

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ИЗЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН

**А. Н. Якимов**

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия  
y\_alder@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Неизбежные погрешности, возникающие при производстве микроволновой антенны, приводят к отклонению распределения поля (тока) на ее излучающей поверхности от расчетного и соответствующему искажению диаграммы направленности. Правильная оценка влияния случайных ошибок на направленные свойства антенны позволяет установить допуски, обеспечивающие необходимую точность изготовления такой антенны. *Материалы и методы.* Предложен подход к решению этой задачи методом математического моделирования для двух типов остро направленных микроволновых антенн: зеркальной параболической и микрополосковой с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности соответственно. Построены математические модели рассматриваемых антенн, позволяющие оценить влияние случайных производственных погрешностей на их характеристики излучения. Показана возможность программной реализации предложенных моделей в системе MATLAB, в которых формируется двумерный массив с размерностью матриц координат, соответствующих излучателям, элементы которого являются случайными числами, распределенными по нормальному закону. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования влияния случайных производственных погрешностей на направленные свойства рассматриваемых зеркальной и микрополосковой антенн. Полученные результаты характерны для традиционного влияния производственных погрешностей на характеристики излучения антенн, что подтверждает адекватность предложенной модели. Таким образом, появляется возможность установления допусков на изготовление рассматриваемых антенн, обеспечивающих приемлемые искажения их излучающих поверхностей еще на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** микроволновая антенна, производственные погрешности, математическая модель, диаграмма направленности

**Для цитирования:** Якимов А. Н. Моделирование влияния производственных погрешностей на излучение микроволновых антенн // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 74–82. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-9

## MODELING OF THE INFLUENCE OF PRODUCTION ERRORS ON THE RADIATION OF MICROWAVE ANTENNAS

**A.N. Yakimov**

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia  
y\_alder@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Unavoidable errors that occur during the production of a microwave antenna lead to a deviation of the field (current) distribution on its radiating surface from the calculated one and a corresponding distortion of the radiation pattern. A correct assessment of the influence of random errors on the directional properties of the antenna allows you to set the tolerances that ensure the necessary accuracy of manufacturing such an antenna. *Materials and methods.* An approach to solving this problem by mathematical modeling is proposed for two types of acutely directional microwave antennas: mirror parabolic and microstrip with continuous and discrete distribution of electromagnetic sources within the radiating surface, respectively. Mathematical models of the antennas under consideration have been constructed to assess the effect of random manufacturing errors on their radiation characteristics. The possibility of software implementation of the proposed models in the MATLAB system is shown, in which a two-dimensional array with the dimension of coordinate matrices corresponding to emitters is formed, the elements of which are random numbers distributed according to the normal law. *Results and conclusions.* The results of a model study of the influence of random manufacturing errors on the directional properties of the considered mirror and microstrip antennas are presented. The results obtained are characteristic of the traditional influence of manufacturing errors on the characteristics

of antenna radiation, which confirms the adequacy of the proposed model. Thus, it becomes possible to establish tolerances for the manufacture of the antennas in question, providing acceptable distortions of their radiating surfaces at the design stage.

**Keywords:** microwave antenna, production errors, mathematical model, radiation pattern

**For citation:** Yakimov A.N. Modeling of the influence of production errors on the radiation of microwave antennas. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):74–82. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-9

## Введение

По мере уменьшения длины электромагнитных волн, используемых в устройствах и антеннах сверхвысоких частот (СВЧ), производственные погрешности оказывают все большее влияние на их электрические характеристики. В связи с этим одной из главных проблем серийного производства современных устройств и антенн СВЧ, к которым относятся и микроволновые антенны, на сегодняшний день стала проблема обеспечения заданной точности их изготовления. Разработчик уже не может ограничиваться электрическими расчетами и практическим конструированием, а должен выполнять еще точностное исследование и обязательно назначать условия и требования на изготовления СВЧ конструкций [1].

Неизбежные погрешности, возникающие при производстве микроволновой антенны, приводят к отклонению распределения поля (тока) на ее излучающей поверхности от расчетного и соответствующему искажению диаграммы направленности (ДН). Систематические ошибки при одинаковом методе изготовления оказываются одинаковыми в различных экземплярах антенны, их можно учесть заранее. Случайные же ошибки при этом могут быть различными и их невозможно учесть заранее, а можно лишь оценить их влияние. Правильная оценка влияния случайных ошибок на направленные свойства антенны позволяет установить допуски, обеспечивающие необходимую точность изготовления антенны [2].

Таким образом, актуальной является задача оценки влияния случайных погрешностей изготовления микроволновых антенн на их характеристики направленности. Рассмотрим возможности решения этой задачи методом математического моделирования для двух типов остро направленных микроволновых антенн: зеркальной параболической антенны и микрополосковой антенны (МПА) с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности соответственно [3, 4].

## Постановка задачи

Влияние производственных погрешностей на характеристики излучения микроволновой антенны можно оценить, если в расчетах ориентироваться на геометрические и электрические характеристики электромагнитных источников излучающей поверхности этой антенны, обеспечиваемые технологическими возможностями производства с учетом производственных отклонений. В зеркальных параболических антеннах такими электромагнитными источниками можно считать конечные элементы излучающей поверхности параболического зеркала (отражателя), а в МПА это прямоугольные излучатели антенного полотна [4, 5].

Случайные отклонения геометрических параметров излучающей поверхности антенны от ее расчетных значений возникают из-за несовершенства технологий изготовления. При изготовлении отражателя зеркальной антенны из-за недостаточной точности обработки поверхности возникают случайные отклонения от его требуемого расчетного профиля, что приводит к ошибкам в распределении поля по апертуре антенны. При изготовлении МПА возникают случайные отклонения геометрических размеров антенны от требуемых расчетных, что приводит к ошибкам в распределении токов по поверхности антенны. В итоге это приводит к изменению характеристики излучения этих антенн.

Случайные производственные погрешности будем, как и принято, моделировать нормальным (гауссовым) законом с нулевым средним значением и вероятностью 99 %, в соответствии с которым распределение вероятности отклонений профиля отражателя зеркальной антенны и геометрии излучающего полотна МПА от расчетных опишется выражением [1, 6]

$$p(\Delta) = \frac{1}{\Delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{\Delta^2}}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – случайные отклонения профиля отражателя или геометрии излучающего полотна МПА от расчетных;  $p(\Delta)$  – плотность вероятности случайной величины, определяющей профиль отражателя или геометрию излучающего полотна;  $\bar{\Delta}$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) профиля отражателя или геометрии излучающего полотна;  $\bar{\Delta}^2$  – дисперсия нормального закона распределения.

Максимальное отклонение  $\Delta_{\max}$  профиля отражателя или геометрии излучающего полотна МПА от расчетного (допуск на точность изготовления) при этом с вероятностью 99 % не превышает [3]

$$\Delta_{\max} = 2,6 \cdot \bar{\Delta}. \quad (2)$$

Возможностям обычного серийного производства соответствует  $\Delta_{\max} \approx 10^{-3} \cdot D$ , где  $D$  – диаметр отражателя. Более тонкие технологии изготовления отражателей зеркальных антенн, зачастую сопровождающиеся специальной подгонкой формы поверхности, позволяют получить  $\Delta_{\max} \leq 10^{-4} \cdot D$ .

Для оценки влияния случайных производственных погрешностей на характеристики излучения рассматриваемых микроволновых антенн воспользуемся методом математического моделирования.

### Построение математических моделей

Цифровая модель нормального закона распределения реализована в большинстве математических системах расчета. Например, в системе MATLAB, использованной для проведения расчетов, функция *rndn* позволяет создать двумерный массив с размерностью матриц координат  $I \times K$ , соответствующих излучателям, элементы которого являются случайными числами, распределенными по нормальному закону с математическим ожиданием равным 0 и СКО равным 1 [7].

Это позволяет задать матрицу случайных отклонений геометрических параметров излучателей антенной решетки с учетом производственного допуска как

$$[\text{Rnd1}] = \text{rndn}(I, K) \cdot \Delta_{\max} / 2,6. \quad (3)$$

Случайные величины элементов сформированной таким образом матрицы  $[\text{Rnd1}]$  некоррелированы.

Если для каждого из параметров, используемых в расчетах и изменяющихся в результате производственных погрешностей по случайному закону, составить матрицы с размерностью  $I \times K$ , каждый из элементов которой  $ik$  соответствует своему излучателю и учитывает отклонение параметров в соответствии с матрицей, определяемой формулой (3), то это позволит оценить влияние этих погрешностей на характеристики излучения антенны.

В зеркальных антеннах случайные величины элементов сформированной таким образом матрицы  $[\text{Rnd1}]$  некоррелированы, однако интервал (радиус) корреляции реальных антенн  $r_k$  обычно составляет длину волны и более. При этом с увеличением интервала корреляции  $r_k$  увеличиваются размеры участков реальной поверхности, отклоняющихся от расчетной поверхности. Для учета  $r_k$  в  $[\text{Rnd1}]$  целесообразно разрабатывать специальные функции, дублирующие случайные величины матрицы  $[\text{Rnd1}]$  с заданным коэффициентом  $k_k = (r_k/L_0) + 1$ , где  $L_0$  – интервал разбиения поверхности, а  $r_k$  – величина кратная  $L_0$ . При этом исходная для дублирования матрица  $[\text{Rnd1}]$  формируется с меньшей размерностью, обеспечивающей требуемый формат после дублирования с заданным коэффициентом  $k_k$  [2, 8, 9].

Такой подход позволяет, несмотря на случайные отклонения профиля по нормальному закону, повторять форму исходной поверхности на заданных интервалах корреляции  $r_k$ . Так, например, для геометрической модели отражателя с интервалом разбиения поверхности  $L_0 = \lambda = 0,03$  м равным интервалу корреляции  $r_k$  получаем  $k_k = 2$ . При этом случайные производственные погрешности с нормальным законом распределения вероятности отклонений профиля в главном сечении параболического отражателя  $uOz$  декартовой системы координат будут иметь вид, представленный на рис. 1.

Так как интервал корреляции  $r_k = \lambda$  соответствует современным технологиям изготовления отражающих зеркал микроволновых антенн, то именно его используем при моделировании случайных производственных погрешностей [2, 8].

По отклонениям  $\Delta r_{ik}$  излучающей поверхности отражателя антенны от расчетной в узлах  $ik$  ее геометрической модели вдоль направления к фокусу легко рассчитать отклонения этих узлов вдоль осей декартовой системы координат и, следовательно, учесть возникающие искажения и в электродинамической модели излучения этой антенны (рис. 2) [5, 8].

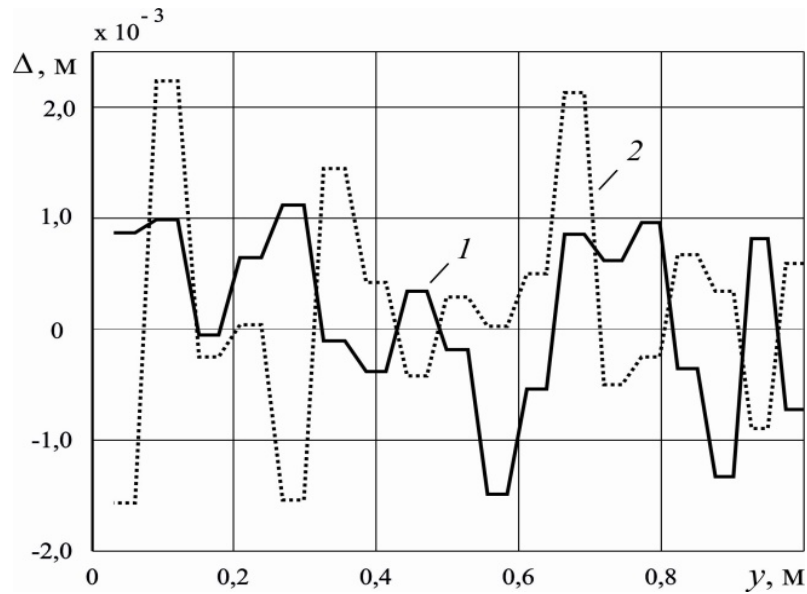


Рис. 1. Фрагмент пространственной картины случайных отклонений профиля зеркальной антенны в его главном сечении  $yOz$  по нормальному закону: 1 – при отрицательных координатах; 2 – при положительных координатах

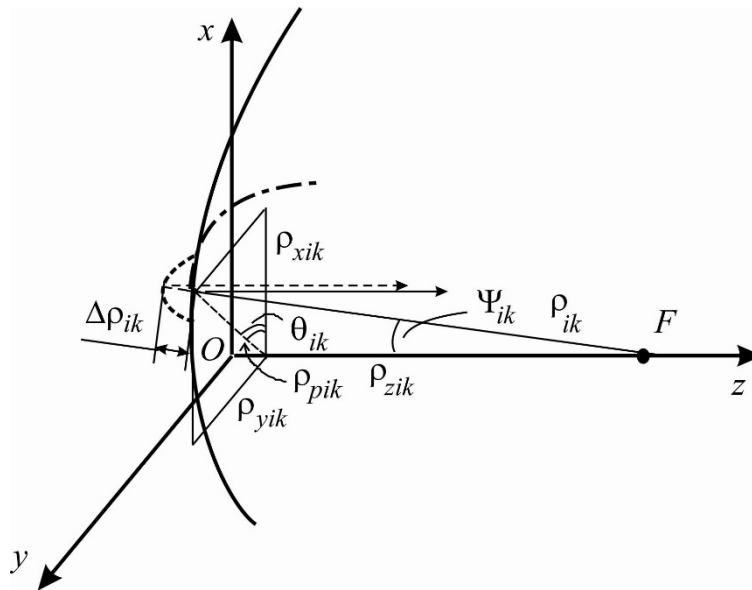


Рис. 2. Составляющие отклонений излучающей поверхности отражателя

Расстояние  $\rho_{ik}$  от фокуса параболического отражателя  $F$  до узла излучающей поверхности с индексами  $ik$  может быть найдено через его составляющие в декартовой системе координат следующим образом:

$$\rho_{ik} = \sqrt{\rho_{xik}^2 + \rho_{yik}^2 + \rho_{zik}^2}. \quad (4)$$

Угол  $\Psi_{ik}$  относительно оси антенны в направлении узла  $ik$  при этом равен

$$\Psi_{ik} = \arctg(\rho_{pik} / \rho_{zik}), \quad (5)$$

где  $\rho_{pik} = \sqrt{\rho_{xik}^2 + \rho_{yik}^2}$ .

В свою очередь угол  $\theta_{ik}$  отклонения узла  $ik$  от плоскости  $xOz$  может быть определен как

$$\theta_{ik} = \arccos(\rho_{xik} / \rho_{pik}). \quad (6)$$

Тогда, исходя из геометрических построений, отклонения  $\Delta\rho_{ik}$  излучающей поверхности отражателя от расчетной вдоль направления к фокусу антенны в узлах  $ik$  ее геометрической модели могут быть представлены в виде

$$\Delta\rho_{ik} = \sqrt{\Delta\rho_{xik}^2 + \Delta\rho_{yik}^2 + \Delta\rho_{z_{ik}}^2}, \quad (7)$$

а их составляющие в декартовой системе координат с учетом углов  $\Psi_{ik}$  и  $\theta_{ik}$  как

$$\Delta\rho_{z_{ik}} = \Delta\rho_{ik} \cos \Psi_{ik}, \quad (8)$$

$$\Delta\rho_{xik} = \Delta\rho_{ik} \sin \Psi_{ik} \cos \theta_{ik}, \quad (9)$$

$$\Delta\rho_{yik} = \Delta\rho_{ik} \sin \Psi_{ik} \sin \theta_{ik}. \quad (10)$$

В результате получаем, что отклонения  $\Delta\rho_{ik}$  излучающей поверхности отражателя от расчетной, возникающие вследствие случайных производственных погрешностей, в предложенной математической модели задаются случайным законом и их можно считать описанными.

В соответствии с электродинамической постановкой задачи об излучении зеркальной микроволновой антенны компоненты поля ее излучения получаются суммированием сферических компонент поля  $E_{\varphi_i}$  и  $E_{\theta_i}$  каждого конечного элемента, а также  $E_{\varphi_j}$  и  $E_{\theta_j}$  каждого краевого ребра кромки излучающей по антенны относительно глобальной системы координат [5]:

$$E_{\Sigma\varphi} = \sum_i E_{\varphi_i} + \sum_j E_{\varphi_j}, \quad E_{\Sigma\theta} = \sum_i E_{\theta_i} + \sum_j E_{\theta_j}. \quad (11)$$

С учетом этих выражений ДН антенны в горизонтальной плоскости  $F(\varphi)$  может быть описана формулой

$$F(\varphi) = E_{\Sigma\varphi}(\varphi) / E_{\max}, \quad (12)$$

где  $E_{\max} = E_{\Sigma\varphi}(0)$  – максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси симметрии.

Для оценки влияния случайных производственных погрешностей на характеристики излучения МПА необходимо математическое описание геометрии ее излучающего полотна. Пусть МПА представляет собой антенную решетку, излучающее полотно которой имеет плоскую двумерную конфигурацию, представленную на рис. 3 [4, 10].

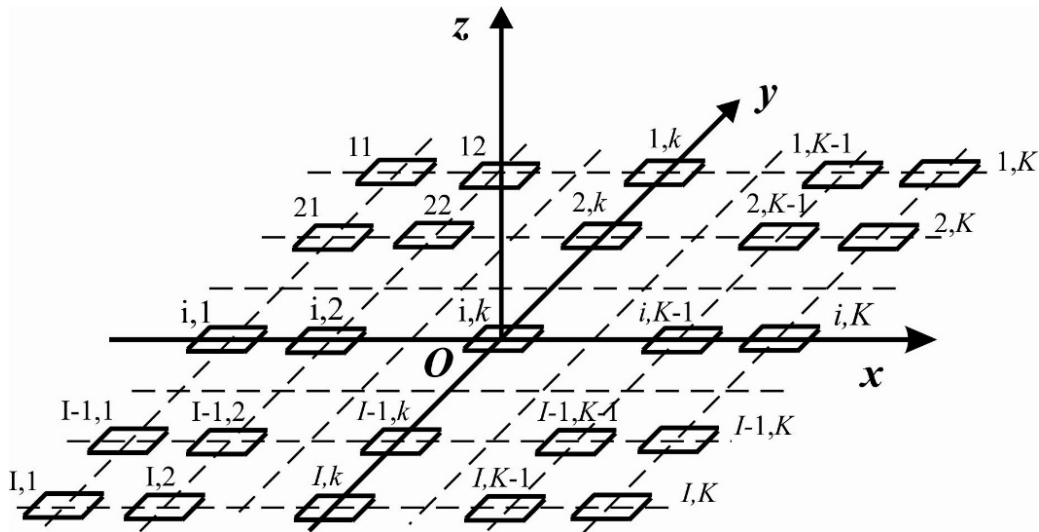


Рис. 3. Излучающее полотно МПА

Здесь  $I$  и  $K$  – число излучателей антенной решетки расположенных вдоль осей  $Oy$  и  $Ox$  соответственно. Излучатели такой антенны имеют прямоугольную форму, расположены над слоем диэлектрика с металлическим экраном и возбуждаются от микрополосковых линий.

Использование токового метода для расчета характеристик прямоугольного микрополоскового излучателя позволяет получить выражения, описывающие соответствующие амплитудные ДН в плоскостях векторов электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей [4]:

– в плоскости  $\mathbf{E}$  ( $\varphi = \pi/2$ )

$$F_{\theta}(\theta) = \frac{2\xi \cos \theta}{\sqrt{\xi + [\varepsilon \cos \theta \operatorname{ctg}(\xi k_0 d)]^2}} \times \left[ \frac{\cos(0,5k_0 b \sin \theta)}{1 - [(k_0 b / \pi) \sin \theta]^2} \right], \quad (13)$$

– в плоскости  $\mathbf{H}$  ( $\varphi = 0$ )

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + [\xi \operatorname{ctg}(\xi k_0 d)]^2}} \times \left[ \frac{\sin(0,5k_0 a \sin \theta)}{0,5k_0 a \sin \theta} \right], \quad (14)$$

где  $a$  и  $b$  – ширина и длина излучателей соответственно;  $d$  – толщина диэлектрической подложки;  $\xi = \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}$ ;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;  $\theta$  – угол относительно нормали к плоскости излучателя;  $\varphi$  – угол относительно оси  $Ox$  правой декартовой системы координат;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – волновое число;  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве.

Координаты точки наблюдения, расположенной в дальней зоне МПА, могут быть найдены относительно ее центральной точки, совпадающей с началом декартовой системы координат как

$$x_c = r_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad y_c = r_c \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad z_c = r_c \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

где  $r_c$  – расстояние от центральной точки МПА до точки наблюдения.

Расстояние между центрами излучающих элементов вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  выбирается равным  $\lambda/2$ . С учетом координат центров излучающих элементов  $x_{ik}$ ,  $y_{ik}$  и  $z_{ik}$ , расстояние от центров излучающих элементов до точки наблюдения  $r_{ik}$  определяется выражением

$$r_{ik} = \sqrt{(x_c - x_{ik})^2 + (y_c - y_{ik})^2 + (z_c - z_{ik})^2}. \quad (16)$$

Матрица случайных отклонений геометрических параметров МПА с учетом производственного допуска при этом рассчитывается с использованием выражения (3).

Напряженность  $\mathbf{E}_{ik}$  электрического поля, создаваемого излучателями  $ik$  в точке наблюдения, может быть определена как

$$\mathbf{E}_{ik} = A \cdot F_{\varphi ik}(\theta) \cdot F_{\theta ik}(\theta) \cdot \exp(-ik_0 r_{ik}) / r_{ik}, \quad (17)$$

где  $A$  – амплитудный множитель;  $F_{\varphi ik}(\theta), F_{\theta ik}(\theta)$  – диаграммы направленности излучателей в плоскостях  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{E}$ , учитывающие производственные отклонения.

Напряженность суммарного электрического поля от всех излучателей  $\mathbf{E}_{\Sigma}$  в точке наблюдения при этом равна

$$\mathbf{E}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mathbf{E}_{ik}, \quad (18)$$

а нормированная амплитудная ДН МПА определяется выражением

$$F_{\Sigma}(\theta) = |\mathbf{E}_{\Sigma}(\theta)| / |\mathbf{E}_{\Sigma \max}|, \quad (19)$$

где  $\mathbf{E}_{\Sigma \max}$  – максимальный уровень напряженности суммарного электрического поля.

### Результаты моделирования

Для математического моделирования зеркальной антенны использовалась микроволновая антенна с отражающим зеркалом в виде параболоида вращения с диаметром  $D = 2$  м и фокусным расстоянием  $f = 0,7$  м при облучении электромагнитной волной с  $\lambda = 0,03$  м и вертикальной поляризацией, создаваемой рупором с размерами раскрытия  $a_r = 0,65\lambda$  и  $b_r = 0,48\lambda$ . Исследования, проведенные для такой антенны на конечно-элементной математической модели с использованием формул (3) – (12), показали следующее [8].

При температуре окружающей среды  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и идеально гладкой излучающей поверхности параболоида формируется ДН с шириной на уровне половинной мощности  $2\Phi_{0,5} = 1,04$  град (рис. 4, кривая 1), которую будем называть исходной.

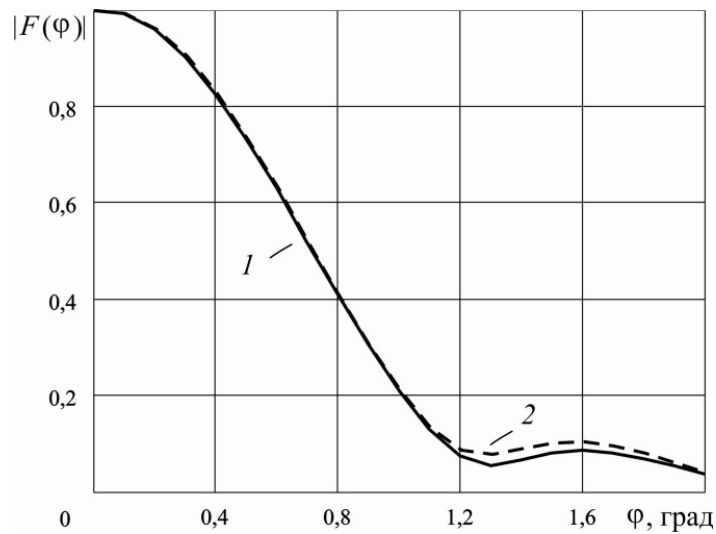


Рис. 4. Диаграммы направленности МПА:  
 1 – при идеально гладкой излучающей поверхности;  
 2 – с учетом случайных производственных погрешностей при допуске  $\Delta_{\max} \approx 10^{-3} \cdot D$

Случайные производственные погрешности при обычном серийном производстве и интервале корреляции  $r_k = \lambda$  вызывают рост максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) при практически неизменной ширине ДН (рис. 4, кривая 2). Полученный результат хорошо согласуется с данными, приведенными в работах [1, 3].

Для моделирования МПА использовалось излучающее полотно  $I = K = 25$  с параметрами:  $a = b = 0,48\lambda$ ;  $\epsilon = 2,3$ ;  $d = 1,158 \text{ мм}$ ;  $\Delta_{\max} = \lambda_0/8$ . Длина излучаемой электромагнитной волны составляла  $\lambda_0 = 16 \text{ мм}$ , а расстояние  $r_c = 100 \text{ м}$ .

Расчеты, проведенные с использованием предложенной модели учета случайных погрешностей и формул (13)–(19), показали следующее [10, 11].

Без учета взаимного влияния излучателей ДН отдельного излучателя, выполненного без учета производственных погрешностей (рис. 5, кривая 1), отличается от ДН аналогичного излучателя, но рассчитанного с учетом производственных погрешностей (см. рис. 3, кривая 2) не очень существенно.

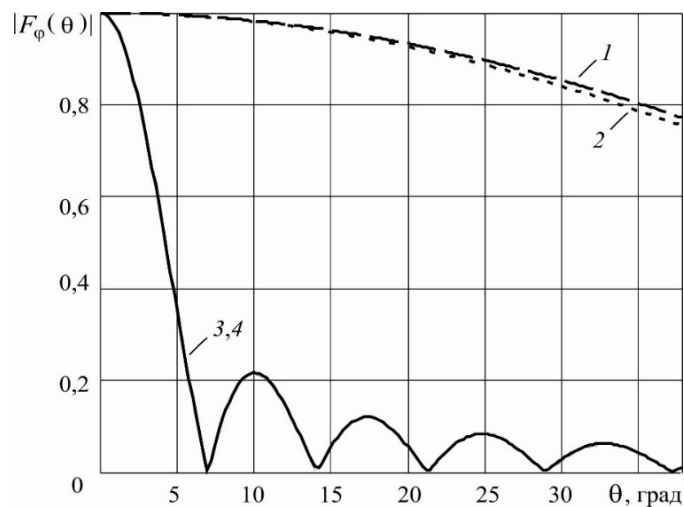


Рис. 5. Диаграммы направленности МПА в плоскости **H**:  
 1, 2 – для отдельного излучателя без учета и с учетом производственных погрешностей соответственно; 3, 4 – для всей МПА без учета и с учетом производственных погрешностей соответственно

При этом ДН всей МПА без учета (рис. 5, кривая 3) и с учетом (рис. 5, кривая 4) в приведенном масштабе практически совпадают.

Произошедшие изменения все же можно легко заметить, если изменить масштаб представления данных в области перехода от главного к боковым лепесткам ДН (рис. 6).

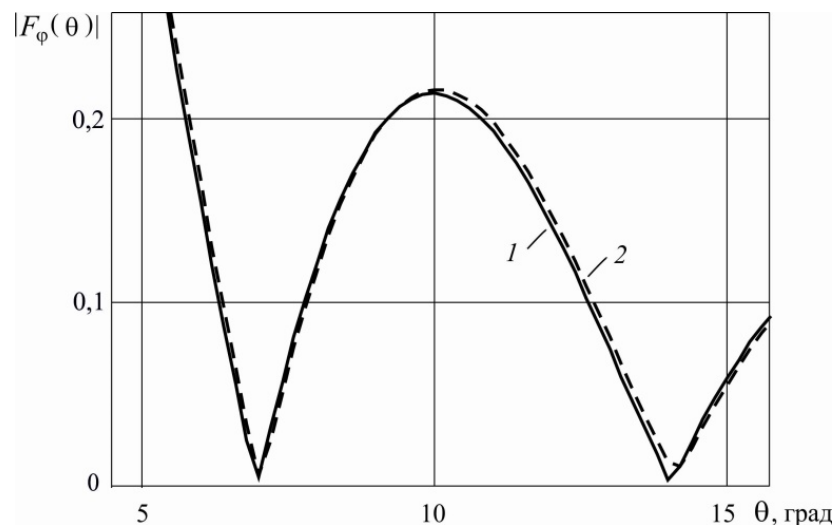


Рис. 6. Диаграммы направленности МПА в области перехода от главного к боковым лепесткам: 1, 2 – без учета и с учетом производственных погрешностей соответственно

При этом видно, что относительно ДН МПА без учета производственных погрешностей (рис. 6, кривая 1) дополнительный учет этих погрешностей приводит к незначительному расширению ДН, расплыванию ее нулевых значений, а также к росту уровня боковых лепестков (рис. 6, кривая 2).

Отмеченные тенденции характерны для традиционного влияния производственных погрешностей на характеристики излучения антенн. С учетом этого предложенный подход к оценке их влияния на излучение зеркальных и МПА может оказаться полезным при проектировании и изготовлении антенн такого типа [1, 4, 8, 10, 12].

### Заключение

Предложенное математическое описание случайных производственных погрешностей позволяет учитывать их влияние при моделировании характеристик излучения остронаправленных микроволновых антенн с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности. Таким образом, появляется возможность установления допусков на изготовление таких антенн, обеспечивающих приемлемые искажения их излучающих поверхностей еще на этапе проектирования.

### Список литературы

1. Воробьев Е. А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. Л. : Судостроение, 1980. 148 с.
2. Кочержевский Г. Н., Ерохин Г. А., Козырев Н. Д. Антенно-фидерные устройства. М. : Радио и связь, 1989. 352 с.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
4. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М. : Радио и связь, 1986. 144 с.
5. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М. : Радио и связь, 1982. 624 с.
7. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.
8. Якимов А. Н. Моделирование случайных производственных погрешностей параболических отражателей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2004. С. 269–271.
9. Дрбаккин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
10. Якимов А. Н. Оценка влияния производственных погрешностей на характеристики излучения микрополосковой антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2005. С. 263–265.



11. Якимов А. Н. Системный подход к построению обобщенной математической модели микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 16–23. doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-2
12. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.

### References

1. Vorob'ev E.A. *Raschet proizvodstvennykh dopuskov ustroystv SVCh = Calculation of production tolerances of microwave devices*. Leningrad: Sudostroenie, 1980:148. (In Russ.)
2. Kocherzhevskiy G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Radio i svyaz', 1989:352. (In Russ.)
3. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh = Antennas and microwave devices*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
4. Panchenko B.A., Nefedov E.I. *Mikropoloskovye anteny = Microstrip antennas*. Moscow: Radio i svyaz', 1986:144. (In Russ.)
5. Yakimov A.N. On the problem of discrete representation of parabolic antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):17–22. (In Russ.)
6. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika = Statistical radio engineering*. Moscow: Radio i svyaz', 1982:624. (In Russ.)
7. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy = MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)
8. Yakimov A.N. Modeling of random production errors of parabolic reflectors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2004:269–271. (In Russ.)
9. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)
10. Yakimov A.N. Evaluation of the influence of production errors on the characteristics of microstrip antenna radiation. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2005:263–265. (In Russ.)
11. Yakimov A.N. System approach to the construction of a generalized mathematical model of a microwave antenna. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):16–23. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-2
12. Yakimov A.N. On the problem of discrete representation of parabolic antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):17–22. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Николаевич Якимов

доктор технических наук, профессор,  
 профессор кафедры конструирования и технологий  
 электронных и лазерных средств,  
 Санкт-Петербургский государственный университет  
 аэрокосмического приборостроения  
 (Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)  
 E-mail: y\_alder@mail.ru

#### Aleksandr N. Yakimov

Doctor of technical sciences, professor,  
 professor of the sub-department of construction  
 and technology of electronic and laser equipment,  
 Saint Petersburg State University  
 of Aerospace Instrumentation  
 (67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
 The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 15.07.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 14.08.2023**

**Принята к публикации/Accepted 11.09.2023**