



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.10>

УДК: 621.396.67

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОГРЕШНОСТЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ФОКУСИРУЮЩЕГО ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

О.В. Потапова, Ю.Е. Седельников

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

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.

**Аннотация.** В работе исследуется влияние погрешностей реализации фазовых распределений излучающих токов на эффективность формирования сфокусированного поля в микроволновых технологиях. Получены количественные оценки, позволяющие оценить снижение КНД и степень дефокусировки электромагнитного поля в зависимости от величины СКО и глубины расположения точки фокусировки в свободном пространстве и в диссипативных средах.

**Ключевые слова:** сфокусированное электромагнитное поле, точка фокусировки, погрешность фазового распределения, коэффициент направленного действия, коэффициент дефокусировки.

**Автор для переписки:** Потапова Ольга Владимировна, [potapova\\_olga@bk.ru](mailto:potapova_olga@bk.ru)

## Введение

Реальные антенны, по существу являются, излучающими системами со случайными источниками [1, 2]. Случайными могут быть амплитуда, фаза, поляризация источников, их пространственное положение и т.д. Конкретный механизм, определяющий флуктуацию источников, может быть различным: он может порождаться неточностью изготовления элементов антенны, нестабильностью параметров элементов, различными деформациями и т.д. Для приемных антенн флуктуации также могут быть обусловлены шероховатостью подстилающей поверхности, многолучевым механизмом распространения волны, неоднородностью среды.

Наличие случайностей в антенне ухудшает ее характеристики, ограничивает их предельно достижимые значения. Статистическая теория антенн (СТА) позволяет исследовать в полном объеме свойства реальных антенн, оценить влияние случайностей на характеристики электромагнитных полей, формируемых антеннами, определяет пути ослабления влияния случайностей.

Однако, до настоящего времени практически не проводилось исследований, посвященных оценке влияния погрешностей реализации амплитудно-фазовых распределений излучающих токов на эффективность формирования сфокусированного поля в микроволновых технологиях. Кроме этого, при целенаправленном СВЧ или КВЧ воздействии на биологические объекты, а также в задачах радиоволновой диагностики, электромагнитные поля создаются в зоне ближнего излученного поля [3]. В ряде работ [4-9] показана перспективность использования в этих применениях принципа фокусировки.

Принципиальным отличием исследований, проведенных в представленной работе, от классической СТА, является тот факт, что анализ электромагнитных полей проводился на расстояниях, соизмеримых с размерами излучающей системы. Кроме того, большая часть результатов была получена для сред, имеющих выраженные диссипативные свойства [10-12].

Целью данной работы являлась оценка допустимых погрешностей в реализации фазового распределения (ФР), позволяющих сохранить

положительные эффекты при использовании сфокусированных антенн. Кроме того, предпринималась попытка получения основных закономерностей влияния погрешностей ФР на параметры сфокусированного поля.

## 1. Теоретические положения.

В последнее время обозначился интерес к антеннам, работающим в режиме приема или передачи на расстояниях до точки наблюдения или источника излучения, соизмеримых с физическими размерами антенны. При этом часто возникает необходимость в возбуждении электромагнитных полей максимальной возможной интенсивности в некоторой точке (или наиболее эффективного приема из этой точки), в областях, соответствующих зоне ближнего излученного поля (ЗБИП) [6-9].

Под зоной ближнего излученного поля будем понимать (согласно [6]) область пространства, простирающуюся между условной границей ближней зоны (зоной индукции) до расстояний порядка нескольких геометрических размеров апертуры. Свойства электромагнитного поля в ЗБИП существенно отличаются как от дальней зоны, так и от зоны Френеля.

Для формирования максимума интенсивности поля на расстояниях, соизмеримых с геометрическими размерами антенны, в антенне вводится дополнительное квадратичное фазовое распределение вида (1), компенсирующее фазовую ошибку, обусловленную конечностью расстояния до точки максимума.

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

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

Поля всех излучателей будут складываться в точке  $(x_0, y_0, z_0)$  синфазно и, в некоторой области вблизи этой точки, распределение поля будет таким же, как и у синфазной антенны в дальней зоне. Эта точка называется точкой фокусировки, а подобные антенны – сфокусированными.

Существует ряд параллелей между направленными свойствами антенн в дальней зоне и пространственными распределениями сфокусированных электромагнитных полей в зоне ближнего излученного поля:

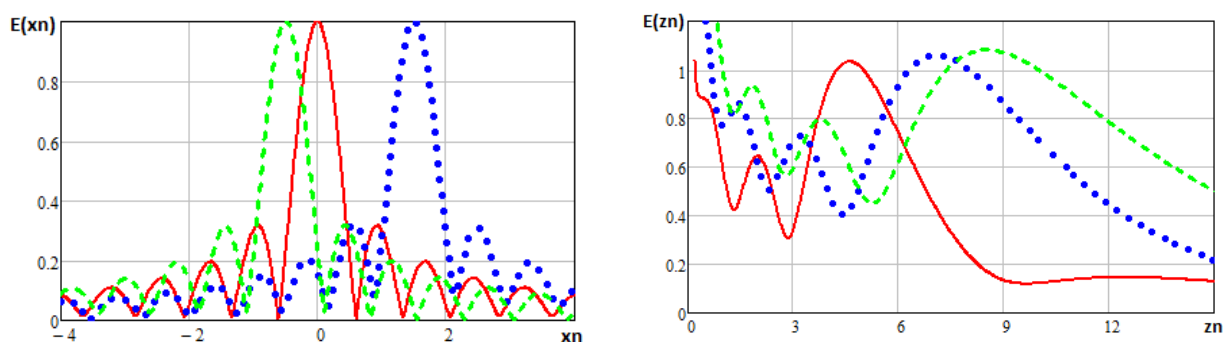
- концентрация напряженности поля в точке фокусировки достигается сложением полей, излученных элементами апертуры;
- присутствует связь значений напряженности поля в окрестности точки фокуса с функцией апертурного распределения излучающих токов;
- в [6] вводится показатель, аналогичный коэффициенту направленного действия антенны в дальней зоне:

$$D_{\text{фок}}(x_0, y_0, z_0) = \frac{|\dot{\vec{E}}(x_0, y_0, z_0)|^2}{|\dot{\vec{E}}_{\text{ненапр}}(z_0)|^2}, \quad (2)$$

где  $\dot{\vec{E}}(x_0, y_0, z_0)$  – напряженность электрического поля в точке фокусировки,  $\dot{\vec{E}}_{\text{ненапр}}(z_0)$  – напряженность поля в точке фокусировки, создаваемая ненаправленным излучателем.

Однако в ЗБИП существует и ряд отличий от распределения поля в дальней зоне.

Одним из них является возможность трехмерного перемещения точки фокусировки в пространстве в ЗБИП (рис. 1).



а) смещение в поперечном направлении

б) смещение в продольном направлении

Рис. 1. Смещение точки фокусировки в ЗБИП.

Кроме того, присутствует ряд существенных отличий зависимости величин КНД в ЗБИП от геометрических соотношений и апертурных параметров

излучающих токов [6, 7, 9]. К подобным отличиям можно отнести наличие оптимального размера излучателя, зависящего от места расположения точки фокусировки, при котором достигается максимальное значение КНД. Также необходимо упомянуть о существовании оптимального амплитудного распределения, при котором достигается максимально возможное значение КНД при фиксированном расположении точки фокусировки.

Исследования, проведенные в [6], показали, что, хотя характеристики сфокусированного в ЗБИП поля зависят от амплитудного распределения возбуждающих токов, однако существенно изменить их за счет амплитудного распределения не получается. В отличие от случая дальней зоны, в ЗБИП выбором формы амплитудного распределения невозможно обеспечить уровень боковых лепестков меньший -10...-12 дБ. Даже использование оптимального амплитудного распределения несущественно изменяет размер области фокусировки (РОФ) и уровень боковых лепестков.

Приведенные факты подтверждают существенные отличия параметров сфокусированного в ЗБИП электромагнитного поля от поля в дальней зоне и в зоне Френеля. В связи с этим, были проведены исследования, определяющие характеристики сфокусированного в ЗБИП электромагнитного поля при наличии погрешностей практической реализации фазового распределения (ФР) излучающих токов. Погрешности реализации амплитудного распределения в процессе выполнения работы не рассматривались.

## **2. Проведенные исследования.**

Прямые внешние задачи классической СТА имеют своей целью оценить влияние случайных ошибок в амплитудно-фазовом распределении источников на характеристики антенн в дальней зоне и зоне Френеля. Целью проведенных в работе исследований являлось определение зависимостей, аналогичных классической СТА, для ЗБИП и сред, имеющих поглощающие свойства.

В известных работах по СТА [1, 2] результаты получены и представлены аналитическом виде. В ЗБИП наиболее целесообразно прибегнуть к прямому

статистическому моделированию значений  $\bar{E}(x, z)$ , используя разумные модели отклонения параметров ФР токов и характеристики реальных поглощающих сред.

В качестве излучающей системы в работе рассматривалась линейная антенная решетка длиной  $10\lambda$  с шагом  $d = \lambda/2$ , расположенная на границе воздух – поглощающая среда и излучающая в среду (рис. 2).

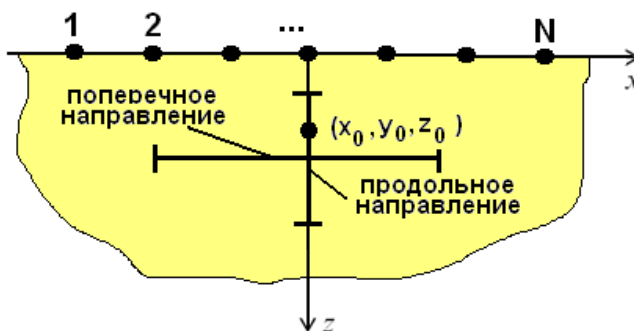


Рис. 2. Геометрия задачи.

Амплитудное распределение выбиралось детерминированным, равномерным. Фазовое распределение  $\varphi(x)$  имело случайный характер и представлялось нормальной однородной случайной функцией, со средним значением:

$$\overline{\varphi(x)} = \beta \sqrt{(x - x_0)^2 + z_0^2} \quad (3)$$

и среднеквадратическим отклонением (СКО). Значение СКО, очевидно, будет зависеть от способов практической реализации ФР, и в работе варьировалась.

Фокусирующее фазовое распределение очевидным образом зависит от расположения точки фокусировки. Кроме того, при фиксации точки фокусировки, значения фаз токов в излучателях также различаются. Поэтому при определении случайной функции  $\varphi(x)$  авторам представлялось некорректным использовать фиксированную величину СКО, как в [3, 13, 14], для задания фазы во всех излучателях. С физической точки зрения, величина СКО должна определяться погрешностью практической реализации фазового распределения, поэтому величина СКО в работе определялась в долях от исходного фазового распределения и была разной для каждого излучателя:

$$\sigma(x) = \sigma_0 \cdot \overline{\varphi(x)}. \quad (4)$$

В исследованиях фиксировалась доля  $\sigma_0$ , определяющая СКО случайного ФР, которая отражала точность реализации ФР.

Фиксированная величина СКО (рис. 3а) приводит к тому, что фазовое распределения в центральных излучателях решетки будет существенно отличаться от верного (фокусирующего), а, следовательно, вклад этих элементов в формирование случайного распределения поля будет больше, чем у крайних излучателей. Помимо этого, изменение глубины точки фокусировки ведет к изменению фокусирующего ФР, а следовательно, изменению «относительного веса» фиксированного значения СКО – «относительная погрешность» реализации ФР будет уменьшаться по мере удаления точки фокусировки.

Случайное фазовое распределение с переменным СКО (рис. 3б) точнее отражает возможности практической реализации сфокусированного поля, не изменяет «веса» элементов решетки и устраняет влияние фактора перемещения точки фокусировки.

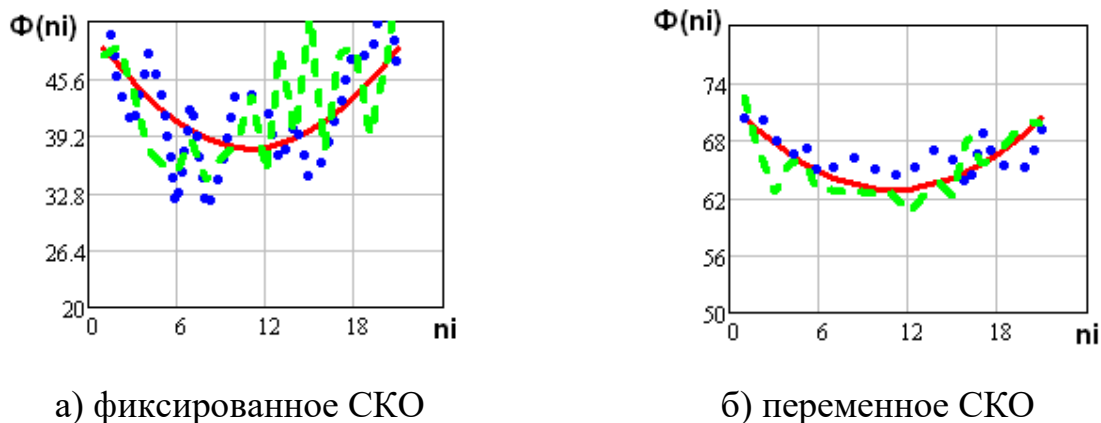


Рис. 3. Случайные ФР с различными вариантами задания СКО.

Случайные реализации распределения напряженности электромагнитного поля в среде рассчитывались в программе MathCad по известной формуле [6]:

$$\dot{E}(x, z) = \sum_i g_i(x', x, z) \cdot j_l(x') \cdot \frac{\exp(-\gamma R_i(x', x, z))}{R_i(x', x, z)}, \quad (5)$$

где  $(x')$  – координата излучателя в апертуре,  $j_l(x')$  – амплитудно-фазовое распределение токов в антенной решетке,  $g_i(x', x, z)$  – значение напряженности

электрического поля, создаваемого  $i$ -ым элементарным источником в точке наблюдения  $(x, z)$ ,  $R_i(x', x, z)$  – расстояние от  $i$ -го излучателя до точки наблюдения,  $\gamma = \alpha + j\beta$  – коэффициент распространения в диссипативной среде.

Далее для определения характеристик антенн вычислялись усредненные распределения интенсивности ЭМП:

$$Psr(x, z) = \overline{|\dot{E}(x, z)|^2} \quad (6)$$

в направлениях, параллельном излучателю (поперечное направление) и перпендикулярном излучателю (продольное направление) (см. рис. 2). Также по усредненным значениям напряженности электрического поля определялись средние значения КНД:

$$\bar{D}(x_0, z_0) = \frac{\overline{|\dot{E}(x_0, z_0)|^2}}{|\dot{E}_{\text{ненапр}}(x_0, z_0)|^2}, \quad (7)$$

где  $\overline{|\dot{E}(x_0, z_0)|^2}$  – усредненное значение интенсивности ЭМП в точке фокусировки,  $|\dot{E}_{\text{ненапр}}(x_0, z_0)|^2$  – напряженность поля в точке фокусировки, создаваемая ненаправленным излучателем.

Для оценки изменения параметров сфокусированного поля при погрешностях ФР, аналогично [1], в работе определялись относительное снижение КНД и коэффициент дефокусировки.

Снижение КНД  $\Delta$  имеет четкий смысл:

$$\Delta_{\text{фок}} = \frac{D_0 - \bar{D}}{D_0}, \quad (8)$$

где  $D_0$  – КНД при отсутствии ошибок.

Коэффициент дефокусировки  $\upsilon$ , показывает, во сколько раз случайные фазовые ошибки уменьшают интенсивность поля в точке фокусировки по сравнению с интенсивностью поля, сфокусированного в эту же точку без ошибок:



$$u_{\text{фок}} = \frac{|\dot{E}(x_0, z_0, )|^2}{|\dot{E}(x_0, z_0, )|^2} \quad (9)$$

Чтобы оценить степень деградации сфокусированного поля при наличии ошибок ФР, в работе также определялись снижение КНД и коэффициент дефокусировки для случая синфазного возбуждения излучателей:

$$\Delta_{\text{син}} = \frac{D_0 - D_{\text{син}}}{D_0}, \quad (10)$$

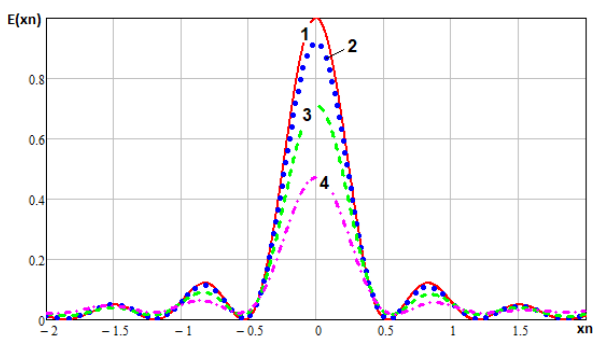
$$u_{\text{син}} = \frac{|\dot{E}(x_0, z_0, )|^2}{|\dot{E}_{\text{син}}(x_0, z_0, )|^2} \quad (11)$$

### 3. Полученные результаты.

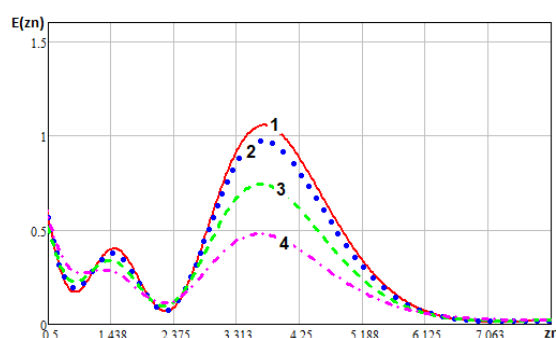
Исследования проводились для 2-х сред: свободного пространства и материала, имеющего существенную величину коэффициента затухания, в качестве которого был выбран суглинок влажный ( $\alpha = 0,91$  1/м,  $\beta = 9,2$  1/м) [10]. Распределения интенсивности ЭМП в поперечном и продольном направлениях для свободного пространства показаны на рис. 4. Кривые 1 соответствуют сфокусированному возбуждению, кривые 2 – фазовому распределению с погрешностями реализации при  $\sigma_0 = 0,01$ ; у кривых 3 величина  $\sigma_0 = 0,02$ ; у кривых 4 –  $\sigma_0 = 0,03$ . Аналогичные распределения поля для поглощающего материала представлены на рис. 5.

#### 1) Изменение распределений интенсивности ЭМП

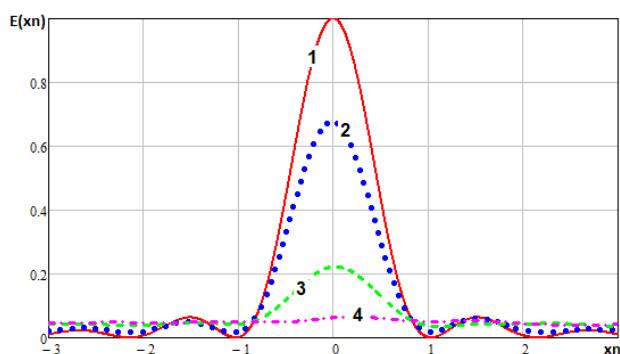
На рис. 4 и 5 представлены распределения интенсивности ЭМП при разной глубине расположения точки фокусировки. Из представленных результатов следует, что помимо величины СКО при случайном ФР на параметры сфокусированного поля существенно влияет глубина точки фокусировки. Если для случаев  $z_0 = 4\lambda$ , значение  $\sigma_0 = 0,03$  вызывает однозначное снижение концентрации ЭМП вблизи точки фокусировки, но сфокусированный характер ЭМП не вызывает сомнений. В случае  $z_0 = 10\lambda$  происходит полная деградация сфокусированного поля в обоих направлениях.



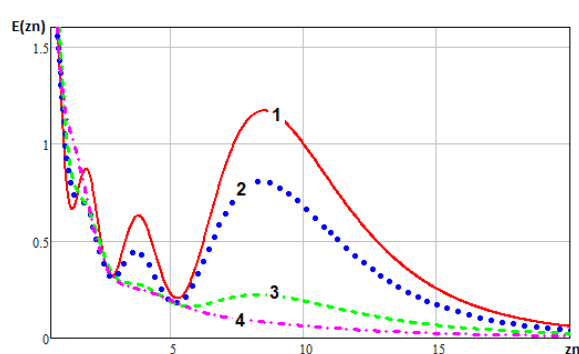
а) поперечное направление  
точка фокусировки  $(0, 4\lambda)$



б) продольное направление  
точка фокусировки  $(0, 4\lambda)$



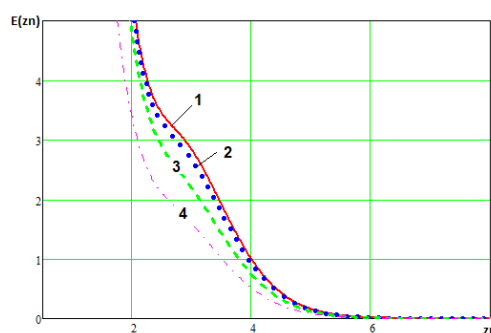
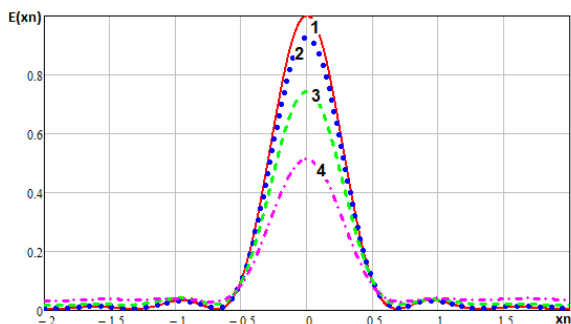
в) поперечное направление  
точка фокусировки  $(0, 10\lambda)$



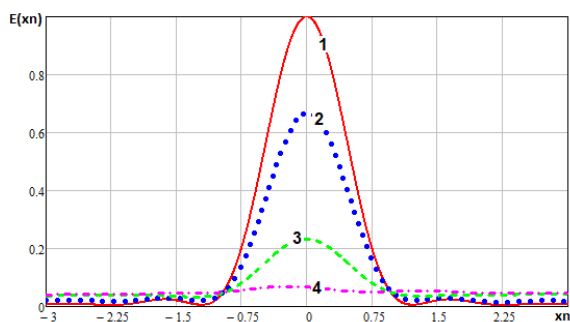
г) продольное направление  
точка фокусировки  $(0, 10\lambda)$

Рис. 4. Распределение интенсивности ЭМП в свободном пространстве.

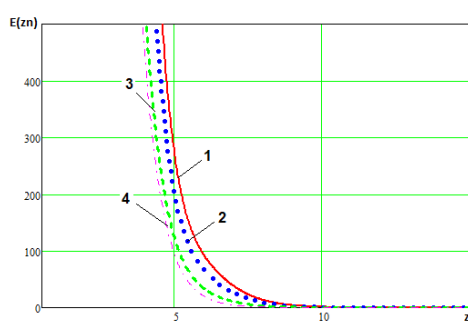
Из представленных рисунков следует, что наличие погрешностей в ФР снижает степень концентрации интенсивности ЭМП в точке фокусировки и увеличивают уровень бокового излучения. Это особенно видно, если в распределениях интенсивности поля проводить нормировку не к значению интенсивности ЭМП в точке фокусировки при верном ФР, а к значению интенсивности ЭМП в точке фокусировки при случайном ФР, как это сделано на рис. 6. Рис. 6 а – г отличаются от рис. 4 а, в и рис. 5 а, в, соответственно, только нормирующим значением.



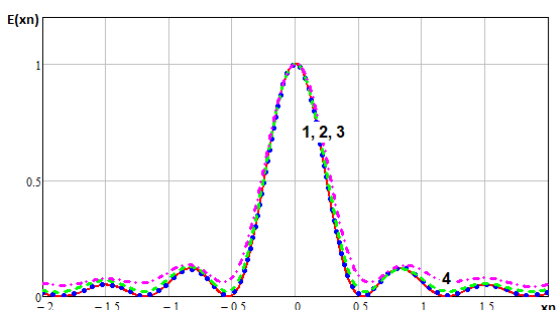
а) поперечное направление  
точка фокусировки  $(0, 4\lambda)$



б) продольное направление  
точка фокусировки  $(0, 4\lambda)$



в) поперечное направление  
точка фокусировки  $(0, 10\lambda)$



г) продольное направление  
точка фокусировки  $(0, 10\lambda)$

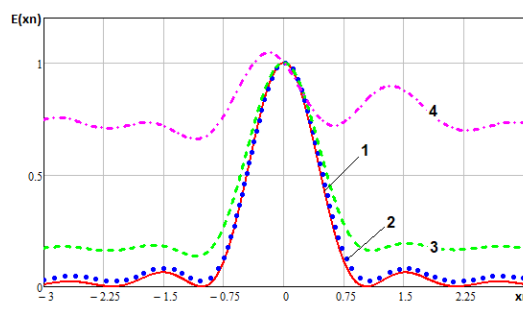
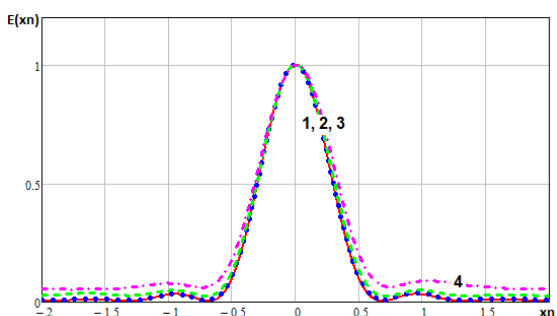
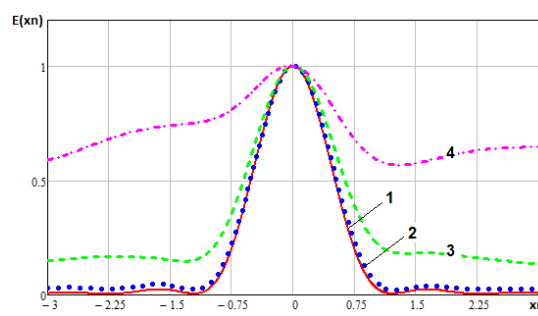


Рис. 5. Распределение интенсивности ЭМП в суглинке влажном

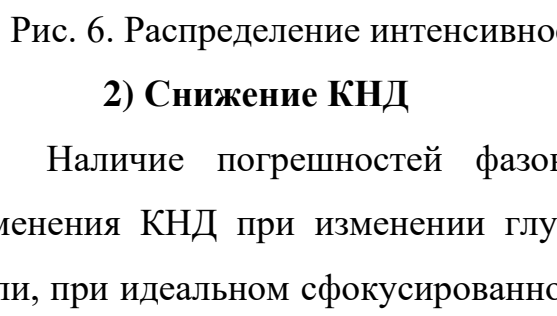
а) свободное пространство  
точка фокусировки  $(0, 4\lambda)$



б) свободное пространство  
точка фокусировки  $(0, 10\lambda)$



в) суглинок влажный  
точка фокусировки  $(0, 4\lambda)$



г) суглинок влажный  
точка фокусировки  $(0, 10\lambda)$

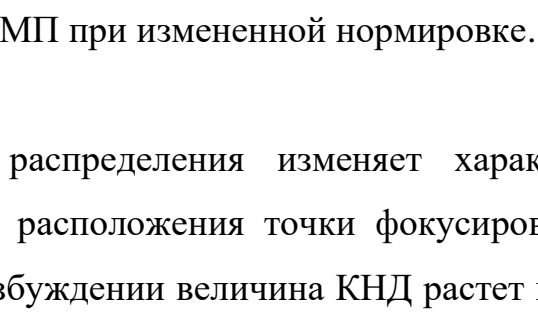


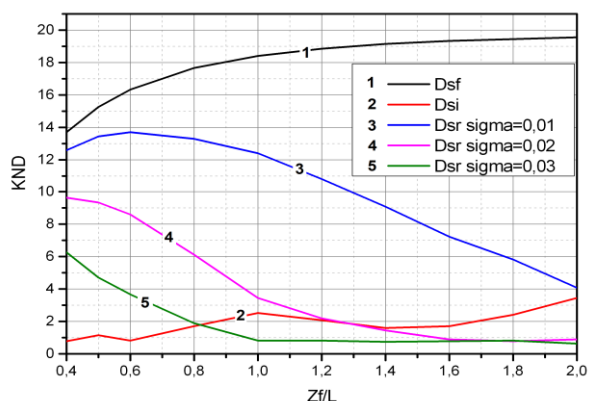
Рис. 6. Распределение интенсивности ЭМП при измененной нормировке.

## 2) Снижение КНД

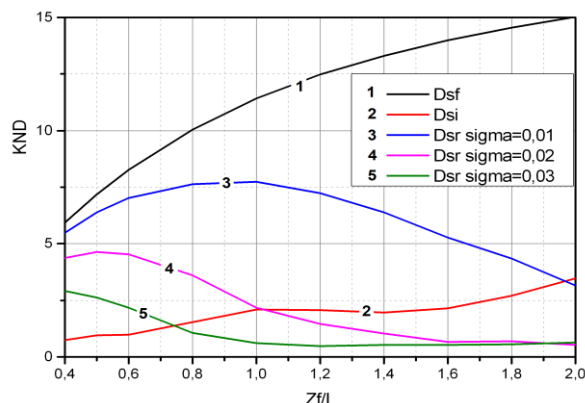
Наличие погрешностей фазового распределения изменяет характер изменения КНД при изменении глубины расположения точки фокусировки. Если, при идеальном сфокусированном возбуждении величина КНД растет при увеличении глубины точки фокусировки, как и указано в [6, 7], то при ошибках

ФР начиная с некоторой глубины происходит снижение величины КНД (рис. 7а, 7б).

Необходимо отметить, что существенное снижение КНД происходит уже при небольшой глубине точки фокусировки, причем, чем больше значение СКО, тем при меньшей глубине начинается деградация фокусирующих свойств. Указанная закономерность незначительно зависит от коэффициента затухания среды.



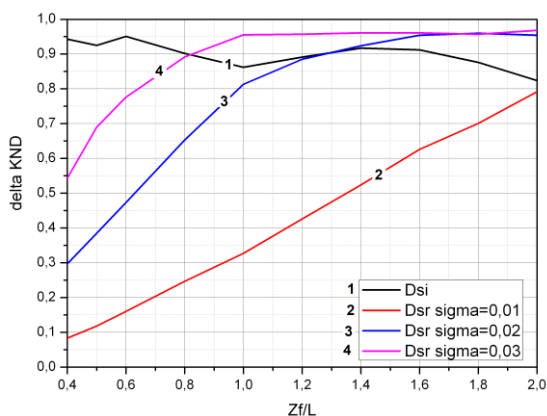
а) свободное пространство



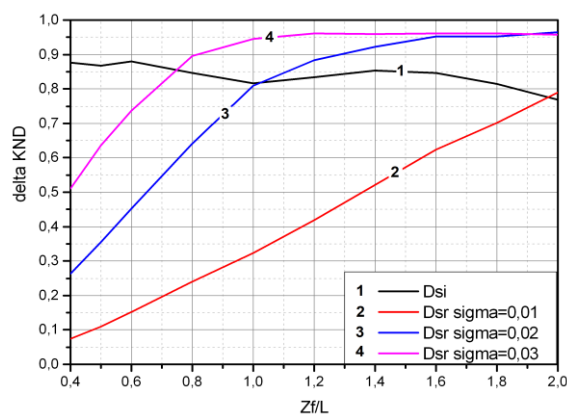
б) суглинок влажный

Рис. 7. Зависимость КНД от глубины расположения точки фокусировки.

На рис. 8 показаны зависимости снижения КНД от относительной глубины расположения точки фокусировки. Для сравнения, на этих же рисунках показаны кривые, характеризующие снижение КНД при синфазном возбуждении в исследуемых средах (кривая 1). Глубину, на которой происходит полная утрата фокусирующих свойств, очевидно, можно определить по точкам пересечения кривых для случайных ФР с кривой, полученной при синфазном ФР.



а) свободное пространство



б) суглинок влажный

Рис. 8. Зависимость снижения КНД от глубины расположения точки фокусировки.

На рис. 9 представлено сравнение получившихся зависимостей снижения КНД для исследуемых сред. Очевидно, что наиболее существенными факторами, определяющими снижение КНД, являются параметр  $\sigma_0$  ( $\sigma_0 = 0,01; 0,02; 0,03$ ) и относительная глубина точки фокусировки. Полученные зависимости остаются сходными при исследуемых значениях коэффициента затухания среды.

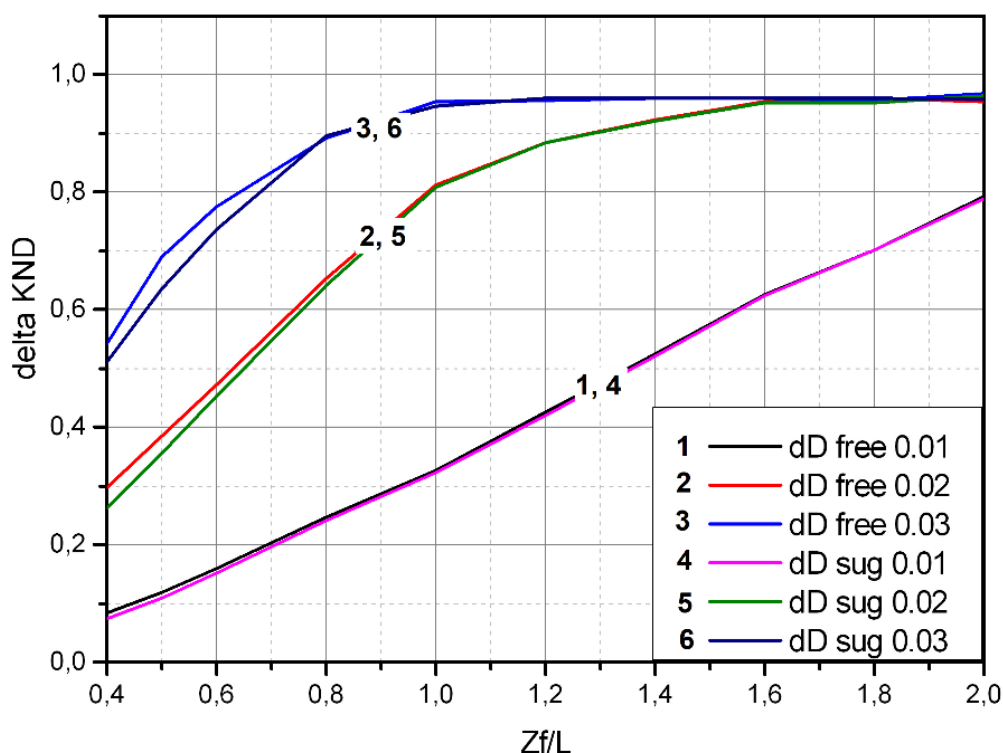
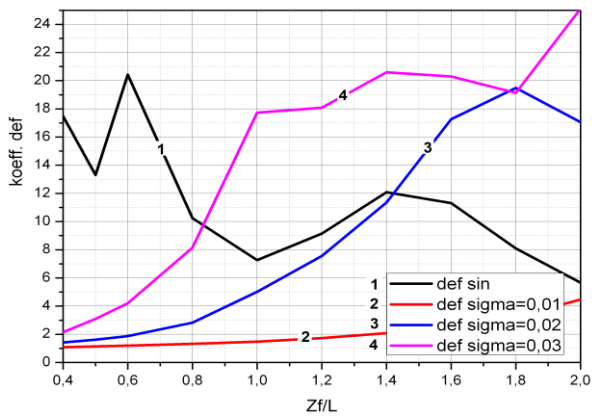


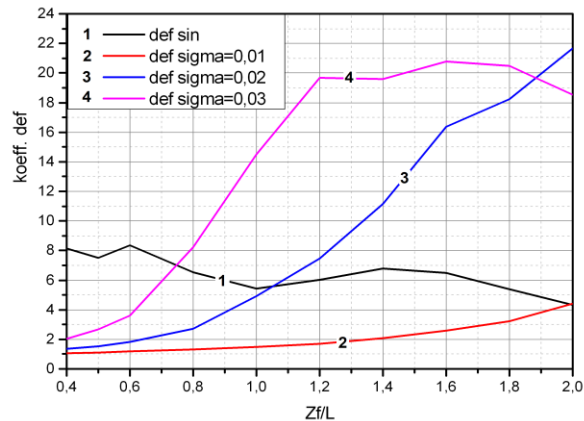
Рис. 9. Сравнение зависимостей снижения КНД от глубины расположения точки фокусировки.

### 3) Коэффициент дефокусировки.

Полученные выводы подтверждаются рассчитанными зависимостями для коэффициентов дефокусировки. На рис. 10а и 10б показаны графики зависимостей коэффициентов дефокусировки от глубины расположения точки фокусировки для исследуемых сред. На рис. 11 проведено сравнение коэффициентов дефокусировки для свободного пространства и суглинка влажного.



а) свободное пространство



б) суглинок влажный

Рис. 10. Зависимость коэффициента дефокусировки от глубины расположения точки фокусировки.

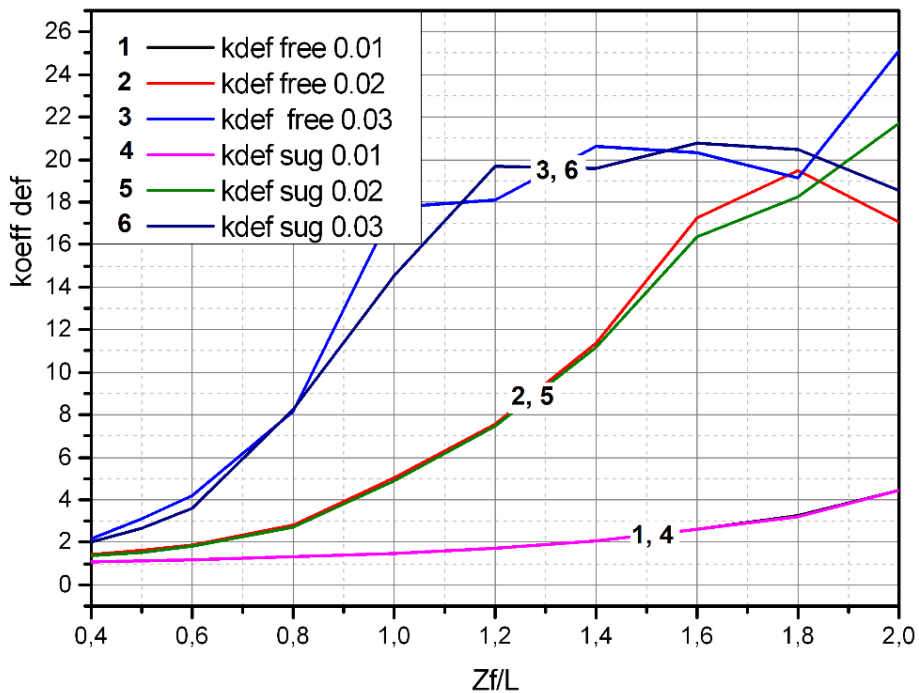


Рис. 11. Сравнение зависимостей коэффициентов дефокусировки от глубины расположения точки фокусировки.

## Заключение

Полученные результаты показывают, что погрешности реализации фокусирующего ФР, в отличие от погрешностей определения параметров сред [14], существенно влияют на эффективность формирования сфокусированного поля. Даже небольшие величины относительных погрешностей ФР (порядка единиц процентов) способны изменить характер сфокусированного поля вплоть до полной деградации сфокусированных свойств.

При любых значениях СКО максимум КНД достигается на определенной глубине, зависящей от величины СКО и от коэффициента затухания среды. При больших СКО увеличение глубины точки фокусировки приводит к монотонному снижению КНД. Величина затухания среды практически не влияет на величину снижения КНД. Для каждого значения СКО существует такая глубина фокусировки, при которой происходит полная деградация фокусирующих свойств.

Коэффициент дефокусировки увеличивается при увеличении глубины расположения точки фокусировки. Величина затухания среды практически незначительно влияет на величину коэффициента дефокусировки.

## Литература

1. Бахрах Л. Д., Бенинсон Л. С., Зелкин Е. Г. Справочник по антенной технике: Справ. в 5 т. Т. 1. – 1997.
2. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. – Сов. радио, 1970.
3. Седельников Ю. Е. и др. Оценка влияния возмущающих факторов на эффективность фокусировки электромагнитного поля в задачах СВЧ технологий //Вопросы электротехнологии. – 2016. – №. 4. – С. 46-53.
4. Морозов Г. А., Седельников Ю. Е. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) //М.: Радиотехника. – 2003.

5. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник //Саратов: Научная книга. – 2011. – Т. 560. – С. 15.
6. Седельников Ю. Е. и др. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля //Основы теории и технические приложения/Под общей редакцией ЮЕ Седельникова и НА Тестоедова. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, Красноярск. – 2015.
7. Халикова К. Н. Антенны, сфокусированные в области ближнего излученного поля для задач микроволновых технологий : дис. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. КНИТУ-КАИ им. АН Туполева. Казань, 2017.
8. Седельников Ю. Е., Кубланов В. С., Потапова О. В. Сфокусированные антенны-апликаторы в задачах диагностической радиотермометрии //Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 7. – С. 7-7.
9. Потапова О. В., Голикова К. Н. Оценка эффективности использования сфокусированных методов в процессах микроволновой обработки зерновых культур //Инженерный вестник Дона. – 2019. – №. 8.
10. Финкельштейн М. И. и др. Подповерхностная радиолокация //М.: Радио и связь. – 1994. – Т. 44.
11. Gabriel C., Gabriel S., Corthout Y. E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey //Physics in medicine & biology. – 1996. – Т. 41. – №. 11. – С. 2231.
12. Gabriel S., Lau R. W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz //Physics in medicine & biology. – 1996. – Т. 41. – №. 11. – С. 2251.
13. Маслов О. Н., Раков А. С. Комплексное моделирование статистических характеристик поля апертурной случайной антенны //Антенны. – 2015. – №. 1. – С. 41-49.



14. Sedelnikov Y. 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 //2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). – IEEE, 2017. – С. 236-238.
15. Седельников Ю. Е., Потапова О. В. Исследование эффективности формирования сфокусированного излучения при погрешностях определения параметров сред //Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 11.

**Для цитирования:**

Потапова О.В., Седельников Ю.Е. Исследование характеристик электромагнитного поля при погрешностях реализации фокусирующего фазового распределения. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.10>