

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.11>

УДК: 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОГРЕШНОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕД

Седельников Ю.Е., Потапова О.В.

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

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2022 г.

Аннотация. В работе рассматриваются изменения характеристик сфокусированного электромагнитного поля, возникающие в случае, когда параметры диссипативных сред были определены с некоторой фиксированной погрешностью. Рассматриваются погрешности определения коэффициента затухания и коэффициента фазы. Моделирование распределения напряженности электромагнитного осуществлялось в программе MathCad. В качестве параметров сфокусированного поля рассматривались размер области фокусировки и уровень локальных максимумов, прилегающих к области фокусировки. Показано, что погрешности определения параметров сред несколько снижают эффективность формирования сфокусированного поля, однако не ставят под сомнение сам принцип фокусировки. Наиболее существенными являются погрешности определения коэффициента фазы, при которых происходит заметное уменьшение концентрации электромагнитного поля вблизи точки фокусировки.

Ключевые слова: сфокусированное электромагнитное поле, точка фокусировки, погрешность коэффициента затухания, погрешность коэффициента фазы.

Автор для переписки: Потапова Ольга Владимировна, potapova_olga@bk.ru

Введение

В настоящее время существует большое число теоретических исследований и практических разработок устройств и систем, в которых используются апертуры, сфокусированные в область ближнего излученного поля [1-5]. При этом среда, в которой происходит формирование сфокусированного поля, как правило, имеет диссипативные свойства [5, 6-8].

Параметры материалов, такие как относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и проводимость среды σ , на практике всегда определяются с некоторой погрешностью. В связи с этим, актуальной является оценка эффективности формирования сфокусированного электромагнитного поля в средах, параметры которых были определены с некоторой погрешностью [9-10]. При определении напряженности электромагнитного поля в диссипативной среде, как правило, используются значения коэффициента затухания α и коэффициента фазы среды β [1, 8], которые также будут определяться с погрешностью. В работе исследуются изменения параметров сфокусированного поля при фиксированных погрешностях определения коэффициента затухания и коэффициента фазы.

1. Теоретические положения

Формирование сфокусированного электромагнитного поля на расстоянии, соизмеримом с размером антенны, достигается синфазным сложением парциальных полей элементов апертуры в точке фокусировки [1]. Это обеспечивается созданием фазового распределения в антенне вида:

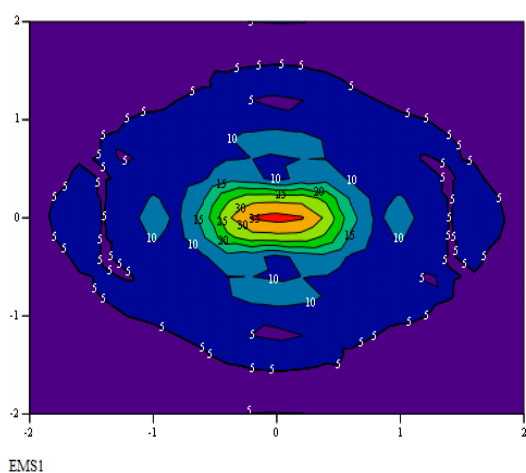
$$\varphi(x) = \beta R(x', y', x_0, y_0, z_0) \quad (1)$$

где $R(x', y', x_0, y_0, z_0)$ – расстояние от точки раскрытия (x', y') до точки фокусировки (x_0, y_0, z_0) .

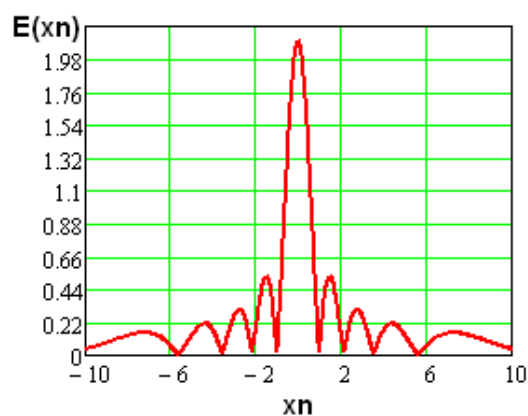
Электромагнитное поле, сфокусированное в точку, имеет определенное сходство с полями в дальней зоне: оно представляет собой более или менее

выраженный «пик», окруженный всплесками меньшей интенсивности, аналогичными боковым лепесткам ДН антенны в дальней зоне (рис. 1).

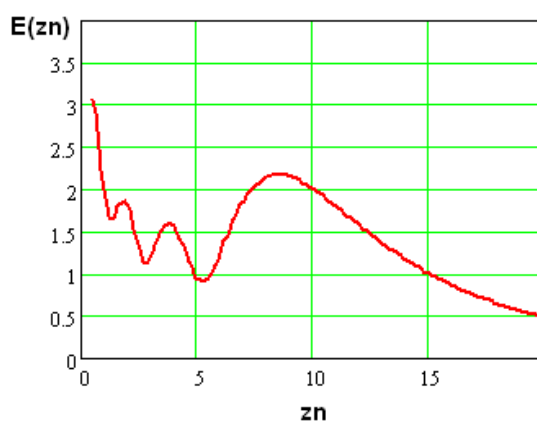
В качестве параметров сфокусированного поля, в работе рассматривались размер области фокусировки (РОФ) и уровень локальных максимумов, прилегающих к области фокусировки (который по аналогии с ДН в дальней зоне рассматривался как УБЛ). Кроме того, при помощи величины коэффициента направленного действия (введенного в [1]), оценивалась степень концентрации поля вблизи точки фокусировки.



а) плоскость, параллельная антенне



б) направление, параллельное антенне



в) направление, перпендикулярное антенне

Рис. 1. Распределение ЭМП вблизи точки фокусировки

2. Проведенные исследования

В качестве антенны в работе рассматривалась линейная антенная решетка из 11-ти излучателей, расположенная в среде, параметры которой определялись с некоторой погрешностью. Точка фокусировки располагалась в центре антенны на глубине, равной размеру решетки. Моделирование распределения напряженности электромагнитного проводилось в программе MathCad по известным формулам (1) и (2) [1]:

$$\vec{E}(x, y, z) = \int_S \vec{g}(x', y', x, y, z) \cdot j(x', y') \cdot \frac{\exp(-\gamma R(x', y', x, y, z))}{R(x', y', x, y, z)} x', y', \quad (2)$$

где (x', y') – координаты элементарного излучателя в апертуре,

$j(x', y')$ – амплитудно-фазовое распределение токов в апертуре,

$\vec{g}(x', y', x, y, z)$ – значение напряженности электрического поля, создаваемого текущим элементарным источником в точке наблюдения (x, y, z) ,

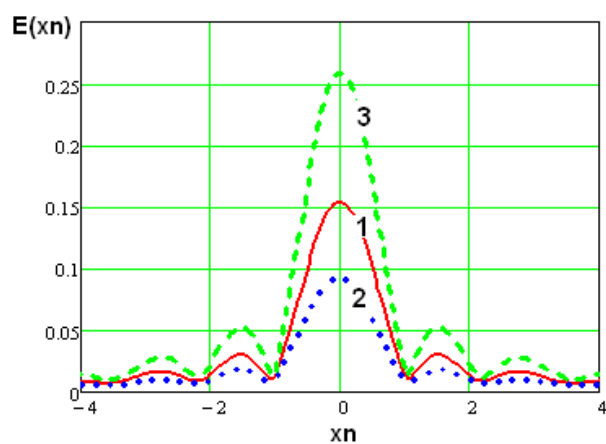
$R(x', y', x, y, z)$ – расстояние от источника до точки наблюдения,

$\gamma = \alpha + j\beta$ – коэффициент распространения в диссипативной среде.

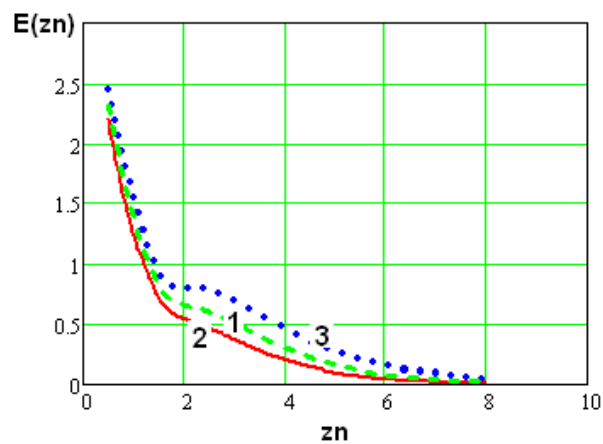
Погрешность определения коэффициента затухания среды, очевидным образом сказывается на абсолютных значениях напряженности поля в точке фокусировки (рис. 2а и б), однако параметры поля (РОФ и УБЛ) остаются практически неизменными (рис. 2в и г).

Из формулы (1) следует, что параметры сфокусированного поля более «чувствительны» к погрешностям определения коэффициента фазы, чем коэффициента затухания.

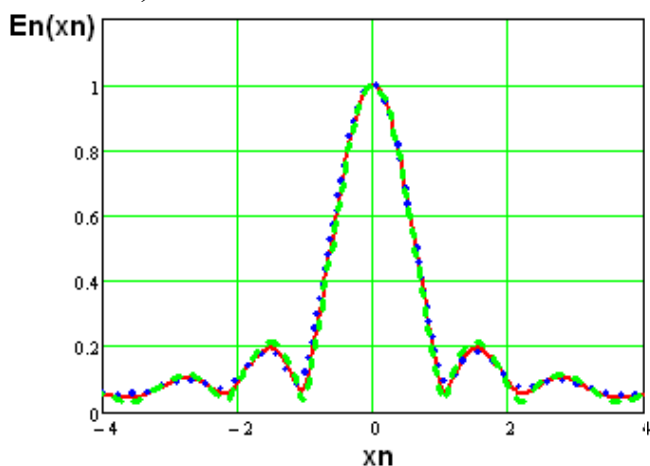
Погрешности определения коэффициента фазы незначительно меняют абсолютные значения напряженности поля, но существенным образом сказываются на параметрах сфокусированного поля (рис. 3). Погрешности определения коэффициента фазы среды смещают глубину расположения точки фокусировки (рис. 3б, г), изменяют РОФ и УБЛ (рис. 3в), а также приводят к «заплыванию» локальных минимумов, расположенных вблизи точки фокусировки (рис. 3а, в).



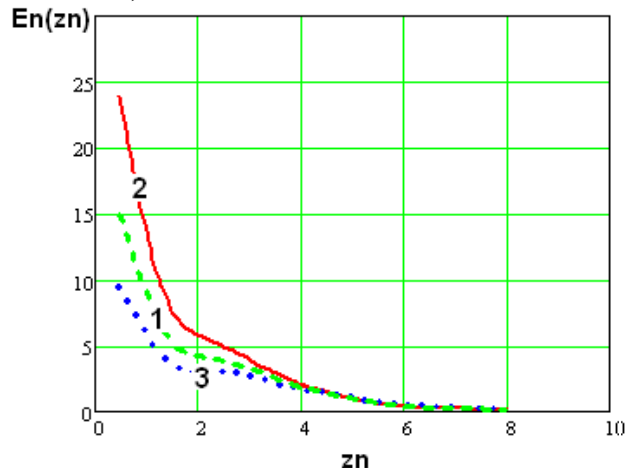
а) абсолютные значения



б) абсолютные значения



в) нормированные значения



г) нормированные значения

Рис. 2. Распределение напряженности сфокусированного поля в направлении параллельном антенне (а, в), и в перпендикулярном направлении (б, г) при погрешностях определения α .

Кривые соответствуют погрешностям: кривая 1 – $\Delta\alpha=0$,
кривая 2 – $\Delta\alpha=+20\%$, кривая 3 – $\Delta\alpha=-20\%$

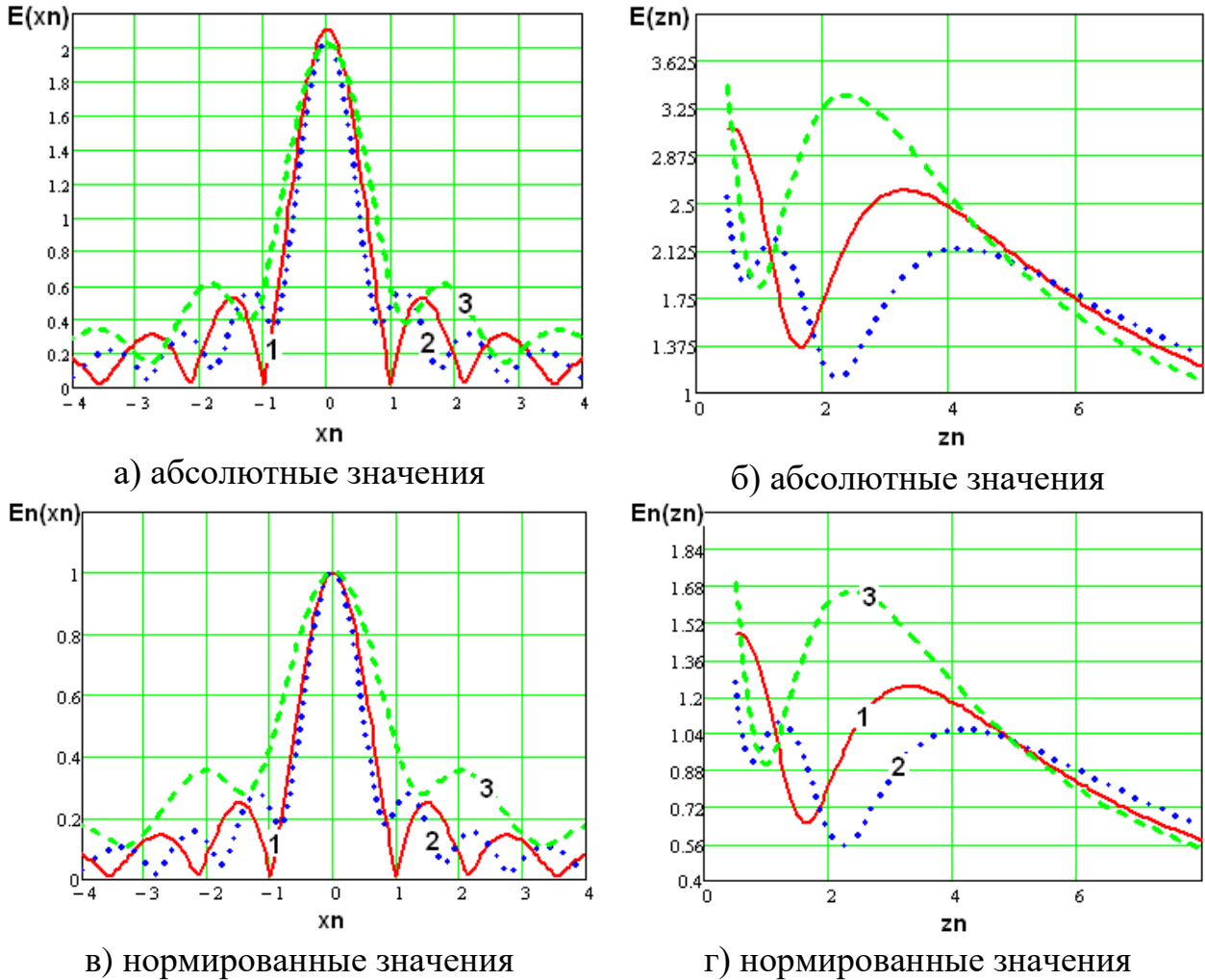


Рис. 3. Распределение напряженности сфокусированного поля в направлении параллельном антенне (а, в), и в перпендикулярном направлении (б, г) при погрешностях определения β .

Кривые соответствуют погрешностям: кривая 1 – $\Delta\beta=0$,
 кривая 2 – $\Delta\beta=+20\%$, кривая 3 – $\Delta\beta=-20\%$

Изменение степени концентрации электромагнитного поля вблизи точки фокусировки, согласно [1], целесообразно оценивать величиной коэффициента направленного действия (3):

$$\text{КНД}(\theta_0, \varphi_0) = \frac{|\vec{E}(\theta_0, \varphi_0)|^2}{|\vec{E}_{\text{ненапр}}|^2}, \quad (3)$$

где $|\vec{E}(\theta_0, \varphi_0)|^2$ – плотность потока мощности электромагнитного излучения в направлении (θ_0, φ_0) , создаваемого рассматриваемой сфокусированной апертурой,

$|\vec{E}_{\text{ненапр}}|^2$ – плотность потока мощности, создаваемой идеальным изотропным излучателем, при условии равенства мощностей излучения сфокусированной и ненаправленной антенн.

Изменение КНД, в зависимости от погрешности коэффициента затухания α , показано на рис. 4. Из рисунков следует, что в случае, когда реальный коэффициент затухания меньше измеренного, степень концентрации электромагнитного поля вблизи точки фокусировки может даже увеличиться по сравнению с ожидаемым значением. Но изменение КУ в процентах (при ошибке $\alpha \leq 30\%$) невелико (менее 8%).

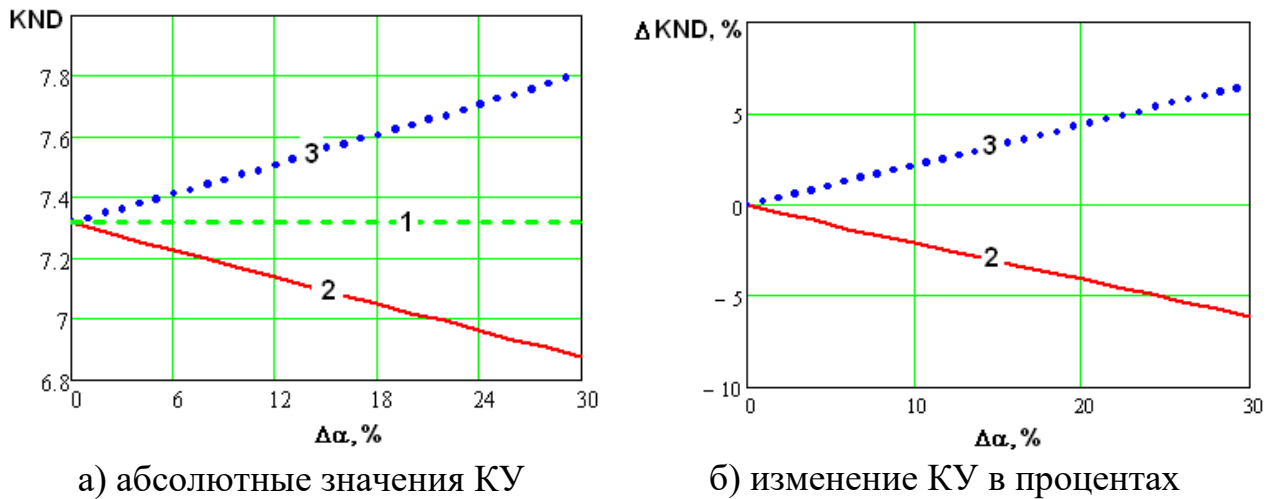


Рис. 4. Изменение коэффициента усиления при погрешностях определения α .

Кривые соответствуют погрешностям:
 кривая 1 – $\Delta\alpha=0$, кривая 2 – $+\Delta\alpha$, кривая 3 – $-\Delta\alpha$

Зависимость КУ от величины погрешности коэффициента фазы β , показана на рис. 5. Увеличение погрешности определения β до 30% уменьшает величину КУ, причем максимальное снижение КУ не превышает 15%.

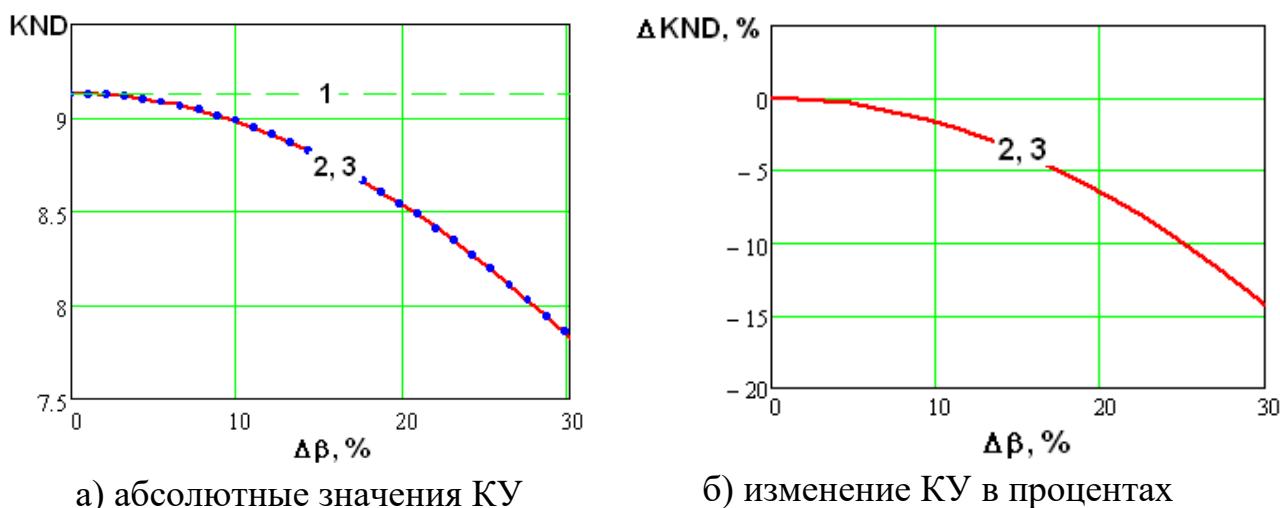


Рис. 5. Изменение коэффициента усиления при погрешностях определения β .

Кривые соответствуют значениям:
 кривая 1 – $\Delta\beta=0$, кривая 2 – $+\Delta\beta$, кривая 3 – $-\Delta\beta$

Заключение

Полученные результаты показывают, что погрешности определения параметров диссипативных сред несколько снижают эффективность формирования сфокусированного поля, однако не ставят под сомнение сам принцип фокусировки. В работе приводятся количественные оценки, позволяющие оценить снижение степени концентрации электромагнитного поля вблизи точки фокусировки.

Литература

1. Седельников Ю.Е., Тестоедов Н.А., Веденькин Д.А., Данилов И.Ю., Потапова О.В., Романов А.Г., Фадеева Л.Ю., Чони Ю.И. *Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля*. Красноярск, Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2015. 322 с.
2. Кубланов В.С., Потапова О.В., Седельников Ю.Е., Сысков А.М. Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2012. №4.

3. Халикова К.Н. *Антенны, сфокусированные в области ближнего излученного поля для задач микроволновых технологий*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева. Казань. 2017. 166 с.
4. Седельников Ю.Е., Кубланов В.С., Потапова О.В. Сфокусированные антенны аппликаторы в задачах диагностической радиотермометрии. *Журнал радиоэлектроники*. 2018. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.7.4>
5. Потапова О.В., Голикова К.Н. Оценка эффективности использования сфокусированных методов в процессах микроволновой обработки зерновых культур. *Инженерный вестник Дона*. 2019. №8.
6. Gabriel C., Gabriel S. and Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Journal of Phys. Med. Biol.* 1996. №41. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/001>
7. Gabriel S. Law R.W. and Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. *Journal of Phys. Med. Biol.* 1996. №41. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/002>
8. Халикова К.Н., Потапова О.В. Энергетические показатели сфокусированных антенн в задачах СВЧ-технологий. *Вопросы электротехнологии*. 2016. №2(11). С.37-45.
9. Sedelnikov Yu.E., Potapova O.V., Nikishina D.V. Study of perturbing factors effect on the performance data of antennas focused in the near-field zone for microwave application problems. *Proceedings of XI-th International Conference on Antenna Theory and Techniques*. 2017. P.236-238.
10. Седельников Ю.Е., Никишина Д.В., Потапова О.В., Халикова К.Н. Оценка влияния возмущающих факторов на эффективность фокусировки электромагнитного поля в задачах СВЧ технологий. *Вопросы электротехнологий*. 2016. №4(13). С.46-53.

Для цитирования:

Седельников Ю.Е., Потапова О.В. Исследование эффективности формирования сфокусированного излучения при погрешностях определения параметров сред. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.11>