

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ АНТЕННЫ, СФОКУСИРОВАННЫЕ В ЗОНЕ БЛИЖНЕГО ИЗЛУЧЕННОГО ПОЛЯ

Д.А. Веденькин

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

Аннотация. В работе обсуждаются широкополосные линейные дискретные антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Показано, что при учете свойств сфокусированных электромагнитных полей необходимо учитывать способы использования энергии сфокусированного электромагнитного поля в различных режимах функционирования. Показано, что для различных режимов функции пространственного распределения сфокусированных электромагнитных полей различны. Предложены основные свойства сфокусированных в зоне ближнего излученного поля электромагнитных полей и даны их количественные оценки для различных режимов применения.

Ключевые слова: фокусировка электромагнитного поля; зона ближнего излученного поля; широкополосное электромагнитное поле; сфокусированная дискретная антенна.

Введение

Сфокусированные антенные системы находят широкое применение в различных задачах, начиная от задач нагрева материалов в микроволновых технологиях и заканчивая задачами радиосвязи с удаленными объектами. Обзор существующих работ, посвященных сфокусированным в зоне ближнего излученного поля электромагнитным колебаниям, например, [1-5] показывают, что в основном объеме работ рассматриваются процессы фокусировки монохроматического электромагнитного поля и для них же вводятся и оцениваются основные свойства. При этом использование широкополосных фокусируемых электромагнитных полей формирует еще одну степень свободы при решении практических задач. Таким образом, исследование основных свойств, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля широкополосных электромагнитных полей, является актуальной задачей.

Особенности оценки свойств широкополосных антенн

Под широкополосными (диапазонными) принято понимать антенны, предназначенные для работы в относительных полосах частот $\Delta f / f_0$, составляющих величину порядка нескольких десятков процентов. В этих случаях, как правило, антенны используются в составе радиосредств с относительно узкополосными сигналами и должны обеспечивать их излучение и прием при перестройках несущей частоты в пределах требуемого диапазона частот. Изменения в поведении антенн в пределах полосы частот Δf в этом случае также незначительны и не учитываются при оценках направленных свойств, рассматриваемых также как при монохроматическом сигнале. Обеспечение требуемой широкополосности антенн в таком случае понимается, главным образом, как обеспечение согласования в пределах заданного частотного диапазона. При излучении и приеме электромагнитных полей, занимающих весь широкополосный спектр используемых частот приходится считаться с частотными зависимостями диаграммы направленности антенны, характеристики согласования и параметров фидерных трактов.

Категорию сверхширокополосных антенн составляют две принципиально различные группы. Первая из них представлена антеннами, сохраняющими постоянство характеристик направленности и согласования в широкой полосе частот. Фундаментальные принципы обеспечения частотной независимости характеристик таких антенн, установленные еще в 50-е годы прошлого века, хорошо известны [6]. В большинстве практических применений такие сверхширокополосные антенны также используются в составе радиосредств, осуществляющих передачу или прием радиосигналов с невысокими или умеренными значениями относительной ширины спектра, но с возможностями изменения его центральной частоты в широких пределах. Вторую группу составляют антенны для сверхширокополосных радиосредств, принципиальной особенностью которых является высокое значение абсолютно ширины спектра радиосигнала, составляющей для них значение порядка 0,5 ГГц и более. Такие радиосигналы могут создаваться с несущими частотами, соответствующими сантиметровому или миллиметровому диапазонам волн. Тогда антенны, обеспечивающие излучение и (или) прием, могут быть оказаться в классе относительно узкополосных. В тех случаях, когда несущие частоты сдвинуты в более низкочастотную область, антенны должны обеспечивать работу с радиосигналами, относительная ширина полосы частот которых порядка единицы и более. Антенны, используемые в таких радиосредствах, обладают рядом существенных отличий от традиционных.

Основным принципиальным отличием свойств антенн в составе широкополосных и сверхширокополосных радиосредств является следующее. Любой антенне свойственно наличие частотных изменений характеристик излучения и приема. Для относительно узкополосных радиоустройств этими изменениями в полосе частот, соответствующих спектру радиосигнала, можно пренебречь. По этой причине такие показатели как диаграмма направленности антенны, коэффициент направленного действия и др. считаются постоянными в полосе частот сигнала и, соответственно, вводятся для монохроматического сигнала. Для антенн широкополосных и сверхширокополосных радиоустройств эти изменения могут быть столь значительными, что пренебрегать ими невозможно и приходится изначально считаться с наличием заметной частотной зависимости характеристик направленности $F(\theta, \varphi, f)$ так и пространственных распределений поля излучения в зоне ближнего излученного поля $E(x, y, z, f)$. В этих условиях становится невозможным определить направленные свойства антенны в отрыве не только от спектрального состава излучаемого радиосигнала, но и от способа его «использования» в точке наблюдения. Поэтому само определение пространственного распределения электромагнитного поля для случая несинусоидального (широкополосного) сигнала, как и диаграммы направленности антенны в составе широкополосных и сверхширокополосных радиоустройств становится неоднозначным.

Электромагнитное поле протяженного источника несинусоидальных колебаний

Пусть в точке пространства с координатами (x, y, z) гармонический источник излучения частотой f создает поле $E(x, y, z, f)$. При возбуждении широкополосным сигналом со спектром $G(f)$ поле в точке наблюдения можно представить как $E(x, y, z, f) \cdot G(f)$. Для того, чтобы представить эту величину, как функцию пространственных координат (x, y, z) необходимо предварительно определить каким именно образом значения $E(x, y, z, f) \cdot G(f)$ «используются» в каждом конкретном случае.

Рассмотрим случай работы в режиме передачи. Условная схема организации радиолинии со сфокусированной антенной, функционирующей в режиме передачи показана на рис. 1.

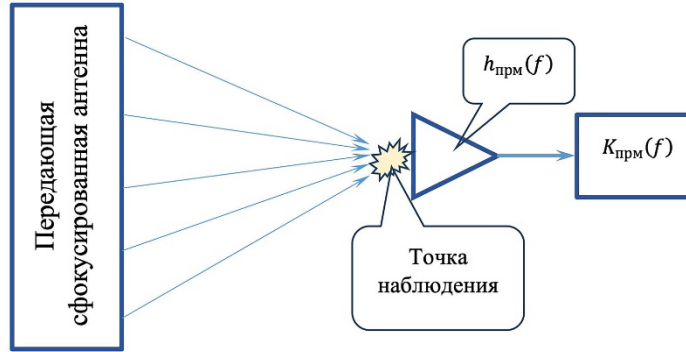


Рис. 1. Широкополосная сфокусированная антенна в режиме передачи

В режиме передачи возможны, по крайней мере, два характерных случая. Во-первых, речь может идти о величине соответствующей поглощенной мощности в точке (x, y, z)

$$P_{пол}(x, y, z) = \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} \sigma(x, y, z, f) |E(x, y, z, f)|^2 df.$$

Соответственно, для случая однородной среды показателем пространственного распределения широкополосной антенны в режиме передачи энергии может служить

$$|E_{ин}^{прд.эн}(x, y, z)|^2 = \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} |E(x, y, z, f)|^2 df, \quad (1)$$

где f_0 и Δf – средняя частота и полоса частот излучаемого сигнала соответственно. Данный случай назовем «режимом концентрации энергии».

Во-вторых, речь может идти о случае, когда в точке с координатами (x, y, z) расположено приемное устройство и, следовательно, характеристикой пространственного распределения является величина мощности «принимаемого» сигнала. Иллюстрирующая структурная схема приемной части приведена на рис. 2.

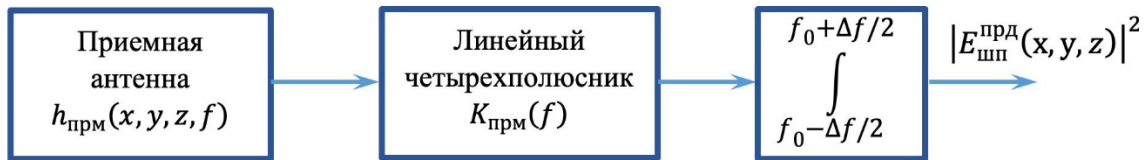


Рис. 2. Структурная схема приемной части

Тогда мощность «принимаемого» сигнала может быть выражена

$$|E_{ин}^{прд}(x, y, z)|^2 = \left| \int_{f_0 - \Delta f/2}^{f_0 + \Delta f/2} E(x, y, z, f) h_{прм}(x, y, z, f) G(f) K_{прм}(f) df \right|^2, \quad (2)$$

где $h_{прм}(x, y, z, f)$ – действующая высота приемной антенны заданной пространственной ориентации, $K_{прм}(f)$ – коэффициент передачи линейного четырехполюсника в составе приемного устройства. Данный случай назовем «режимом передачи сигнала».

Отличие пространственных распределений сфокусированного в зоне ближнего излученного поля широкополосного электромагнитного поля в формулах (1) и (2) очевидно. Хорошо просматривается и другой факт: направленные свойства антенны в режиме передачи в известной мере зависят от свойств приемного устройства.

Рассмотрим работу в режиме приема. Условная схема радиолинии со сфокусированной широкополосной антенной, функционирующей в режиме приема показана на рис. 3.

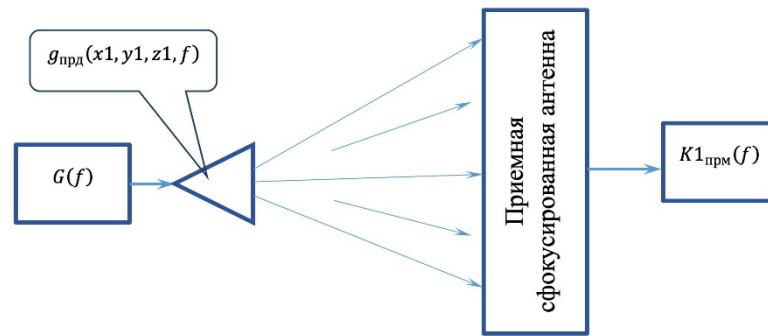


Рис. 3. ШП сфокусированная антенна в режиме приема

Пусть в точке передачи находится источник, которым в области нахождения приемной антенны создается поле, пропорциональное $g_{прд}(x1, y1, z1, f)$. Если прием осуществляется линейным приемником с частотной характеристикой $K1_{прм}(f)$, а рассматриваемой антенной в режиме передачи создавалось бы, в силу принципа взаимности, поле $E_{прд}(x1, y1, z1, f)$, то выходной сигнал с точностью до постоянной имеет вид

$$\left| E_{ин}^{прм}(x1, y1, z1) \right|^2 = \left| \int_{f_0 - \Delta f / 2}^{f_0 + \Delta f / 2} E_{прд}(x1, y1, z1, f) h_{прд}(x1, y1, z1, f) G(f) K1_{прм}(f) df \right|^2. \quad (3)$$

В общем случае значения $h_{прм}(x, y, z, f)$ и $g_{прд}(x1, y1, z1, f)$, а также $K_{прм}(f)$ и $K1_{прм}(f)$ не совпадают, что может трактоваться как неравенство функций, характеризующих пространственные распределения в режиме приема и передачи. Это обстоятельство ни коим образом не является нарушением принципа взаимности, а означает лишь различие в «использовании» частотных составляющих широкополосного сигнала.

В дальнейшем, при рассмотрении свойств сфокусированных в зоне ближнего излученного поля электромагнитных полей, для простоты, примем значения $h_{прм}(x, y, z, f)$ и $g_{прд}(x1, y1, z1, f)$, $K_{прм}(f)$ и $K1_{прм}(f)$ равными друг другу и не зависящими от частоты и пространственного положения.

Заметим, что в общем случае может оказаться нецелесообразно разделение на свойства сфокусированных широкополосных антенн в режиме приема и передачи, а можно переходить непосредственно к введению представления радиолинии содержащей передающую и приемную части, характеризуемые параметрами передающей антенны,

среды распространения и приемной части, содержащей приемную антенну и тракт обработки, характеризующиеся спектром передаваемого сигнала, частотной характеристикой среды и параметрами линейного приемника.

Приведем некоторые формулы и подходы к оценкам свойств, характеризующих функционирование широкополосных антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля. Коэффициент направленного действия, как интегральный показатель антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля с использованием широкополосных электромагнитных полей, вводится аналогично случаю фокусировки монохроматического излучения, как отношение значений характеристик $E_{ин}(x_0, y_0, z_0)$, рассчитанных в соответствии с (1)-(3) к соответствующему значению для излучения ненаправленного источника $E_{ин.из}(x_0, y_0, z_0)$ совпадающего спектрального состава, расположенного в точке апертуры, ближайшей к точке наблюдения. В точке фокуса (x_0, y_0, z_0) коэффициент направленного действия может быть определен как

$$КНД_{ин}(x_0, y_0, z_0) = \frac{|E_{ин}(x_0, y_0, z_0)|^2}{|E_{ин.из}(x_0, y_0, z_0)|^2}. \quad (4)$$

Размеры области фокусировки энергии для сфокусированного в зоне ближнего излученного поля широкополосного электромагнитного поля могут быть оценены по уровню 0,5 от значения энергии электромагнитного поля в точке фокусировки.

Ниже приводятся некоторые результаты моделирования линейных дискретных антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля в режиме концентрации энергии и режиме передачи сигнала с использованием широкополосных электромагнитных полей с непрерывными спектрами различной ширины.

Основные свойства линейных дискретных антенн, сфокусированных в режиме концентрации энергии

Рассмотрим модель широкополосной сфокусированной линейной дискретной антенны со следующими параметрами:

- центральная частота – $f_0 = 1500$ МГц;
 - количество излучателей – 16 шт.;
 - шаг излучателей – $d = 0,1$ м.;
 - длина дискретной антенны – 1.5 м.;
 - координаты точки фокусировки, м. – $(0, 0, 2)$;
 - ширина спектров моделируемых сигналов – 1000 МГц;
 - законы моделируемых спектров – равномерный, спадающий, нормальный, Релея;
- Спектры излучаемых широкополосных сигналов показаны на рис. 4.

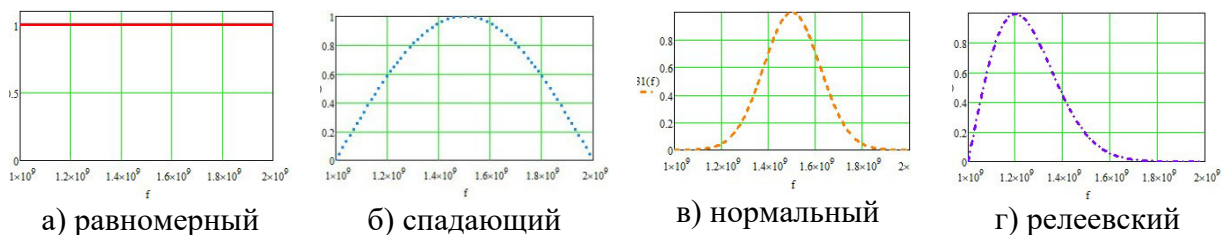


Рис. 4. Спектры излучаемых ШП электромагнитных полей

Нормированные осевые распределения энергии электромагнитного поля, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля на расстоянии 2 м. рассчитаны по формуле (1) и показаны в логарифмическом масштабе на рис. 5. Цвет графиков соответствует цвету спектральных распределений на рис. 4. Темно-зеленая сплошная линия – распределение, соответствующее монохроматическому сигналу, коричневая штрихпунктирная линия соответствует энергии широкополосного электромагнитного поля, излучаемой одиночным излучателем.

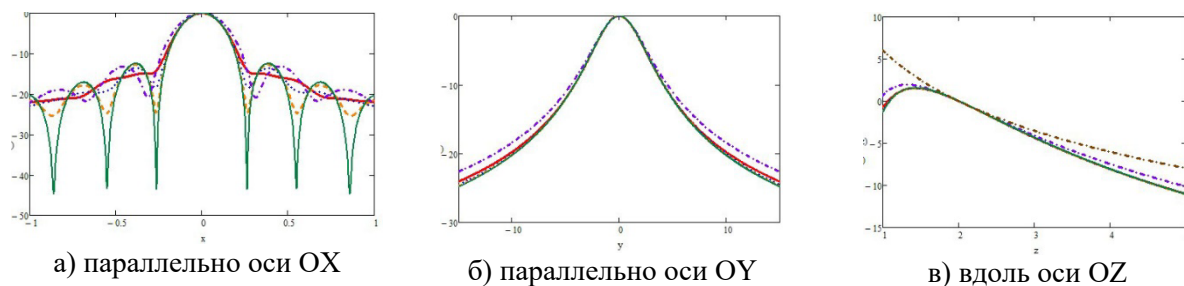


Рис. 5. Нормированные осевые распределения энергии электромагнитного поля, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля с непрерывным спектром шириной 1000 МГц

Как видно из графиков осевых распределений энергии, сфокусированным широкополосным электромагнитным полям свойственно хорошее совпадение значений в точке фокусировки и ее окрестности, а также эффект «заплывания нулей», приводящий к сглаживанию боковых лепестков. Для фокусировки в режиме концентрации энергии также характерно смещение максимума энергии поля в направлении к дискретной антенне, как и для сфокусированных монохроматических полей.

В таблице 1 представлены значения КНД, рассчитанные для различных фокусных расстояний. Видно, что численно значение КНД стремится к числу излучателей N .

Таблица 1. КНД сфокусированной дискретной антенны

№	Тип спектрального распределения	КНД при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
2.	Спадающий	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
3.	Нормальный	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
4.	Релеевский	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992
5.	Монохроматический	15,215	15,636	15,866	15,966	15,992

В таблицах 2 и 3 приведены поперечный и продольный размеры области фокусировки.

Таблица 2. Поперечный размер области фокусировки

№	Тип спектрального распределения	Поперечный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	0,24	0,36	0,58	1,12	2,24
2.	Спадающий	0,24	0,36	0,56	1,12	2,24
3.	Нормальный	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22
4.	Релеевский	0,24	0,4	0,66	1,32	2,6
5.	Монохроматический	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22

Таблица 3. Продольный размер области фокусировки

№	Тип спектрального распределения	Продольный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	5,38	8,24	13,98	28,2	56,54
2.	Спадающий	1,82	8,26	13,98	28,2	56,54
3.	Нормальный	1,79	8,26	13,98	28,2	56,54
4.	Релеевский	5,46	8,32	14,04	28,24	56,24
5.	Монохроматический	1,78	8,26	13,98	28,2	56,54

Размеры области фокусировки для широкополосных электромагнитных полей с симметричным спектром совпадают с размерами, рассчитанными для центральной частоты монохроматического электромагнитного поля. В случае несимметричного спектра предварительная оценка также может быть проведена для монохроматического сигнала с частотой, соответствующей наиболее интенсивной частотной компоненте широкополосного несимметричного спектра. При расстояниях до точки фокусировки порядка пяти – шести размеров апертуры эффект фокусировки деградирует и при больших расстояниях практически утрачивается.

Для пространственных распределений энергии широкополосных электромагнитных полей, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля характерен эффект «заплывания» нулей, приводящий к сглаживанию боковых лепестков. В связи с этим оценка уровня боковых лепестков, как максимального значения энергии сфокусированного широкополосного электромагнитного поля за пределами области фокусировки затруднительно. Однако существует возможность интегрально оценить уровень побочного излучения широкополосного сфокусированного электромагнитного поля проводя сравнение с пространственным распределением энергии широкополосного электромагнитного поля от одиночного ненаправленного излучателя, располагающегося в центре сфокусированной линейной дискретной антенны. Оценку будем проводить при равенстве излучаемых мощностей. Тогда коэффициент скрытности равен:

$$K_{скр} = 10 \lg \frac{\int_{x_0}^{x_{zp}} \int_{z_0}^{z_{zp}} |E_{ин.эн}^{прд.эн}(x, y_0, z)|^2 dz dx}{\int_{x_0}^{x_{zp}} \int_{z_0}^{z_{zp}} |E_{ин.из}^{прд.эн}(x, y_0, z)|^2 dz dx}, \quad (5)$$

где x_{zp} выбирается из условия $|E_{ин.из}^{прд.эн}(x, y_0, z_0)|^2 = 0.1$, а z_{zp} из условия $|E_{ин.из}^{прд.эн}(x_0, y_0, z)|^2 = 0.1$. Результаты приведены в таблице 4 и на рис. 6.

Таблица 4. Коэффициент скрытности сфокусированной дискретной антенны

№	Тип спектрального распределения	$K_{скр}$, дБ при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	-11,65	-11,82	-11,91	-11,95	-11,96
2.	Спадающий	-11,75	-11,92	-12,01	-12,05	-12,06
3.	Нормальный	-11,80	-11,97	-12,06	-12,10	-12,11
4.	Релеевский	-11,12	-11,29	-11,37	-11,41	-11,42
5.	Монохроматический	-11,81	-11,98	-12,08	-12,11	-12,12

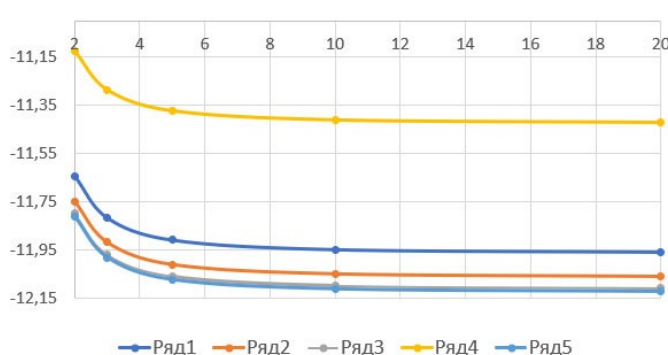


Рис. 6. Зависимость $K_{скр}$ линейной СФДА от расстояния до точки фокусировки

По данным из таблицы 4 можно сделать вывод, что по мере увеличения фокусного расстояния коэффициент скрытности снижается и стремится к значению $10 \lg \frac{1}{N}$ где N – количество излучателей линейной дискретной антенны. Для несимметричного спектра с преобладанием низкочастотных компонент наблюдается повышение величины $K_{скр}$. В качестве предельной оценки $K_{скр}$ может быть использована величина, рассчитанная для монохроматического сигнала.

Основные свойства линейных дискретных антенн, сфокусированных в режиме передачи сигнала

Рассмотрим линейную дискретную антенну, сфокусированную в режиме передачи сигнала. Исходные данные линейной дискретной антенны и виды спектральных распределений идентичны рассмотренным ранее. Осевые распределения энергии представлены на рис. 7.

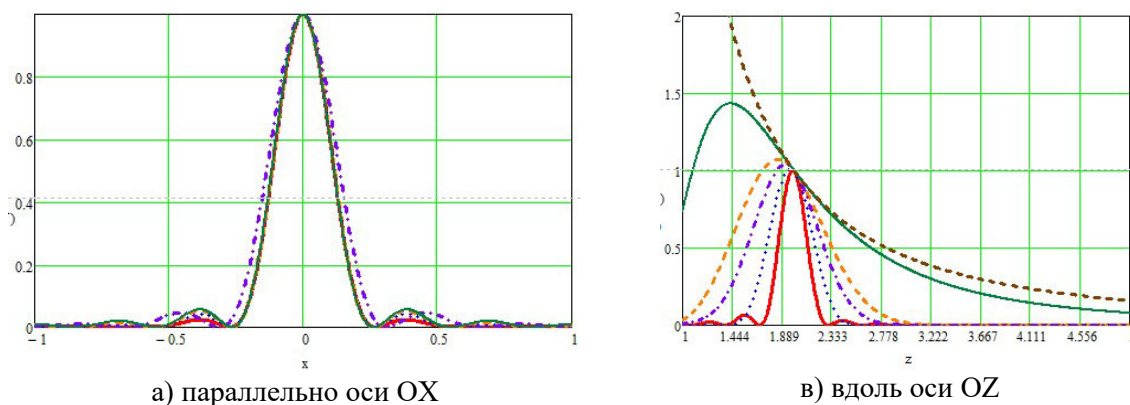


Рис. 7. Нормированные осевые распределения энергии широкополосного сигнала, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля в режиме передачи сигнала с непрерывным спектром шириной 1000 МГц

Как видно из графиков на рис. 7 смещение максимума энергии, сфокусированного в режиме передачи сигнала, электромагнитного поля практически отсутствует.

Коэффициент направленного действия, по мере увеличения фокусного расстояния, стремится к величине, численно равной количеству излучателей, аналогично случаю функционирования в режиме концентрации энергии. В таблице 5 приведены поперечные

размеры области фокусировки, а в таблице 6 – продольные размеры для различных фокусных расстояний.

Таблица 5. Поперечный размер области фокусировки,

№	Тип спектрального распределения	Поперечный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	0,24	0,34	0,56	1,1	2,16
2.	Спадающий	0,24	0,34	0,56	1,12	2,2
3.	Нормальный	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22
4.	Релеевский	0,28	0,4	0,66	1,3	2,58
5.	Монохроматический	0,24	0,36	0,56	1,12	2,22

Таблица 6. Продольный размер области фокусировки,

№	Тип спектрального распределения	Продольный размер области фокусировки, м., при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	0,28	0,28	0,27	0,28	0,28
2.	Спадающий	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44
3.	Нормальный	0,95	0,98	0,97	0,95	0,95
4.	Релеевский	0,7	0,69	0,69	0,68	0,68
5.	Монохроматический	1,78	8,26	13,98	28,2	56,54

Как видно из данных таблиц 5 и 6, поперечный размер возрастает по мере увеличения фокусного расстояния и его численная оценка близка поперечному размеру монохроматического сфокусированного поля. В свою очередь продольный размер для различных фокусных расстояний остается примерно одинаковым и значительно отличается от случая монохроматического сфокусированного поля, зависит от ширины спектра сигнала. Продольный размер может быть оценен как $c/\Delta f_{0,5}$, где c - скорость электромагнитной волны, $\Delta f_{0,5}$ - ширина спектра по уровню 0,5.

Коэффициент скрытности в режиме передачи сигнала несколько меньше, чем в режиме концентрации энергии. Численные значения приведены в таблице 7.

Таблица 7. $K_{скр}$ сфокусированной линейной дискретной антенны

№	Тип спектрального распределения	$K_{скр}$, дБ при различных z_0				
		2	3	5	10	20
1.	Равномерный	-22,72	-24,58	-26,90	-30,10	-33,37
2.	Спадающий	-21,04	-22,89	-25,19	-28,35	-31,59
3.	Нормальный	-17,89	-19,63	-21,81	-24,83	-27,94
4.	Релеевский	-18,48	-20,27	-22,51	-25,61	-28,80
5.	Монохроматический	-12,14	-12,31	-12,41	-12,45	-12,46

Как видно по данным таблицы 7, коэффициент скрытности при различных фокусных расстояниях меньше на величину порядка -10 -20 дБ по сравнению со сфокусированным монохроматическим электромагнитным полем. Чем больше ширина спектра по половинному уровню, тем меньше коэффициент скрытности.

Выводы

В работе представлены основные свойства широкополосных электромагнитных полей с непрерывным спектром, фокусируемых в различных режимах линейными дискретными антеннами в зоне ближнего излученного поля. Показано, что для режима концентрации энергии все предложенные свойства широкополосных электромагнитных полей с симметричным спектром совпадают со свойствами сфокусированных монохроматических электромагнитных полей на центральной частоте, для случая несимметричного спектра также можно оценить основные свойства для случая монохроматического поля, частота которого совпадает с частотой наиболее интенсивной компоненты неравномерного спектра. Для случая функционирования в режиме передачи сигнала такие свойства, как КНД, поперечный размер области фокусировки также могут быть оценены для случая монохроматического сфокусированного поля. Продольный размер для различных фокусных расстояний остается постоянным и оценивается по формуле $c/\Delta f_{0,5}$, в качестве верхней оценки коэффициента скрытности для режима передачи сигнала может быть использована оценка для случая сфокусированного монохроматического электромагнитного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы ПРИОРИТЕТ-2030 и за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10059, <https://rscf.ru/project/23-79-10059/>.

Список литературы

1. Седельников Ю.Е. Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах / В.С. Кубланов, О.В. Потапова, Ю.Е. Седельников и др. // Журнал радиоэлектроники. - 2012. - №4. - С. 1-27.
2. Веденькин Д. А. Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего радиоволнового контроля / Д. А. Веденькин, Ю. Е. Седельников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 131-146. – DOI 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146. – EDN UEXGUJ.
3. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения / под общ. ред. Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т: Красноярск. - 2015. - 308 с.
4. Vedenkin D. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum–Difference Signal Processing / D. Vedenkin, O. Morozov, Y. Sedelnikov et al. // Electronics. – 2023. – 12. – № 2. – 436. <https://doi.org/10.3390/electronics12020436>
5. Buffi A. A Focused Planar Microstrip Array for 2.4 GHz RFID Readers / A. Buffi, A. A. Serra, P. Nepa et al. // in IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - V. 58, no. 5. - P. 1536-1544, May 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2044331.
6. Сверхширокополосные антенны. Пер. с англ. под ред. Л.С. Бененсона. - М.: Мир, 1964. - 416 с.

BROADBAND LINEAR DISCRETE ANTENNAS FOCUSED IN THE NEAR RADIATE FIELD ZONE

D.A. Vedenkin

Kazan National Research University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The paper discusses broadband linear discrete antennas focused in the near radiated field zone. It is shown that when taking into account the properties of focused electromagnetic fields, it is necessary to take into account the methods of using the energy of the focused electromagnetic field in various operating modes. It is shown that for different modes, the spatial distribution functions of focused electromagnetic fields are different. The main properties of electromagnetic fields focused in the near radiated field zone are proposed and their quantitative estimates are given for various application modes.

Keywords: focusing of electromagnetic field; near radiated field zone; broadband electromagnetic field; focused discrete antenna.

Статья отправлена в редакцию 16 декабря 2024 г.