РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу докторанта PhD Карибаева Бейбита Абдирбековича на тему: **«Электродинамические характеристики анизотропных фрактальных антенн»**, представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации».

Диссертационная работа Карибаева Бейбита Абдирбековича посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию электродинамических и радиотехнических характеристик проволочных антенн на базе фрактальных кривых.

1. Актуальность темы исследования и её связь с общенаучными и общегосударственными программами

Исследование свойств фрактальных антенн на сегодняшний день является одной из важных задач в области антенно-фидерных устройств. Этот класс антенн не просто занимают промежуточное положение между дипольными и апертурными. Самоподобность их фрактальных структур позволяет им резонировать на нескольких частотах, а в ряде случаев - и в широком диапазоне частот, что важно для многих практических применений, таких как радиосвязь, радилокация, радиотомография.

Расчёт электродинамических характеристик фрактальных антенн затруднён аналитическими методами. Однако, используя метод моментов, появилась возможность моделирования этих характеристик с достаточно высокой точностью. До последнего времени исследования таких антенн базировались в основном на экспериментальных исследованиях, при этом не поднимался вопрос о преимуществах одних фрактальных форм над другими при использовании их в качестве топологии антенн. Данная работа является **актуальной** и соответствует общегосударственным программам, направленным на развитие наукоёмких технологий.

2. Научные результаты и их обоснованность

Автором, в его диссертационной работе в качестве научных результатов представлены следующие утверждения:

1 предложен новый вид фрактала ZhF для конструирования антенн, выведено его аналитическое уравнение, которое описывает все уровни предфрактала;

2 экспериментально и теоретически показано, что частотные характеристики проволочных фрактальных диполь антенн, зависят от дробной размерности самой фрактальной структуры;

3 выявлены режимы поперечного (нормального) и осевого излучения диаграмм направленности проволочных фрактальных антенн на первых двух резонансных частотах;

4 выявлено смещение резонансов проволочных фрактальных антенн в область низких частот с ростом номера предфрактала.

Новизна использования фрактала ZhF для конструирования антенн не вызывает сомнений уже потому, что сам этот фрактал был впервые описан профессором Жанабаевым З.Ж. в КазНУ им. Аль-Фараби и вполне логично, что именно в этом университете его впервые применили для конструирования антенн. Аналитическое уравнение приведено докторантом в вид, удобный для программирования любых уровней предфракталов.

Экспериментально подтверждена зависимость частотных характеристик проволочных фрактальных антенн от размерности фрактальной структуры. Сделана попытка теоретического описания этой зависимости. Выведеные формулы являются новыми, и они позволяют с приемлемой точностью описывать частотные хзарактеристики в диапазоне, ограниченном первыми двумя резонансами. В более высокочастотной области для проверки этих уравнений требуются дополнительные научные исследования.

Компьютерное моделирование и эксперимент убедительно показали наличие у антенны на базе фрактала ZhF более сильной осевой составляющей диаграммы направленности на частотах второго резонанса по сранению с другими исследованными антеннами. Вероятно, это связано с особенностью топологии самого фрактала и это особенность может найти практическое применение. К сожалению, не были полностью исследованы поляризационные составляющие диаграммы направленности и коэффициенты усиления антенн, что, вероятно выходило за рамки данных исследований.

Соискателем были выявлены закономерности в смещении резонансных частот исследуемых в диссертационной работе антенн в зависимости от номера предфрактала и показано, что у разных типов фрактальных антенн эта зависимость разная, что свидетельствует о том, что имеется ещё некий фактор, влияющий на резонансную частоту, кроме длины антенны, её фрактального порядка и размерности. Это безусловно новое достижение, приводящее к постановке новых исследований.

3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (научного положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

Автором, в диссертационной работе были свормулированы следующие научные положения:

1 Анизотропный геометрический фрактал ZhF и его предфракталы, имеющие локальную фрактальную размерность, аналитически описываются через ступенчатые функции Хэвисайда.

2 Резонансные частоты проволочных фрактальных антенн (ZhF, MF, KF), полученные теоретически для $n+1$, n предфракталов и измеренные экспериментально соответствуют в пределах погрешности не более 3-5%.

3 Проволочные фрактальные антенны являются узкополосными с повышенной шириной диаграмм направленности. Ширина ДН антенны ZhF превышает ширину антенна на MF, KF не менее, чем в 1,5 раза.

4 Среднее значение принятой мощности радиоволн на резонансных частотах ZhF антенны в перпендикулярном и параллельном режимах приёма сигнала больше на 10-15%, чем для MF и KF антенн при одинаковых регулярных длинах и расстояниях до излучателя.

Достоверность и обоснованность первого положения подтверждаются как самой формулой, в составе которой используются фукции Хэвисайда, так и программой, реализованной для расчёта фрактала произвольных размерностей.

Достоверность описания частот резонансов формулой 3,13 подтверждается измерениями резонансных частот, а погрешность - расчётами, приведёнными в Приложении Б. Обоснованно это можно отнести к предфракталам до номера 3 и резонансов - до второго, так как измерения с предфракталами более высокого порядка и на более высоких частотах не проводились.

Узкополосность всех испытанных проволочных фрактальных антенн установлена абсолютно достоверно. Несмотря на то, что проволочные фрактальные антенны, в отличие от дипольных, имеют большую плокостную апертуру, обоснованно утверждается, что она связана с отсутствием альтернативных путей для тока в антенне, кроме как вдоль провода.

Утверждение о том, что мощность принятого сигнала у антенны на базе фрактала ZhF на 10-15% больше чем у альтернативных антенн не достоверно, так как данные, приведённые в таблице 11 показывают разницу более 1 дБ, а 1 дБ - это уже, как минимум, 26%.

В первом разделе диссертации автором были сделаны следующие выводы:

- «Ни в одной работе не встречается сопоставление фрактальных антенн между собой». Это утверждение не достоверно, так как в этом же разделе соискатель приводит результаты сравнений разных антенн из научных работ. Вероятно, соискатель просто не достаточно корректно выразил свою мысль.

- «На сегодняшний день не существует строгой электродинамической теории, объясняющей необычные свойства структур, построенных на основе фрактальных множеств». Это утверждение обосновано и достоверно.

- «Фрактальные кривые полезны для получения широкодиапазонных антенн». Утверждение обосновано и достоверно, но имеет ограничение, выявленные автором в данной работе, что это не касается проволочных антенн.

- «Размер фрактала важен для проектирования небольших антенн в различных технологиях связи». Данный вывод достоверен и подтверждается результатами как натурных экспериментов, так и моделирования, выполненных соискателем. Он обосновывается возрастанием электрической длины фрактальных антенн при росте размерности при сохранении геометрических длин.

- «Самоподобие полезно при проектировании многочастотных антенн и применяется при проектировании многоканальных антенн и массивов». Вывод достоверен и обоснован приведёнными соискателем цитатами из многочисленных научных публикаций.

В заключении соискателем утверждается:

- «Предложен новый вид фрактала ZhF с локальной фрактальной размерностью D=1.4649, для конструирования антенн. Получена аналитическая формула данного ZhF фрактала с помощью функции Хэвисайда». Заключение обосновано и достоверно.

- «Построенная теоретическая модель описывает отношения резонансных частот предфракталов». Это утверждение достоверно в рамках ограничений по номеру предфрактала и резонансным частотам. Утверждение обосновано экспериментом.

- «Рассмотренные все проволочные фрактальные антенны (ZhF, KF, MF) до трёх поколений регулярной длиной $L_0 = 14{,}5$ см и диаметром $d = 1$ мм имеют по две резонансные частоты с коэффициентами отражения ниже -10дБ в диапазоне 0,1-2,7 ГГц». Данный вывод подтверждается экспериметом и компьютерным моделированием.

- «С ростом номера поколения (формирование более мелких предфракталов) наблюдается смещение резонансов в сторону области низких частот». Вывод подтверждается экспериментально и компьютерным моделированием.

- «Физический эксперимент и компьютерное моделирование показывают, что ширина основного лепестка ДН на уровне 0,707 от максимального значения (или на уровне – 3дБ в логарифмическом масштабе) ZhF антенны больше на 10-15%, чем для KF и MF антенн». Вывод подверждается и экспериментально и компьютерным моделированием.

- «Среднее значение мощности сигналов на резонансных частотах принятых ZhF антенной в двух (перпендикулярном и параллельном) режимах больше на 10 - 15 % чем для KF и MF антенн». Данный вывод не обоснован, так как разница в уровнях сигналов, приведённых автором в таблице 11, значительно превышает заявляемые 10-15%.

4. Степень новизны каждого научного результата (научного положения), вывода соискателя, сформулированных в диссертации

Новизна положения о том, что анизотропный геометрический фрактал ZhF и его предфракталы, имеющие локальную фрактальную размерность, аналитически описываются через ступенчатые функции Хэвисайда подтверждается новизной самого фрактала ZhF, предложенного и описанного в КазНу им. Аль-Фараби.

Положение о погрешностях резонансных частот проволочных фрактальных антенн является новым, так как такие погрешности никем ранее не оценивались.

Положение об узкополосности проволочных фрактальных антенн является новым, также как и выявленный факт повышения ширины диаграммы направленности антенны на базе топологии фрактала ZhF над антеннами на базе фракталов MF и KF не менее, чем в 1,5 раза.

Среднее значение принятой мощности радиоволн на резонансных частотах ZhF антенны «в перпендикулярном и параллельном режимах приёма сигнала» больше на 10-15%, чем для MF и KF антенн при одинаковых регулярных длинах и расстояниях до излучателя является новым, но не достаточно достоверным.

В первом разделе диссертации автором были сделаны следующие выводы:

- «Ни в одной работе не встречается сопоставление фрактальных антенн между собой». Этот вывод новый, но не достаточно достоверный.
- «На сегодняшний день не существует строгой электродинамической теории, объясняющей необычные свойства структур, построенных на основе фрактальных множеств». Этот вывод не является новым, это признаётся многими учёными.
- «Фрактальные кривые полезны для получения широкодиапазонных антенн». Этот вывод не является новым, это признаётся многими учёными.
- «Размер фрактала важен для проектирования небольших антенн в различных технологиях связи». Этот вывод не является новым, это признаётся многими учёными.
- «Самоподобие полезно при проектировании многочастотных антенн и применяется при проектировании многоканальных антенн и массивов». Этот вывод не является новым, это признаётся многими учёными.

В заключении соискателем сделано несколько выводов:

- «Рассмотренные все проволочные фрактальные антенны (ZhF, KF, MF) до трёх поколений регулярной длиной $L_0 = 14{,}5$ см и диаметром $d = 1$ мм имеют по две резонансные частоты с коэффициентами отражения ниже -10дБ в диапазоне 0,1-2,7 ГГц». Данный вывод является новым, так как подобный эксперимент ранее не ставился.
- «С ростом номера поколения (формирование более мелких предфракталов) наблюдается смещение резонансов в сторону области низких

частот». Вывод частично новый, так как факт снижения резонансной частоты был известен, а закон изменения и не достаточно были исследованы.

- «Физический эксперимент и компьютерное моделирование показывают, что ширина основного лепестка ДН на уровне 0,707 от максимального значения (или на уровне - 3дБ в логарифмическом масштабе) ZhF антенны больше на 10-15%, чем для KF и MF антенн». Вывод новый, так-как сравнительные измерения ранее не проводились.

- «Среднее значение мощности сигналов на резонансных частотах принятых ZhF антенной в двух (перпендикулярном и параллельном) режимах больше на 10 - 15 % чем для KF и MF антенн». Данный вывод нов, но не обоснован, так как разница в уровнях сигналов, приведённых автором в таблице 11, значительно превышает заявляемые 10-15%.

5. Практическая и теоретическая значимость научных результатов

Наиболее важными, с точки зрения практики, результатами представленной работы можно считать однозначный вывод об узкополосности проволочных фрактальных антенн и исследование «осевого» излучения этих антенн. С точки зрения теории - выявление у антенн, изготовленных по топологии разных фракталов разной зависимости смещения резонанстных частот, требующую дальнейшего научного изучения.

6. Замечания, предложения по диссертации

К основным замечаниям по диссертации следует отнести:

- проведение в полном смысле достоверных измерений в антенной технике возможно только в безэховой камере;

- при подключении симметричной антенны к несимметричному фидеру (коаксиальному кабелю) должно использоваться симметрирующее устройство (балун);

- приведённые фрмулы для расчёта расстояния между антеннами справеливы только для антенн, чей размер во много раз превышает длину волны, что не характерно для антенн, используемых для измерений;

- используемый измерительный рупор аттестован (по документам) для измерений начиная с частоты 850 МГц, а измерения проводились - начиная со 100 МГц;

- не приведена информация о последней поверке средств измерений;

- в тексте работы есть ряд некорректных переводов технических терминов с английского языка на русский, таких как, «повышение производительности» вместо увеличения пропускной способности, «магнитное поле является соленоидом», «достигается максимальный эффект

углов», «затухание теоретически возрастает за все пределы», «изотропный излучатель, который является **безразмерной точкой** в пространстве», «**шаблоны** обычно искажаются из-за соседних препятствий или особенностей местности», «**качество** электромагнитной совместимости», «**площадь захвата**» и другие;

- при описании наноспутника указывается, что 1 юнит равен 10 см, но на самом деле 1 юнит равен 44,45мм;
- в уравнении 2.10 допущена описка;
- на рисунке 2.6 длина элементарного диполя обозначена и $2l$ и δz одновременно;
- рисунок 2.12 сжат по горизонтальной оси, в связи с чем, приведённые в тексте угловые градусы не соответствуют изображённым графически;
- в разных разделах габаритные размеры антенны L_0 равны то 14,5 см, то 7 см;
- на стр. 78 утверждается, что «внутренний угол равностороннего треугольника равен $\alpha = \pi/3$»;
- на стр. 92 измеренные значения мощностей приведены с точностью 0,01 дБм, что является не корректным без указания доверительных интервалов;
- в таблице 12 приведены цифры, без пояснения как именно они получены, что не позволяет оценить их достоверность.

В качестве предложений можно рекомендовать продолжение исследований с устранением высказаных замечаний с фракталами больших порядков и в более широком диапазоне частот.

7. Соответствие содержания диссертации в рамках требования Правил присуждения учёных степеней

Диссертация «Электродинамические характеристики анизотропных фрактальных антенн», по объёму и содержанию соответствует всем требованиям, предъявляемым «Правилами присуждения ученых степеней» к диссертациям.

Защищаемые научные положения можно квалифицировать как решение важных научных и прикладных задач.

На основании вышеизложенного, считаю, что соискатель Карибаев Б.А. заслуживает присуждения ему степени доктора философии по специальности «6D071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации».

Официальный рецензент,
зам. генерального директора
ТОО СКТБ «Гранит»,
кандидат физ.-мат. наук

Васильев И.В.
3 декабря 2019 г.