Y (в столбцах решетки); N_x, n_x – число излучателей в решетке и номер излучателя по оси X ; N_y, n_y – число излучателей в решетке и номер излучателя по оси Y ; R_{nm} – расстояние между излучателем с номером n_x, n_y и точкой $M(x, y)$. Ряды излучателей вдоль оси X – это столбцы излучателей, ряды излучателей вдоль оси Y – строки излучателей.

Размеры решетки: $Lx = Dx \cdot Nx$ – в плоскости столбцов, $Ly = Dy \cdot Ny$ – в плоскости строк. Эти размеры на рис. 1 не показаны. Излучатели антенной решетки возбуждаются с комбинированным амплитудным распределением $AR(x)$ и $AR(y)$ и линейным фазовым распределением $FR(x)$ и $FR(y)$ соответственно вдоль осей X и Y . В качестве излучателей использован гипотетический излучатель с заданной шириной главного лепестка ДН $2\theta_{0,5}^1$ – одинаковой в главных плоскостях XZ и YZ .

В соответствии с голографическим методом измерения ДН антенны [1] по параметрам решетки определяется АФР на поверхности S , а по нему – поле в точке P как функция угла θ при фиксированном угле φ .

Известные программы электродинамического моделирования *FEKO*, *CST*, *HFSS* не позволяют моделировать процесс восстановления ДН голографическим методом. Поэтому применена оригинальная программа численного моделирования *FAR_XY_X_G*. В программе использованы соотношения, следующие из выражения для интеграла Кирхгофа..

Амплитудно-фазовое распределение поля на поверхности S :

$$E(m_x, m_y) = \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} AR(n_x) \cdot AR(n_y) e^{iFR(n_x)} e^{iFR(n_y)} e^{-ikRnm(m_x, m_y)} / Rnm(m_x, m_y), \quad (1)$$

где $AR(n_x)$, $AR(n_y)$ – амплитудные распределения (АР) возбуждения излучателей по осям X, Y ; $FR(n_x)$, $FR(n_y)$ – фазовые распределения (ФР) возбуждения излучателей по осям X, Y ; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; $Rnm(m_x, m_y)$ – расстояние между излучателем с номером n и точкой $M(m_x, m_y)$ на поверхности измерения S . Индекс n при суммировании в формуле (1) «пробегают» все значения n_x и n_y .

Расстояние Rnm описывается выражением:

$$Rnm(m_x, m_y) = Rnm = \sqrt{(Xn_x - Xm)^2 + (Yn_y - Ym)^2 + Zm^2}, \quad (2)$$

где Xn_x, Yn_y – координаты излучателей в решетке; Xm, Ym – координаты точки M на поверхности измерения:

$$\begin{aligned} Xm &= X_{\min} + Dlx \cdot (m_x - 1); \quad Dlx = (X_{\max} - X_{\min}) / M_x, \\ Ym &= Y_{\min} + Dly \cdot (m_y - 1); \quad Dly = (Y_{\max} - Y_{\min}) / M_y. \end{aligned} \quad (3)$$

В численной модели процесса восстановления ДН голографическим методом значения координат излучателей решетки описываются выражениями:

$$Xn_x = Dx \cdot (n_x - 1); \quad Yn_y = Dy \cdot (n_y - 1); \quad 1 \leq n_x \leq Nx; \quad 1 \leq n_y \leq Ny. \quad (4)$$

Амплитудное распределение (АР) возбуждения излучателей в решетке – комбинированное, спадающее по закону синуса в степени Px, y к краям решетки от 1 – в центре решетки до уровня Dax – по оси X (в столбце) на краях решетки и до уровня Day – по оси Y (в строке):

$$\begin{aligned} AR(n_x) &= Dax + (1 - Dax) \cdot \sin^{Px} \left(\frac{n_x - 1}{Nx - 1} \pi \right), \\ AR(n_y) &= Day + (1 - Day) \cdot \sin^{Py} \left(\frac{n_y - 1}{Ny - 1} \pi \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Фазовое распределение возбуждения излучателей по осям X, Y задается линейным для обеспечения фазового сканирования:

$$\begin{aligned} FR(n_x) &= -k \cdot Dx(n_x - 1) \sin \theta_{mx}, \\ FR(n_y) &= -k \cdot Dy(n_y - 1) \sin \theta_{my}, \end{aligned} \quad (6)$$

где θ_{mx}, θ_{my} – углы сканирования в плоскости строк и столбцов.

По полю $E(m_x, m_y)$ определяется поле $E(R, \theta, \varphi)$ в дальней зоне решетки (в точке P на рис. 1) с помощью интеграла Кирхгофа. Так как поле на поверхности S определено в дискретных точках $M(x, y)$, интеграл сводится к сумме полей, излученных элементарными излучателями Гюйгенса с координатами Xm, Ym .

$$E(R, \theta, \varphi) = F_c(\theta, \varphi) \cdot F_1(\theta), \quad (7)$$

где $F_c(\theta, \varphi)$ – множитель решетки точек $M(x, y) = M(m_x, m_y)$, $F_1(\theta)$ – ДН излучателя Гюйгенса.

Эти сомножители определяются выражениями, следующими из интеграла Кирхгофа:

$$F_c(\theta, \varphi) = \sum_{m_x=1}^{M_x} \sum_{m_y=1}^{M_y} E(m_x, m_y) e^{-ikRmp} / Rmp, \quad (8)$$

где расстояние между точкой $M(m_x, m_y)$ на поверхности S и точкой наблюдения в пространстве $P(R, \theta, \varphi)$ определяется формулой:

$$Rmp = \sqrt{(Xm - Xp)^2 + (Ym - Yp)^2 + (Zm - Zp)^2}, \quad (9)$$

где Xp, Yp, Zp – прямоугольные координаты точки наблюдения P :

$$Xp = R \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi,$$

$$Yp = R \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi, \quad (10)$$

$$Zp = R \cdot \sin \theta.$$

$$F_1(\theta) = 1 + \cos \theta. \quad (11)$$

Далее упомянутые выше закономерности исследуются для ДН, восстановленной в плоскости XZ (в плоскости столбцов). Далее ДН, восстановленная голографическим методом, иногда для краткости именуется голографической ДН.

Влияние геометрических параметров плоскости измерения амплитудно-фазового распределения поля антенны (плоскости S) на параметры голографической ДН в плоскости восстановления ДН (плоскости XZ)

Сделана оценка восстановленных ДН при использовании АФР на всей плоскости измерения – $F_{g\Sigma}(\theta)$ и по одному столбу на этой плоскости – $F_{g1}(\theta)$ в сравнении с ДН решетки в дальней зоне – $F_a(\theta)$. Ниже результаты оценки ДН $F_{g1}(\theta)$ иллюстрируются на примере решетки с параметрами: число излучателей в столбцах и в строках $Nx = Ny = 21$, шаг расположения излучателей в столбцах и в строках $D = 0,5\lambda = 150$ мм, расстояние между раскрывом решетки и плоскостью измерения АФР $Zm = 0,5\lambda$, АФР на решетке равномерное. Размер плоскости измерения АФР вдоль столбцов $Lx = Nx \cdot D = 3150$ мм. Размер плоскости измерения АФР в плоскости восстановления ДН взят равным $Lsx = 1,15 \cdot Lx \approx 3600$ мм

Основные результаты проведенного численного анализа.

При шаге расположения точек измерения АФР на поверхности S в плоскости столбцов, равном шагу решетки в этой плоскости ($Dsx = Dx$), и при равных размерах решетки и поверхности S в этой плоскости ($Lsy = Ly$) диаграммы направленности $F_{g1}(\theta)$ и $F_{g\Sigma}(\theta)$ совпадают и не зависят от:

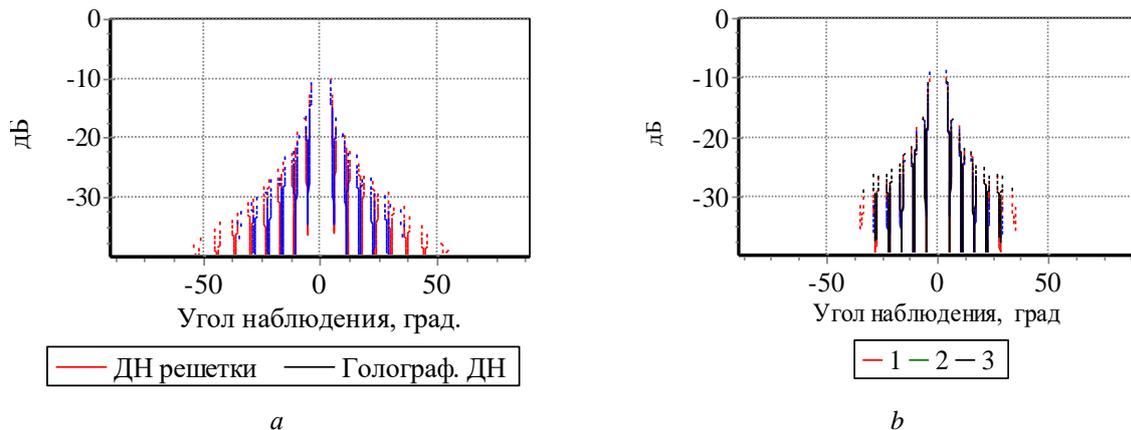
– числа столбцов АФР на плоскости S , по которым восстанавливается ДН в плоскости столбцов, и от числа строк (Ny) в решетке (этот вывод иллюстрируется рис. 2, а, на котором показаны ДН решетки в дальней зоне $F_a(\theta)$ и ДН, восстановленная по одному столбцу $F_{g1}(\theta)$; на рис. 2, а также приведены значения ошибок измерения параметров ДН голографическим методом по сравнению с параметрами ДН в дальней зоне);

– ширины главного лепестка $2\theta_{0,5}^1$ голографической ДН, рассчитанной по одному столбцу АФР на S , по отношению к ширине главного лепестка ДН решетки в дальней зоне

$$D\theta_{0,5} = \frac{2\theta_{0,5} - 2\theta_{0,5}^1}{2\theta_{0,5}} 100 \% ;$$

– уровня максимального бокового лепестка голографической ДН (F_{bm}^1) по отношению F_{bm} ДН решетки в дальней зоне $DF_{bm} = F_{bm} - F_{bm}^1$ (дБ);

– среднеквадратичного уровня боковых лепестков голографической ДН (F_{sl}^1) по отношению к значению этого параметра (F_{sl}) для ДН решетки в дальней зоне $DF_{sl} = F_{sl} - F_{sl}^1$ (дБ).



$$D\theta_{0,5} = 6,8 \% ; DF_{bm} = 0,1 \text{ дБ} ; D_{sl} = 0,08 \text{ дБ}$$

$$DF_{bm\Sigma} = -0,083 \text{ дБ} ; DF_{bm1} = 0,221 \text{ дБ} ; D_{sl\Sigma} = -2,25 \text{ дБ}$$

Рис. 2. ДН решетки в дальней зоне и ДН, восстановленные голографическим методом: a – ДН, восстановленная голографическим методом по одному столбцу при $Dsx = Dx$ и $Lsy = Ly$; b – ДН восстановленная при $Dx \neq DLx$ и $Lsy \neq Ly$; 1 – ДН решетки восстановленная по всем столбцам АФР на S ; 2 – ДН, восстановленная по столбцу АФР с номером $Jy=2$; 3 – ДН, восстановленная по столбцу с номером $Jy = 12$

Fig. 2. The radiation pattern of the array in the far zone and the radiation pattern restored by the holographic method: a – the radiation pattern restored by the holographic method in one column at $Dsx = Dx$ and $Lsy = Ly$; b – the radiation pattern restored at $Dx \neq DLx$ and $Lsy \neq Ly$; 1 – the radiation pattern of the array restored over all columns of the amplitude-phase distribution at S ; 2 – is a radiation pattern reconstructed from the amplitude-phase distribution column with number $Jy = 2$; 3 – radiation pattern restored by the column with the number $Jy = 12$

Как видно, ошибка в параметрах восстановленной ДН, особенно по уровню боковых лепестков, невелика. Описанные свойства ДН $F_{g1}(\theta)$ и $F_{g\Sigma}(\theta)$ сохраняются и при спадающем к концам решетки АФР в плоскости восстановления ДН. Причем от АР в плоскости строк решетки результат восстановления ДН в плоскости столбцов не зависит.

Использование одного столбца в АФР на плоскости измерения АФР для восстановления ДН голографическим методом существенно упрощает и удешевляет применение этого метода для измерения ДН плоской решетки с разделяющимся АФР. Полученный результат является новым и в литературе не описан.

Если не выполняется условие равенства шагов в плоскости восстановления ДН ($Dx \neq DLx$) или равенство размеров решетки и поверхности S в плоскости строк ($Lsy \neq Ly$), диаграммы направленности $F_{g1}(\theta)$ и $F_{g\Sigma}(\theta)$ различны. Причем $F_{g1}(\theta)$ зависит от номера столбца АФР на плоскости измерения S . Этот результат иллюстрируется рис. 2, b , для той же решетки с параметрами: $Nx = 21$, $Ny = 21$, $Dx = 0,5\lambda = 150$ мм. Но $DLx = 100$ мм, $Ly = 3150$ мм, $Lsy = 2400$ мм (т. е. $Dx \neq DLx$ и $Lsy \neq Ly$), число столбцов АФР на плоскости S равно

$M_y = 24$; АФР в решетке – равномерное. На рис. 2, *b* обозначено: $DF_{bm\Sigma}$ – ошибка определения максимального бокового лепестка в голографической ДН, восстановленной по АФР всех столбцов на плоскости S ; DF_{bm1} – ошибка определения максимального бокового лепестка в голографической ДН, восстановленной по АФР одного столбца на плоскости S .

Рассмотрено влияние на точность восстановления голографической ДН смещения поверхности измерения АФР по нормали в плоскости решетки (по Z) и по двум координатам в плоскости измерения АФР (координатам X, Y) по сравнению с симметричным положением относительно раскрыва решетки.

В работе [8] рекомендуется расстояние от плоскости решетки до плоскости измерения АФР (Z_m) выбирать в пределах $(1-2)\lambda$. Численное исследование зависимости ошибок определения параметров ДН, измеренной голографическим методом, от величины Z_m позволило уточнить эту рекомендацию для случая, когда восстановление ДН голографическим методом производится по одному столбцу АФР на плоскости S ($F_{g1}(\theta)$). Численное моделирование показало, что эта ДН практически не меняется при изменении Z_m в интервале $(0, 1-1)\lambda$. При изменении Z_m в интервале $(1-4)\lambda$ – изменение параметров $F_{g1}(\theta)$ незначительно.

Смещение поверхности измерения АФР вдоль столбцов решетки приводит к появлению асимметрии в столбце АР на плоскости измерения. Это, в свою очередь, приводит к известным изменениям в ДН столбца АФР на плоскости S : расширяется главный лепесток восстановленной ДН $F_{g1}(\theta)$ и растут боковые лепестки. Чем больше смещение, тем эти изменения больше. При смещении на несколько шагов решетки D погрешностью определения параметров голографической ДН можно пренебречь.

Смещение поверхности измерения АФР вдоль строк решетки ($DLsy$) независимо от величины смещения в пределах размера решетки в этой плоскости приводит к незначительному изменению параметров восстановленной ДН $F_{g1}(\theta)$, в основном, в области дальних боковых лепестков. Причем эти изменения не зависят от того, смещение кратно или не кратно шагу решетки вдоль строк. Но при этом шаг расположения точек измерения АФР на плоскости S должен быть равным шагу решетки. Так, в рассматриваемом примере решетки смещение столбца АФР на плоскости S вдоль строк решетки от нуля до максимального значения, равного половине размера плоскости вдоль строк ($0,5 \cdot Lsy$) приводит к росту среднеквадратичного уровня боковых лепестков (F_{sl}) в ДН $F_{g1}(\theta)$ на 0,13 дБ при уровне $F_{sl} = -37$ дБ.

Заключение

Проведен численный анализ влияния на погрешности определения параметров ДН решетки при использовании голографического метода: числа столбцов АФР на плоскости измерения S , положения этой плоскости по трем координатам относительно плоскости раскрыва решетки. Показано, что при равенстве шага расположения точек измерения АФР и шага решетки для восстановления ДН голографическим методом достаточно использовать один столбец АФР на S . Это существенно упрощает и удешевляет процесс измерения и необходимое оборудование. Приведены примеры определения погрешностей измерения параметров антенной решетки при смещении плоскости измерения АФР по трем координатам.

Список литературы

1. Бахрах Л.Д., Владимирова О.Н., Курочкин А.П., Соболев Г.А., Фридман Г.Х. Применение методов когерентной оптики и голографии к задачам антенной техники и обработки информации. *Антенны*. 1976;2:33-54.
2. Ingals A. Optical simulation of microwave antennas. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*. 1966;1:2-6.

3. Beste D.C. Far field simulation on antennas have complex aperture distribution functions. *IEEE Inter. Convc. Recorded.* 1966;5:133-142.
4. Бахрах Л.Д., Соболев Г.А., Фридман Г.Л. Получение голограмм трехмерных объектов. *Известия ВУЗов. Радиофизика.* 1967;10:589.
5. Бахрах Л.Д., Геруни П.М., Курочкин А.П., Арутюнян Д.С. Оптическое моделирование диаграмм направленности антенн по радиоголограмме поля в их раскрыве. *Антенны.* 1976;14:28-34.
6. Бахрах Л.Д., Колосов Ю.А., Курочкин А.П. Определение поля антенны в дальней зоне через значения поля в ближней зоне. *Антенны.* 1976;24:3-14.
7. Колосов Ю.К., Курочкин А.П. Восстановление диаграммы направленности антенн по полю, измеренному в ограниченном секторе углов в зоне Френеля. *Антенны.* 1971;16:25-37.
8. Зимин Д.В., Седенков Е.Г. Об ошибках определения характеристик антенн путем измерения распределения поля в раскрыве. *Антенны.* 1976;23:72-80.
9. Каплун И.В., Курочкин А.П. Исследование случайных погрешностей голографических методов определения характеристик направленности антенн. *Радиотехника и электроника.* 1975;10:2038-2045.
10. Турчин В.И., Фарфель В.А., Фогель А.П. Погрешности фазометрического метода восстановления ДН антенн по измерениям в ближней зоне. *Радиотехника и электроника.* 1976;1:72-82.
11. Шифрин Я.С., Усин В.А. О точности голографических методов измерения диаграмм направленности антенн. *Антенны.* 1979;27:26-38.

References

1. Bahrakh L.D., Vladimirova O.N., Kurochkin A.P., Sobolev G.A., Fridman G.Kh. [Application of coherent optics and holography methods to the tasks of antenna technology and information processing]. *Antenny = Antenny.* 1976;2:33-54. (In Russ.)
2. Ingals A. Optical simulation of microwave antennas. *IEEE Trans on Antennas and Propagation.* 1966;1:2-6.
3. Beste D.C. Far field simulation on antennas have complex aperture distribution functions. *IEEE Inter. Convc. Recorded.* 1966;5:133-142.
4. Bahrakh L.D., Sobolev G.A., Fridman G.L. Getting holograms of three-dimensional objects. *Izvestija VUZov. Radiofizika = Izvestija VUZov. Radiofizika.* 1967;10:589. (In Russ.)
5. Bahrakh L.D., Geruni P.M., Kurochkin A.P., Harutyunyan D.S. [Optical modeling of antenna patterns according to the radio hologram of the field in their aperture]. *Antenny = Antenny.* 1976;14:28-34. (In Russ.)
6. Bahrakh L.D., Kolosov Yu.A., Kurochkin A.P. [Determination of the antenna field in the far zone through the field values in the near zone]. *Antenny = Antenny.* 1976;24:3-14. (In Russ.)
7. Kolosov Yu.K., Kurochkin A.P. [Restoration of the antenna pattern along a field measured in a limited sector of angles in the Fresnel zone]. *Antenny = Antenny.* 1971;16:25-37. (In Russ.)
8. Zimin D.V., Sedenkov E.G. [Errors in determining the characteristics of antennas by measuring the field distribution in the aperture]. *Antenny = Antenny.* 1976;23:72-80. (In Russ.)
9. Kaplun I.V., Kurochkin A.P. [The study of random errors of holographic methods for determining the directivity characteristics of antennas]. *Radiotekhnika i jelektronika = Radiotekhnika i jelektronika.* 1975;10:2038-2045. (In Russ.)
10. Turchin V.I., Farfel V.A., Vogel A.P. [Errors of the phasometric method for reconstructing the antenna bottoms from measurements in the near field]. *Radiotekhnika i jelektronika = Radiotekhnika i jelektronika.* 1976;1:72-82. (In Russ.)
11. Shifrin Ya.S., Usin V.A. [On the accuracy of holographic methods for measuring antenna patterns]. *Antenny = Antenny.* 1979;27:26-38. (In Russ.)

Вклад авторов

Юрцев О.А. разработал конструкцию антенной решетки, разработал оригинальную программу для проведения численного моделирования.

Шимановский Р.Ч. выполнил моделирование решетки и голографического метода.

Authors contribution

Yurtsev O.A. developed the design of the antenna array, developed an original program for numerical simulation.

Shimanovsky R.Ch. performed a simulation of the lattice and the holographic method.

Сведения об авторах

Юрцев О.А. (1933–2019), д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники БССР.

Шимановский Р.Ч., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-27;
e-mail: halo11@mail.ru
Шимановский Роман Чеславович

Information about the authors

Yurtsev O.A. (1933–2019), D.Sci, professor, Honored worker of Science and Technology of BSSR.

Shimanouski R.Ch., PG Student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-17-293-89-27;
e-mail: halo11@mail.ru
Shimanouski Roman Cheslavovich