

РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

В.Н. Митрохин, Э.О. Можаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: eduardmozharov@yandex.ru

К качеству отражающей поверхности крупноапертурных зеркальных антенн при изготовлении радиотелескопов и коллиматоров предъявляются высокие требования. Сложность контроля и юстировки рефлекторов вызвана противоречивыми требованиями высокой точности измерений (порядка десятков мкм) при больших размерах. Представлен радиоголографический метод измерения профилей поверхностей параболических зеркальных антенн по полю в ближней зоне планарным сканером в декартовой системе координат. Приведено подробное математическое описание разработанного метода: выведен алгоритм вычисления неровностей отражателя, определено разрешение измерительной системы. Выполнено моделирование работы представленного метода. Рассматриваемый метод позволяет исследовать стационарные крупноапертурные зеркальные антенны с помощью планарного сканера, габаритные размеры которого меньше раскрыва исследуемой антенны.

Ключевые слова: радиоголография, ближнее поле, коллиматор, зеркальная антенна, профиль отражателя, планарный сканер.

RADIOHOLOGRAPHY METHOD OF ELECTROMAGNETIC NEAR FIELD CONTROL OF PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA PROFILE

V.N. Mitrokhin, E.O. Mozharov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: eduardmozharov@yandex.ru

In the process of manufacturing of radio telescopes and collimators a serious attention should be paid to the quality of the reflecting surface of large aperture reflector antennas, which must meet strict requirements. The complexity of the reflectors' control and alignment results from the conflicting requirements of high-quality measurement accuracy (of tens of microns) for large sizes. The paper presents a radioholography method of measuring the surface profile of parabolic reflector antennas by the near-field with a planar scanner in the Cartesian coordinate system. A detailed mathematical description of the developed method is given: an algorithm for calculating the irregularities of the reflector is derived; the resolution of the measuring system is determined. A simulation of the developed method is performed. This method allows investigating large aperture stationary reflector antennas using a planar scanner; its dimensions are smaller than the aperture of the observed antenna.

Keywords: radioholography, near-field, collimator, reflector antenna, reflector surface profile, planar scanner.

Высокие требования предъявляются к качеству поверхности металлических отражателей зеркальных антенн, работающих в СВЧ и КВЧ диапазонах волн. Необходимо, чтобы отражатель был строгой геометрической формы, чаще всего в форме параболоида вращения. Не соответствие формы поверхности отражателя приводит к ухудшению

электрических характеристик зеркальной антенны: падению коэффициента усиления, увеличению уровня боковых лепестков, размытию нулей и расширению главного лепестка диаграммы направленности (ДН) [1–4].

При переходе на более высокие частоты требования к качеству изготовления отражающей поверхности зеркальных антенн возрастают. Невозможно без точной юстировки отражающей поверхности повысить коэффициент усиления и сузить главный лепесток ДН крупноапертурных антенн радиотелескопов и систем РЛС в целях повышения дальности работы и разрешающей способности. Согласно формуле Рузе коэффициент усиления зеркальной антенны G в значительной мере зависит от среднеквадратического отклонения (СКО) поверхности зеркала σ от идеального параболоида [4]:

$$G = G_{\text{ид}} \exp \left(- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где $G_{\text{ид}}$ — коэффициент усиления антенны с идеальным отражателем; λ — длина волны в свободном пространстве.

При этом трудной задачей является контроль поверхности отражателей крупноапертурных антенн (диаметр которых превышает 100λ), таких как зеркальные коллиматоры [5–7] и радиотелескопы [8, 9]. Для получения приемлемых потерь коэффициента усиления, вызванных неровностями отражателя, СКО поверхности зеркала радиотелескопа относительно идеального параболоида должно быть порядка $1/16 \dots 1/20$ длины волны на рабочей частоте. При СКО $\lambda/20$ коэффициент усиления уменьшается на 1,7 дБ согласно выражению (1).

К качеству поверхности отражателей зеркальных коллиматоров предъявляют более высокие требования: СКО поверхности зеркала не должно превышать $\lambda/100$ [10] для создания рабочей зоны с осцилляциями амплитудно-фазового распределения не более $\pm 0,5$ дБ по амплитуде и $\pm 12,5^\circ$ по фазе. Неровности зеркала коллиматора приводят к увеличению осцилляций поля в рабочей зоне, тем самым снижая качество измерений на коллиматорных стендах, уменьшают размер рабочей зоны. У “Коллиматора-М” [5] при СКО неровностей зеркала коллиматора $\lambda/150$ осцилляции поля в рабочей зоне составляют $\pm 0,5$ дБ, у коллиматора “МАК-5” [6] СКО = $\lambda/70$ — ± 1 дБ.

Методы измерения геометрии поверхности зеркальных антенн. Существует много способов контроля поверхностей зеркальных антенн: контактные, с использованием юстировочного шаблона [5, 11] и бесконтактные. К бесконтактным способам относятся: фотограмметрия [1, 2, 12, 13], радиоголографические методы контроля профиля [9, 13–16], использование лазерных радаров [5], трекеров, трехмерных сканеров, геодезических тахеометров и оптических схем [11]. Но не

все из рассматриваемых способов подходят для контроля и юстировки поверхностей крупноапертурных антенн, так как существуют сложно выполнимые требования: высокая точность измерений (порядка десятков мкм) при больших измеряемых размерах (от единиц метров до десятков метров).

Наиболее быстрым и высокоточным (единицы мкм) способом контроля поверхности крупноапертурных зеркальных антенн является радиоголографический метод [9, 13–16]. Данный метод получил широкое применение для контроля поверхности и дальнейшей юстировки антенн радиотелескопов. В радиоголографическом методе юстировки радиотелескопов для измерения комплексной ДН необходимо наличие опорно-поворотного устройства, источника излучения в дальней зоне или в области Френеля [13], что, в свою очередь, требует значительных расстояний между исследуемой антенной и источником сигнала. Для таких антенн источником сигнала становится спутник, Солнце или передающая антенна на вышке. Например, для радиотелескопа РТ-7,5 [8], работающего на длине волны 3,2 мм, граница дальней зоны расположена на расстоянии 35 км.

Радиоголографический метод измерения геометрии поверхности зеркальной антенны по измеренному ближнему полю. Рассмотренный ранее метод неприменим для контроля поверхности зеркальных коллиматоров, так как они стационарны и находятся в экранированных безэховых камерах относительно небольших размеров.

Известно, что при аттестации и повторной проверке компактных полигонов на основе коллиматоров измеряют амплитудно-фазовое распределение ближнего поля в рабочей зоне. В этом случае необходимо наличие сканера ближнего поля [6, 10].

Можно организовать относительно недорогой стенд для измерения профиля отражателя коллиматора с использованием сканера ближнего поля. В работах [17–20] описываются способы восстановления профиля зеркальной антенны, связанного с фазовым распределением токов в раскрыве антенны по измерениям ближнего поля. Ограничением данного метода измерений является то, что область сканирования должна быть равной или превышать габаритные размеры исследуемой антенны [17–20]. Сканер ближнего поля компактного полигона чаще измеряет область, равную по площади поперечному сечению рабочей зоны. Рабочая зона составляет порядка 10–20 % площади раскрыва зеркала. В случае, если применяются особые меры расширения рабочей зоны [21], площадь ее поперечного сечения все равно не превышает площади раскрыва коллиматора.

В настоящей работе предлагается радиоголографический метод, основанный на измерении ближнего поля планарным сканером с использованием приема-передающего зонда, для измерения профиля от-

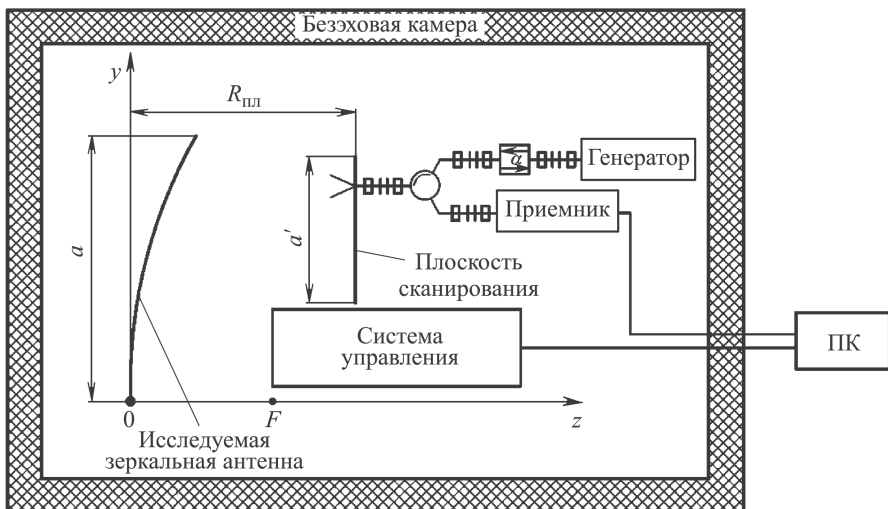


Рис. 1. Схема измерительного стенда профиля поверхности зеркального коллиматора

ражающей поверхности зеркальных антенн. Схема установки измерения профиля зеркальной антенны представлена на рис. 1.

Геометрия сканирования показана на рис. 2. Зонд перемещается в плоскости в пределах прямоугольника $a' \times b'$. Измерения проводятся в декартовой системе координат, начало которой располагается в вершине параболоида исследуемого отражателя. Расстояние до плоскости сканирования соответствует $R_{пл}$. В качестве приемо-передающего зонда используется слабонаправленная антенна в виде открытого конца волновода, которая через Y-циркулятор запитывается генератором. Работа ведется на одной поляризации, в данном случае выбрана

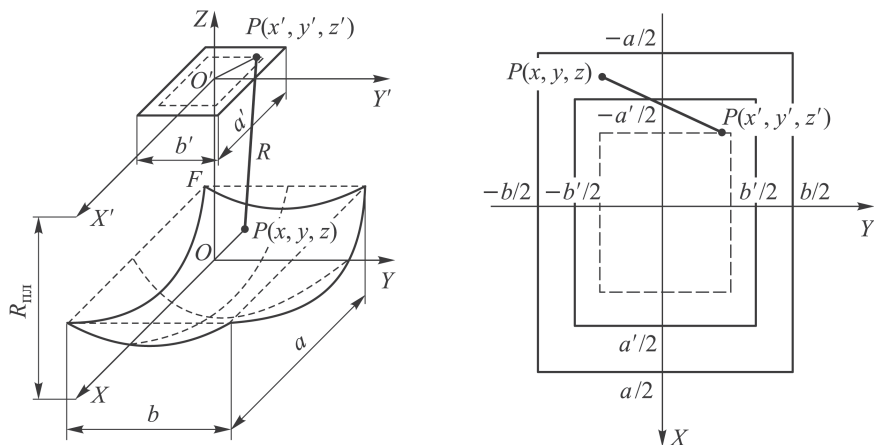


Рис. 2. Геометрия планарного измерения профиля зеркала:

a — трехмерный вид; b — вид сверху

линейная поляризация поля. Амплитуда и фаза отраженного сигнала регистрируются приемником. Данные о положении зондовой антенны и принятый сигнал записываются на персональный компьютер, а затем обрабатываются.

Взаимосвязь профиля поверхности параболического отражателя с измеренным полем в области сканирования. Рассмотрим сечение геометрии сканирования в плоскости $y = 0$ на рис. 3. Наличие деформации толщиной $\Delta z(x, y)$ вдоль оси параболического отражателя приведет к изменению фазы отраженного сигнала $\Delta\varphi(x, y)$ на $2k\Delta z(x, y)$ [13]. Неровности профиля поверхности зеркала можно записать как

$$\Delta z(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi(x, y). \quad (2)$$

Найдем взаимосвязь принятого поля зондом с излученным полем. Решение уравнения Гельмгольца для векторных потенциалов $\mathbf{A}^{\ominus, \text{M}}$ через функцию Грина записывается в виде [22]

$$\mathbf{A}^{\ominus, \text{M}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \mathbf{j}^{\ominus, \text{M}} \cdot e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \cdot \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dV, \quad (3)$$

где $\mathbf{j}_{\text{ст}}^{\ominus, \text{M}}$ — вектор плотности токов; $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| = R(x, y, x', y')$ — расстояние между излучаемой и рассматриваемой точками (см. рис. 2 и 3).

Связь напряженности электрического поля \mathbf{E} с электрическим векторным потенциалом \mathbf{A}^{\ominus} представляется как

$$\mathbf{E} = -i\omega\mu_0\mathbf{A}^{\ominus} - \frac{i}{\omega\epsilon_0} \text{grad div } \mathbf{A}^{\ominus} - \text{rot}\mathbf{A}^{\text{M}}. \quad (4)$$

При отсутствии магнитных токов напряженность электрического поля представляется в виде (5), напряженность магнитного поля в виде

$$\mathbf{E} = -i\omega\mu_0\mathbf{A}^{\ominus} - \frac{i}{\omega\epsilon_0} \text{grad div } \mathbf{A}^{\ominus}, \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = \text{rot}\mathbf{A}^{\text{M}}. \quad (6)$$

Согласно данным работы [23], выражение (6) с учетом формулы (3) можно преобразовать к виду

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} + \frac{ik}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right) \mathbf{j}_{\text{ст}}^{\ominus} e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dV. \quad (7)$$

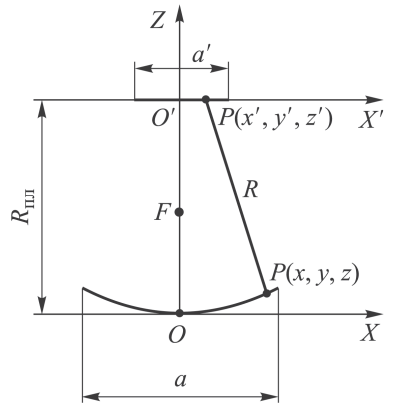


Рис. 3. Геометрия планарного сканирования при измерении профиля отражателя

Рассматривая линейную поляризацию и приближение геометрической оптики, выражение (7) можно преобразовать, принимая в амплитудном множителе подынтегрального выражения $R \approx R_{\text{пл}} = \text{const}$, для фазы оставляем полное значение расстояния $R(x, y, x', y')$:

$$H(x', y') = \frac{ik}{4\pi R_{\text{пл}}} \int_S \dot{j}_{\text{ст}}^{\partial}(x, y, x', y') e^{-ikR(x, y, x', y')} dS. \quad (8)$$

Поверхностные токи в приближении геометрической оптики записываются через напряженность электрического поля $E_{\text{изл}}(x', y')$ в виде

$$\dot{j}_{\text{ст}}^{\partial}(x, y, x', y') \approx \dot{E}_{\text{изл}}(x', y') e^{-ikR(x, y, x', y')} e^{ik\Delta z(x, y)}. \quad (9)$$

Поскольку при перемещении зонда мощность излучаемого сигнала неизменна, а начальная фаза берется за опорную, то $\dot{E}_{\text{изл}}(x', y') = \text{const}$, тогда

$$H(x', y') = C \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{ik\Delta z(x, y)} e^{-ik \cdot 2R(x, y, x', y')} dy dx, \quad (10)$$

где $C = \frac{ik}{4\pi R_{\text{пл}}} \dot{E}_{\text{изл}}(x', y') = \text{const}$.

Рассмотрим точку P' в плоскости сканирования и точку P на поверхности отражателя (см. рис. 2 и 3). Расстояние R от поверхности зеркала до точки в плоскости сканирования записывается формулой

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + \left(R_{\text{пл}} - \frac{x^2 + y^2}{4F} \right)^2}. \quad (11)$$

Вынесем $R_{\text{пл}}$ из-под квадратного корня

$$R = R_{\text{пл}} \sqrt{1 + \frac{(x - x')^2}{R_{\text{пл}}^2} + \frac{(y - y')^2}{R_{\text{пл}}^2} - \frac{x^2 + y^2}{2FR_{\text{пл}}} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{16F^2 R_{\text{пл}}^2}} \quad (12)$$

и, используя биномиальное разложение $\sqrt{1 + a} \approx 1 + \frac{a}{2}$, получим формулу

$$R = R_{\text{пл}} + \frac{(x - x')^2}{2R_{\text{пл}}} + \frac{(y - y')^2}{2R_{\text{пл}}} - \frac{x^2 + y^2}{4F} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{32F^2 R_{\text{пл}}}. \quad (13)$$

Подставим выражение (13) в формулу (10) и вынесем постоянный множитель:

$$H(x', y') = e^{-ik2R_{\text{пл}}} C(x', y') \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{ik\Delta z(x, y)} \times \\ \times e^{-ik \left(\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{R_{\text{пл}}} - \frac{x^2 + y^2}{2F} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{16F^2 R_{\text{пл}}} \right)} dy dx. \quad (14)$$

Произведем группировку (15) показателя степени экспоненты

$$\left(\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{R_{\text{пл}}} - \frac{x^2 + y^2}{2F} + \frac{(x^2 + y^2)^2}{16F^2 R_{\text{пл}}} \right) = \\ = \left(\frac{-2xx' - 2yy'}{R_{\text{пл}}} + \frac{x'^2 + y'^2}{R_{\text{пл}}} + (x^2 + y^2) \left(\frac{1}{R_{\text{пл}}} - \frac{1}{2F} \right) + \frac{(x^2 + y^2)^2}{16F^2 R_{\text{пл}}} \right). \quad (15)$$

После введения обозначений

$$C_0 = e^{-ik2R_{\text{пл}}} C, \\ C_1(x, y) = e^{i\Delta\varphi(x, y)} e^{-ik \left((x^2 + y^2) \left(\frac{1}{R_{\text{пл}}} - \frac{1}{2F} \right) + \frac{(x^2 + y^2)^2}{16F^2 R_{\text{пл}}} \right)}, \\ C_2(x', y') = e^{-ik \frac{x'^2 + y'^2}{R_{\text{пл}}}}$$

выражение (14) принимает вид обратного двумерного преобразования Фурье (16):

$$H(x', y') = C_0 C_2(x', y') \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} C_1(x, y) e^{i2k \left(\frac{xx' + yy'}{R_{\text{пл}}} \right)} dy dx. \quad (16)$$

$C_1(x', y')$ вычисляется как прямое двумерное преобразование Фурье (17) от функции $\frac{H(x', y')}{C_0 C_2(x', y')}$:

$$C_1(x, y) = \int_{-\frac{a'}{2}}^{\frac{a'}{2}} \int_{-\frac{b'}{2}}^{\frac{b'}{2}} \frac{H(x', y')}{C_0 C_2(x', y')} e^{-i2k \left(\frac{xx' + yy'}{R_{\text{пл}}} \right)} dy' dx'. \quad (17)$$

Тогда искомое распределение набегов фазы, вызванных неровностями отражателя, можно представить как

$$\Delta\varphi(x, y) = \text{Arg} \left[e^{ik \left((x^2+y^2) \left(\frac{1}{R_{\text{пл}}} - \frac{1}{2F} \right) + \frac{(x^2+y^2)^2}{16F^2 R_{\text{пл}}} \right)} \cdot C_1(x', y') \right]. \quad (18)$$

Разрешение измерительной системы. Ограничение области сканирования в пространстве равносильно применению оконного преобразования Фурье. Функция окна $W(x', y')$ описывает конечную протяженность записываемой матрицы данных:

$$H_w(x', y') = H(x', y') \cdot W(x', y'). \quad (19)$$

Ограниченная область сканирования равносильна умножению на функцию окна:

$$W(x', y') = 1, \quad \text{при } |x| < \frac{a'}{2} \text{ и } |y| < \frac{b'}{2}. \quad (20)$$

В данном случае применяется прямоугольное окно (окно Дирихле) [24]. Нормированная спектральная огибающая окна Дирихле определяется следующим соотношением:

$$\begin{aligned} F(x, y) &= \int_{-\frac{a'}{2}}^{\frac{a'}{2}} \int_{-\frac{b'}{2}}^{\frac{b'}{2}} \exp \left[-j \frac{2k}{R_{\text{пл}}} (xx' + yy') \right] dy' dx' = \\ &= \frac{\sin \left(\frac{a'}{2} \frac{2k}{R_{\text{пл}}} x \right)}{\frac{a'}{2} \frac{2k}{R_{\text{пл}}} x} \cdot \frac{\sin \left(\frac{b'}{2} \frac{2k}{R_{\text{пл}}} y \right)}{\frac{b'}{2} \frac{2k}{R_{\text{пл}}} y}. \quad (21) \end{aligned}$$

Разрешение измерительной системы по координатам x и y определяется габаритными размерами области сканирования и зависит от возможности различать соседние максимумы спектральных функций. Разрешение системы определяется шириной главного лепестка спектральной функции окна по уровню -3 дБ [24]:

$$\frac{\sin \left(\frac{a'}{2} \cdot \frac{2k}{R_{\text{пл}}} x \right)}{\frac{a'}{2} \cdot \frac{2k}{R_{\text{пл}}} x} = 0,707, \quad (22)$$

$$\Delta x = 2x_{0,707} = 2 \frac{1,39 R_{\text{пл}}}{a' k} = 0,44 \frac{R_{\text{пл}} \lambda}{a'}. \quad (23)$$

При фиксированном положении плоскости сканирования и рабочей частоте разрешение измерительной системы будет обратно пропорционально габаритам области сканирования.

Моделирование измерительной системы. Проведен численный эксперимент, при котором исследовалась зеркальная антенна, отражатель которой является квадратной вырезкой из параболоида вращения. Сторона раскрыва составляет 500 мм, фокусное расстояние 300 мм. Моделирование проводилось на частоте 10 ГГц, сканируемая область — квадрат со стороной 200 мм. Плоскость сканирования размещается за фокусом зеркала на расстоянии 100 мм. Шаг сканирования выбран менее $\lambda/2$, согласно теореме Котельникова, что также подтверждено в фундаментальной работе [25], посвященной измерениям ближнего поля: шаг дискретизации ближнего поля $d = 4$ мм; шаг дискретизации поверхности зеркала $h = 4$ мм.

Согласно формуле (23) разрешение измерительной системы в данном случае составляет 26 мм.

Схема численного эксперимента представлена на рис. 4. Целью моделирования было выявление неровностей поверхности зеркальной антенны. Моделирование сканирования антенны разделено на два этапа: исследование отражателя с поверхностью, являющейся идеальным параболоидом, и исследование поверхности отражателя с неровностями.

На первом этапе исследовалась антенна с идеальной поверхностью. Осуществлялось сканирование зондом в плоскости, параллельной раскрыву на расстоянии $R_{пл} = 400$ мм.

Моделирование процесса измерений осуществлялось за счет расчета дискретных значений $H(x', y')$, измеренных зондом в области сканирования. Далее, согласно выражению (18), находятся набеги фазы $\Delta\varphi_{ид}(x, y)$ для идеального параболоида.

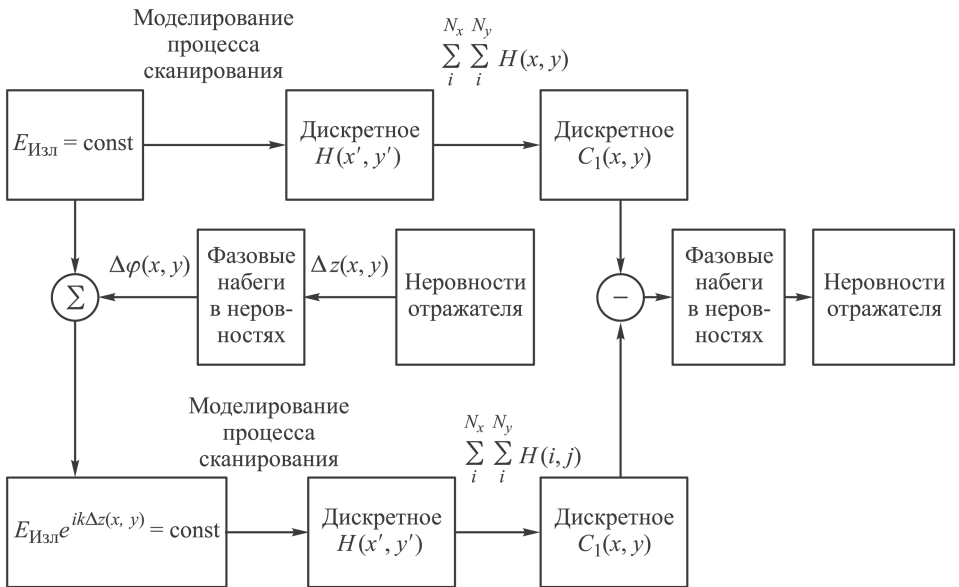


Рис. 4. Схема моделирования

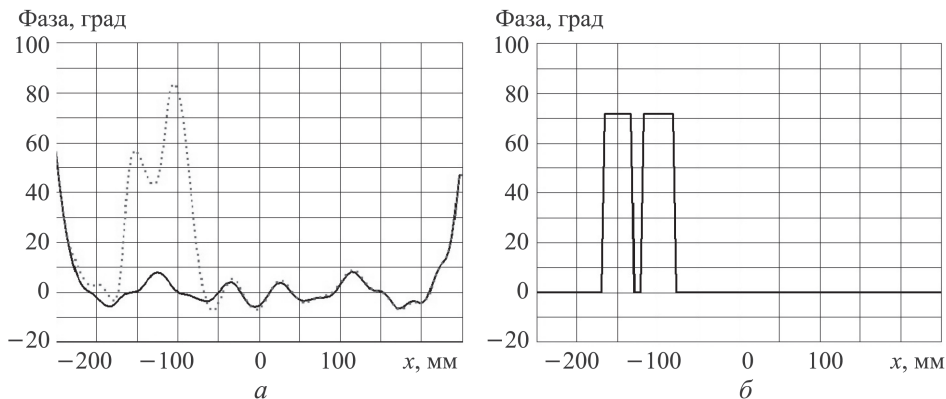


Рис. 5. Набеги фаз, вызванные неровностями поверхности отражателя, в плоскости $y = -100$ мм:

a – вычисленные, *б* – внесенные

На следующем этапе на поверхность отражателя вносились неровности, которые влияют на фазу отраженного сигнала и учитываются в $C_1(x, y)$. Далее повторяют расчет дискретных значений $H(x', y')$ и находят набеги фазы $\Delta\varphi_{\text{изм}}(x, y)$ для параболоида вращения с неровностями поверхности.

Неровности поверхности отражателя вычислялись по формуле (2) сравнением фаз принятого сигнала для идеального зеркала и зеркала с неровностями. На рис. 5, *a* приведены $\Delta\varphi_{\text{ид}}(x, y)$ (сплошная линия) и $\Delta\varphi_{\text{изм}}(x, y)$ (штриховая линия) в сечении $y = -100$ мм, на рис. 5, *б* – набеги фазы, внесенные при моделировании. Размеры неровностей составляют $\lambda/10$.

На рис. 6 представлена карта неровностей отражателя зеркальной антенны, на рис. 7 – трехмерный вид вычисленных неровностей. Размеры неровностей составляют $\lambda/10$ и $\lambda/20$.

На рис. 5, *a* и 7 видно, что близко расположенные неровности начинают сливаться, это вызвано тем, что расстояние между ними меньше разрешающей способности системы при рассматриваемой геометрии сканирования.

Заключение. Задачи контроля и юстировки поверхности отражателей зеркальных антенн СВЧ диапазона волн возможно решить различными методами. Измерение профиля поверхностей крупноапертурных антенн является сложной задачей из-за наличия противоречивых требований: высокая точность измерений (порядка десятков мкм) при больших промеряемых размерах.

Наиболее точным и быстрым методом контроля поверхностей радиотелескопов в настоящее время является радиологический метод, основанный на измерении комплексной диаграммы направленности. Но данный метод не подходит для контроля поверхностей зеркальных коллиматоров, поэтому разработан метод измерения профилей

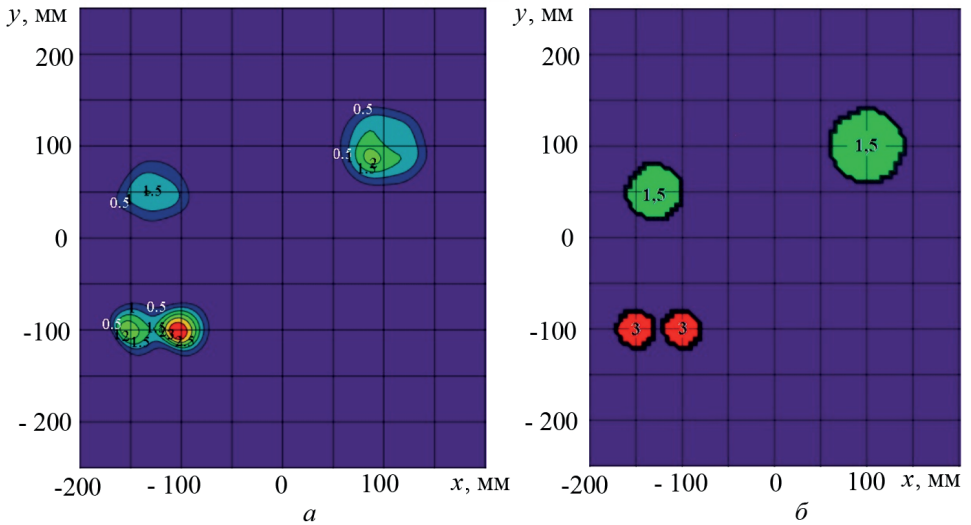


Рис. 6. Неровности отражателя (мм) при моделировании:
a — вычисленные, *б* — внесенные

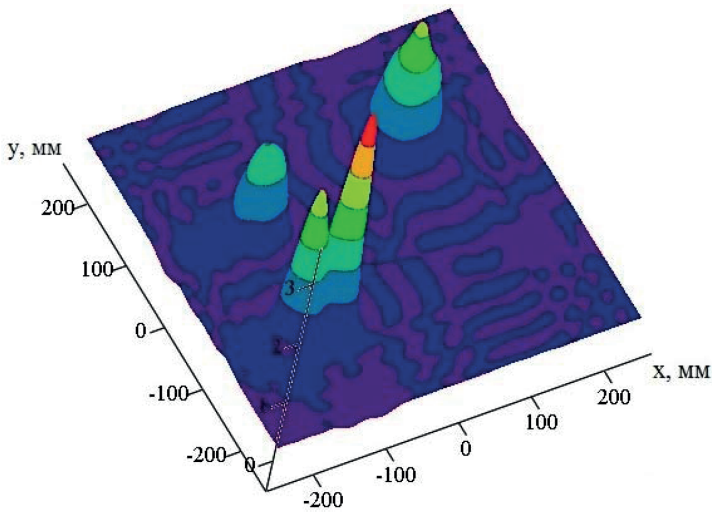


Рис. 7. Вычисленные неровности отражателя при моделировании

поверхностей параболических зеркальных антенн по полю в ближней зоне планарным сканером.

Проведено подробное математическое описание разработанного метода: выведен алгоритм вычисления неровностей отражателя, определено разрешение измерительной системы. Проведено моделирование работы разработанного метода. Важной особенностью данного метода является то, что он позволяет исследовать стационарные крупноапертурные зеркальные антенны планарным сканером, габаритные размеры которого меньше раскрыва исследуемой антенны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mast A.W.* Electronic Antenna Calibration System and Measurements for compensating real-time dynamic distortions // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2010. Art. No. 5446958.
2. *Yan Xu, Fu-ling Guan.* Structure design and mechanical measurement of inflatable antenna // Acta Astronautica. 2012. Vol. 76. P. 13–25.
3. *Hiroaki Tanaka.* Surface error estimation and correction of a space antenna based on antenna gain analyses // Acta Astronautica. 2011. Vol. 68 (7–8). P. 1062–1069.
4. *Ruze J.* The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern // Suppl. al Nuovo Cimento. 1952. Vol. 9. No. 3. P. 364–380.
5. *Вечтомов В.А., Голубцов М.Е., Можаров Э.О.* Зеркальный коллиматор миллиметрового диапазона волн // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. № 7 “Радиооптические технологии в приборостроении”. С. 303–311.
6. *Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С.* Компактные полигоны для измерения характеристик рассеивания / под общ. ред. Н.П. Балабухи. М.: Наука, 2007. 266 с.
7. *Бей Н.А., Митрохин В.Н., Парицков А.А., Ямашкин В.П.* Антенный полигон с зеркальным коллиматором // Антенны. 2006. № 7. С. 83–84.
8. *Результаты наблюдений миллиметрового радиоизлучения солнечных вспышек на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана / В.Ю. Шустиков, А.В. Шумов, В.С. Рыжов, А.В. Жильцов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. Спец. вып. № 7 “Радиооптические технологии в приборостроении”. С. 277–288.*
9. *Калинин А.В.* Радиоголография больших антенн // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 5 (3). С. 175–182.
10. *Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин, В.А. Усин, Я.С. Шифрин.* Л.: Наука, 1985. 272 с.
11. *Парицков А.А.* Разработка и исследование остронаправленных зеркальных антенн для радиосистем миллиметрового диапазона. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва. 1978. 207 с.
12. *A surface distortion analysis applied to the hoop/column deployable mesh reflector antenna / Lee T.-H., Rudduck R.C., Bailey M. C. // IEEE Antennas and propagation. 1989. Vol. 37. No. 4. P. 452–458.*
13. *Near-Field Radio Holography of Large Reflector Antennas / Baars J.W.M., Lucas R., Magnum J.G., Lopez-Perez J.A. // IEEE Antennas and propagation. 2007. Vol. 49. No. 5. P. 399–406.*
14. *A holographic surface measurement of Texas 4,9 antenna 86 GHz / Mayer C.E., Davis J.H., Peters W.L., Vogel W.J. // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 1983. Vol. 32. No. 1. P. 102–109.*
15. *Yahya Rahmat-Samii.* Microwave holography of large reflector antennas — simulation algorithm // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1985. Vol. AP-33. No. 11. P. 1194–1203.
16. *Mayer C.E.* Millimeter wave holographic measurements of large reflector antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium, 1983. Vol. 21. P. 410–413.
17. *Parini C.G., Lau A.K.K., Clarricoats P.J.B.* Phase-only reflector antenna metrology // IEEE Proceeding-H. 1989. Vol. 136. No. 4. P. 343–349.
18. *Yaghjian A.D.* An overview of near-field antenna measurements // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1986. Vol. AP-34. No. 1. P. 30–45.
19. *Bennet J.C., Swang D.G.* Microwave technique for reflector antenna profile measurement / Electronics Letters. 1985. Vol. 21. No. 13. P. 560–561.

20. *Grattan C.L.* Compact-scan, plane-polar microwave holographic technique for reflector antenna profile measurement // *IEEE Proceeding-H.* 1992. Vol. 139. No. 1 P. 91–97.
21. *Семенов К.А.* Синтез квазиоптимального распределения поля в рабочей зоне коллиматора // *Радиотехника.* 2009. № 4. С. 98–103.
22. *Митрохин В.Н.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Изд-во Рудомино, 2010. 208 с.
23. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Изд-во Либроком, 2012. 546 с.
24. *Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 112 с.
25. *Yaghjian A.D.* An overview of near-field antenna measurements // *IEEE Transactions on antennas and propagation.* 1986. V. AP-34. № 1. P. 30–45.

REFERENCES

- [1] Mast A.W. Electronic Antenna Calibration System and Measurements for compensating real-time dynamic distortions. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2010, Art. no. 5446958.
- [2] Yan Xu, Fu-ling Guan. Structure design and mechanical measurement of inflatable antenna. *Acta Astronautica*, 2012, vol. 76, pp. 13–25.
- [3] Hiroaki Tanaka. Surface error estimation and correction of a space antenna based on antenna gain analyses. *Acta Astronautica*, 2011, vol. 68 (7–8), pp. 1062–1069.
- [4] Ruze J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern. *Suppl. al Nuovo Cimento*, 1952, vol. 9, no. 3, pp. 364–380.
- [5] Vechtomov V.A., Golubtsov M.E., Mozharov E.O. Mirror collimator of millimetre range. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr. Spetsvyp no. 7* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng. Spec. Issue no. 7], 2012, pp. 303–311 (in Russ.).
- [6] Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin V.S. Kompaktnye poligony dlya izmereniya kharakteristik rasseivaniya [Compact Testing Areas for Measuring the Characteristics of Dispersion]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 266 p.
- [7] Bey A.N., Mitrokhin V.N., Parshchikov A.A., Yamashkin V.P. Antenna Polygon with Mirror Collimator. *Antenny* [Antennas], 2006, no. 7, pp. 83–84 (in Russ.).
- [8] Shustikov V.Yu., Shumov A.V., Ryzhov V.S., Zhil'tsov A.V. Observational results of the millimetric radio waves of solar flares by the means of RT-7.5 radio telescope. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr. Spetsvyp no. 7 "Radioopticheskie tekhnologii v priborostroenii"* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Issue no. 7 "Radio Optical Technologies in Instrument Engineering"], 2012, pp. 277–288 (in Russ.).
- [9] Kalinin A.V. Radio Holography of Large Antennas. *Vestn. Lobachevskiy Nizhegorodskiy Un.* [Bull. Lobachevskiy Un. of Nizhni Novgorod], 2011, no. 5 (3), pp. 175–182 (in Russ.).
- [10] Bakhrakh L.D., Kremenetskiy S.D., Kurochkin A.P., Usin V.A., Shifrin Ya.S. Metody izmereniya parametrov izluchayushchikh sistem v blizhney zone [Methods of Measuring the Parameters of Radiating Systems in the Near Field]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 272 p.
- [11] Parshchikov A.A. Razrabotka i issledovanie ostronapravlennykh zerkal'nykh antenn dlya radiosistem millimetrovogo diapazona. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and Research of Highly Directional Reflector Antennas for Millimeter Wave Radio Systems. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1978. 207 p.
- [12] Lee T.-H., Rudduck R.C., Bailey M.C. A surface distortion analysis applied to the hoop/column deployable mesh reflector antenna. *IEEE Antennas and propagation*, 1989, vol. 37, no. 4, pp. 452–458.

- [13] Baars J.W.M., Lucas R., Magnum J.G., Lopez-Perez J.A. Near-Field Radio Holography of Large Reflector Antennas. *IEEE Antennas and propagation*, 2007, vol. 49, no. 5, pp. 399–406.
- [14] Mayer C.E., Davisn J.H., Peters W.L., Vogel W.J. A holographic surface measurement of Texas 4,9 antenna 86 GHz. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 1983, vol. 32, no. 1, pp. 102–109.
- [15] Yahya Rahmat-Samii Microwave holography of large reflector antennas – simulation algorithm. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1985, vol. AP-33, no. 11, pp. 1194–1203.
- [16] Mayer C.E. Millimeter wave holographic measurements of large reflector antennas. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1983, vol. 21, pp. 410–413.
- [17] Parini C.G., Lau A.K.K., Clarricoats P.J.B. Phase-only reflector antenna metrology. *IEEE Proceeding-H*, 1989, vol. 136, no. 4, pp. 343–349.
- [18] Yaghjian A.D. An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1986, vol. AP-34, no. 1, pp. 30–45.
- [19] Bennet J.C., Swang D.G. Microwave technique for reflector antenna profile measurement. *Electronics Letters*, 1985, vol. 21, no. 13, pp. 560–561.
- [20] Grattan C.L. Compact-scan, plane-polar microwave holographic technique for reflector antenna profile measurement. *IEEE Proceeding-H*, 1992, vol. 139, no. 1, pp. 91–97.
- [21] Semenov K.A. Synthesis of Quasioptimal Field Distribution in the Collimator Control Area. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2009, no. 4, pp. 98–103 (in Russ.).
- [22] Mitrokhin V.N. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Radio Wave Propagation]. Moscow, Rudomino Publ., 2010. 208 p.
- [23] Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and Radio Wave Propagation]. Moscow, Librokom Publ., 2012. 546 p.
- [24] Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. Okonnye funktsii dlya garmonicheskogo analiza signalov [Window Function for the Harmonic Analysis of Signals]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. 112 p.
- [25] Yaghjian A.D. An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1986, vol. AP-34, no. 1, pp. 30–45.

Статья поступила в редакцию 12.05.2015

Митрохин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Радио-электронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана, главный научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат Государственной премии РФ, заслуженный работник высшей школы РФ. Автор более 150 научных работ в области технической электродинамики, антенн и устройств СВЧ.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Mitrokhin V.N. — D.Sc. (Eng.), Professor of Engineering, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Senior Staff Scientist; Research Institute of Radio Electronic Technology, Bauman Moscow State Technical University. Laureate of the State Prize of the Russian Federation, Honorary Figure of Russian Higher Education, author of over 150 research publications in the fields of engineering, electrodynamics, microwave antennas and devices.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Можаров Эдуард Олегович — мл. науч. сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ в области СВЧ устройств и антенных измерений. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Mozharov E.O. — Research Assistant, Research Institute of Radio Electronic Technology, Ph.D. student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University, author of 12 research publications in the fields of microwave devices and antenna measurements.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Митрохин В.Н., Можаров Э.О. Радиологический метод контроля профиля параболических зеркальных антенн по электромагнитному полю в ближней зоне // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 81–95.

Please cite this article in English as:

Mitrokhin V.N., Mozharov E.O. Radioholography method of electromagnetic near field control of parabolic reflector antenna profile. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 4, pp. 81–95.