

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ АНТЕННЫ

Ю.Ф. Лонин¹, А.Г. Пономарев¹, А.В. Столярчук², А.Ю. Звягинцев², В.И. Чумаков³

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;

²Харьковский национальный университет радиозлектроники, Харьков Украина;

³Академия ВМС имени П.С. Нахимова, Севастополь, Украина

Теоретические и экспериментальные исследования показывают возможность генерирования импульсов с относительно широким спектром в результате возбуждения сильноточным электронным пучком антенны (ЭПА). Экспериментально были исследованы изолированная штыревая и спиральная антенны. Показана возможность получения сверхширокополосного излучения (СШП) с высокой напряженностью поля в дальней зоне. Приведены результаты моделирования конической спиральной ЭПА при возбуждении ее импульсными токами различной формы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы генерирования и излучения несинусоидальных сверхширокополосных (СШП) сигналов заставляет экспериментировать с новыми методами возбуждения излучающих систем. Поиск возможных вариантов комбинаций существующих излучателей стационарных сигналов и новых методов их возбуждения нестационарными сигналами нередко приводит к интересным результатам, однако, как показывает более детальный анализ, для повышения эффективности излучения необходимо проводить многопараметрическую оптимизацию в каждом конкретном случае как излучающей, так и генерирующей систем. Сложность проведения такого анализа связана, прежде всего, со сложностью математического моделирования, ввиду отсутствия простой модели, позволяющей достоверно описать поле в дальней зоне, возникающее при воздействии реального сигнала на реальную излучающую структуру. Для подобных задач в качестве метода анализа с достаточной степенью точности может быть использован метод конечных разностей во временной области.

Для формирования излучений высокой интенсивности в последнее время нередко применяются сильноточные ускорители электронов (СУЭ). Исследования процессов генерирования и формирования импульсного электромагнитного излучения с помощью техники СУЭ привели к разработке электронно-пучковой антенны (ЭПА), в которой излучающая структура, связанная с коллектором ускорителя, возбуждается непосредственно электронным пучком [1,2]. Теоретические и экспериментальные исследования показывают возможность генерирования импульсов с относительно широким спектром, который определяется разбросом энергии электронов на переднем фронте пучка. Экспериментально была исследована штыревая антенна и показана возможность получения СШП-излучения с высокой напряженностью поля в дальней зоне [1]. В настоящей работе приведены результаты моделирования конической спиральной ЭПА при возбуждении ее импульсами тока различной формы.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования генерации мощных СШП электромагнитных импульсов путем прямого возбуждения изолированной конической спиральной антенны импульсным РЭП были выполнены на сильноточном ускорителе Темп-А.

Возбуждение изолированной конической спиральной антенны происходит электронным пучком, сформированным в катод-анодном промежутке ускорителя (Рис.1, поз. 1,2), и который попадает на коллектор 3, связанный с излучающей конической спиральной антенной (5).

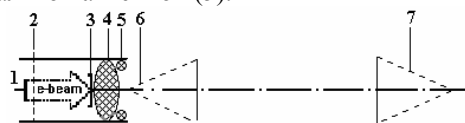


Рис.1. Схема проведения эксперимента:
1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – изолятор;
5 – пояс Роговского; 6 – излучающая антенна;
7 – приемная антенна

Типичные параметры пучка при этом таковы: $E_b \sim 0,7 \dots 0,8$ МэВ, $I_b \sim 7$ кА, $\tau_b \sim 15$ нс, $\tau_f \sim 1 \dots 2$ нс.

Исходя из геометрических параметров излучающей системы и амплитудно-временных характеристик возбуждающего импульса [1], было проведено численное моделирование излучения широкого класса излучающих систем с вариацией их геометрических параметров и характеристик возбуждающих импульсов, целью которого являлось определение амплитудно-временных зависимостей поля в дальней зоне и сравнение их с экспериментальными данными. Ниже представлены некоторые результаты моделирования.

В качестве модели возбуждающего импульса был принят импульс трапециевидной формы амплитудой 1 А, длительность фронта которого варьировалась от 1 до 3 нс. Отсутствие точных исходных данных по возбуждающему импульсу тока и условию проведения эксперимента не дают возможности провести количественный анализ расхождений экспериментальных данных с расчетными, однако качественное совпадение характера изменения поля в дальней зоне свидетельствует об адекватности компьютерной модели и позволяет пользоваться ею для дальнейшего анализа (Рис.2,3).

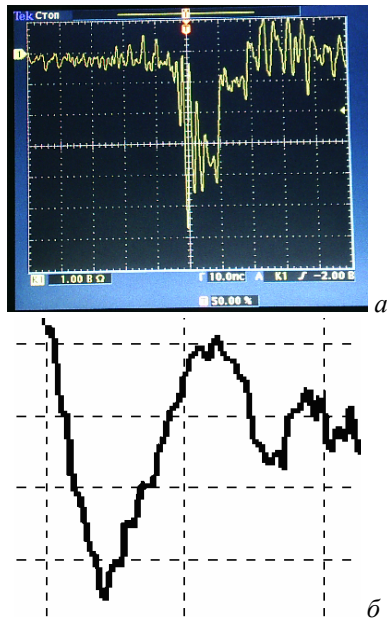


Рис.2. Реальная (а) и рассчитанная (б) осциллограммы напряжения на излучающей антенне

Общий вид моделируемой спиральной антенны изображен на Рис.3,а.

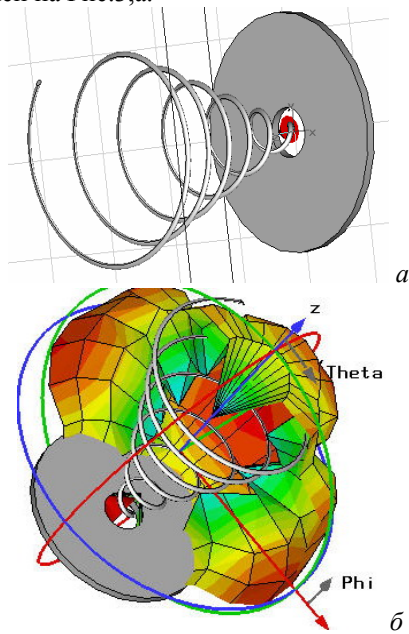


Рис.3. Модель конической спиральной антенны (а) и ее ДН (б) на частоте 1,75 ГГц при возбуждении трапецевидным импульсом

На Рис.3,б приведена типичная диаграмма направленности (ДН) однозаходной конической спиральной антенны при возбуждении трапецевидным импульсом тока. Расчет выполнен для частоты 1,75 ГГц. ДН приведена для конкретного значения частоты, поскольку во временной области она не определена однозначно.

Существуют различные способы определения ДН во временной области [2]: по пиковой амплитуде, по пиковой мощности, по корреляции с сигналом в максимуме и т.д., которые могут быть дополнены. Для исключения влияния формы импульса тока расчет выполнен для режима возбуждения с помощью Normalized Impulse Response (нормализованного импульсного отклика – НИО).

Характеристики излучения и приёма импульсной антенны наиболее полно могут быть охарактеризованы с помощью НИО. НИО антенны – это сигнал, который возникает на выходе антенны при падении на неё плоской волны, приходящей из заданного направления, с временной зависимостью в форме дельта-импульса [3]. При свертке с временной формой падающего поля НИО дает форму сигнала на выходе антенны [3-5]. Вычисленная таким образом функция уже не зависит ни от импеданса линии, питающей антенну, ни от формы входного сигнала, так что можно говорить о ней как о характеристике, которая принадлежит исключительно самой антенне, и соответственно, определять различные ДН относительно НИО. Кроме того, НИО может измеряться как непосредственно во временной области (при этом необходимо либо использовать генератор очень коротких импульсов, либо рассчитывать НИО с помощью деконволюции), так и в частотной области с применением обратного преобразования Фурье (IFFT). Однако эта математическая процедура сопряжена с дополнительным объемом вычислений и целью данной работы не является. Вместо этого была исследована амплитудно-временная зависимость (АВЗ) напряженности электрического поля в дальней зоне (ДЗ) при возбуждении различных излучающих структур с целью их оптимизации для получения максимальной пиковой напряженности поля в заданном направлении.

Решение данной задачи заключается в следующем. В радиотехнике генератор радиосигнала и антенна передающего устройства обычно рассматриваются как независимые устройства, общим параметром которых является входное сопротивление антенны. При этом главной задачей реализации режима передачи максимальной мощности в антенну является согласование, т.е. обеспечение равенства выходного импеданса генератора и входного сопряженного импеданса антенны. Такой подход справедлив для узкополосных сигналов, когда процесс излучения представляется установившимся. В случае же СШП-излучения генератор и антенну необходимо рассматривать исключительно в комплексе, а исходными данными для разработки антенны является не частота импульса возбуждения, а его АВЗ. Таким образом, антенне не «навязывается» сигнал, формируемый генератором, а обеспечивается органическое сочетание формирователя и излучателя электромагнитного колебания. Оптимизация в данном случае заключается в определении таких геометрических характеристик излучателя, при которых обеспечивается максимальная напряженность электрического поля в дальней зоне. Можно сказать, что в данном случае антенна представляет собой согласованный фильтр для заданной временной функции возбуждающего тока [5].

Определение пиковой напряженности поля ведется в максимуме ДН. Это направление обычно легко определяется из симметрии антенны, вместе с тем расчет ДН на различных частотах показывает, что максимум не расщепляется и не отклоняется от оси антенны вследствие несимметричной запитки или неравномерного распределения тока в апертуре.

Ниже кратко изложены основные результаты моделирования.

АВЗ (Рис.4,а,б) свидетельствуют о колебательном режиме излучения.

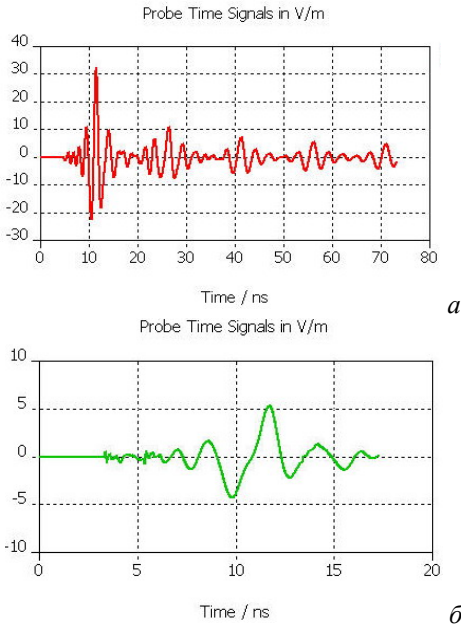


Рис.4. АВЗ поля в ДЗ при возбуждении конической спиральной антенны импульсом тока гауссовой формы (а) и трапецевидным импульсом тока (б)

При возбуждении конической спиральной антенны импульсом тока гауссовой формы (см. Рис.4,а) четко прослеживаются периодические и затухающие со временем всплески максимальной напряженности электрического поля через каждые 15 нс. При длине спирали антенны в 225 см это составляет удвоенное время пробега электромагнитной волны вдоль образующей. Т.е. коническая спиральная антенна ведет себя как высокочастотная резонансная электродинамическая структура, в которой импульс возбуждения, попеременно отражаясь от концов спирали, постепенно теряет свою энергию посредством излучения.

При трапецевидном возбуждающем импульсе тока (см. Рис.4,б) колебательный режим излучения выражен не так ярко, биения не прослеживаются, что связано с идеализированной формой выбранного импульса с плоской вершиной. Поскольку возбуждение антенны происходит только на фронтах импульса, энергии запасается не так много, и она, практически, вся теряется на излучение при первом же прохождении к открытому концу спирали.

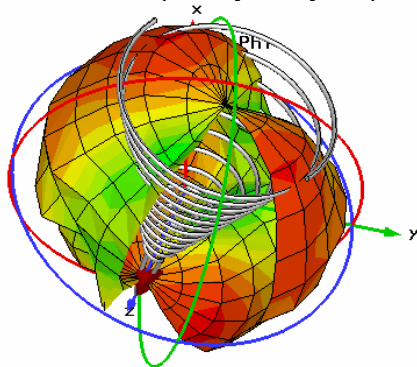


Рис.5. ДН двухзаходной спиральной конической антенны на частоте 2,5 ГГц при возбуждении трапецевидным импульсом

Для полноты анализа также было проведено исследование двухзаходной конической спиральной антенны (Рис.5). Причем расчет поля велся сразу в двух противоположных точках, находящихся с фронтальной 1 и с тыльной 2 части антенны на одинаковом расстоянии (см. Рис.6,а,б). Этот вариант примечателен тем, что при некоторых параметрах возбуждающего сигнала максимум поля смещается в противоположном направлении и направлен в сторону источника возбуждения (см. Рис.5).

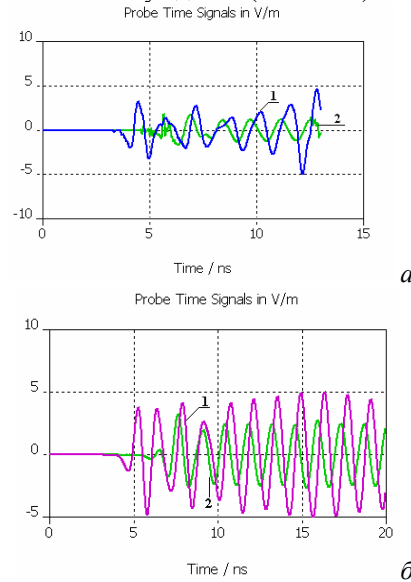


Рис.6. АВЗ поля в ДЗ при возбуждении двухзаходной конической спиральной антенны трапецевидным импульсом тока (а) и импульсом тока гауссовой формы (б): 1 – с фронта, 2 – с тыла

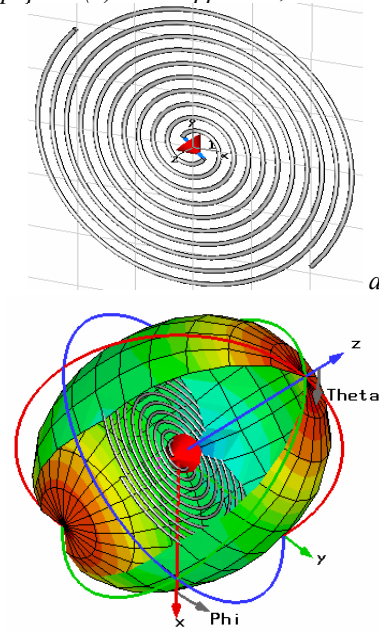


Рис.7. Двухзаходная плоская спиральная антенна (а) и ее ДН (б) на частоте 1,75 ГГц при возбуждении импульсом тока гауссовой формы

Для охвата как можно большего разнообразия спиральных антенн, была промоделирована двухзаходная спиральная антенна, представляющая собой плоскую арифметическую спираль (см. Рис.7,а). Ее ДН и АВЗ приведены на Рис.7,б и 8,а,б соответственно. Поскольку ни шаг спирали, ни ширина (диа-

метр) ее образующей не меняются, то такая антенна не является широкополосной. Поэтому и величина напряженности поля в ДЗ является небольшой, хотя при гауссовом возбуждающем импульсе тока амплитуда поля выше, и колебательный режим излучения выражен ярче в силу тех же причин, что и у конической спиральной антенны.

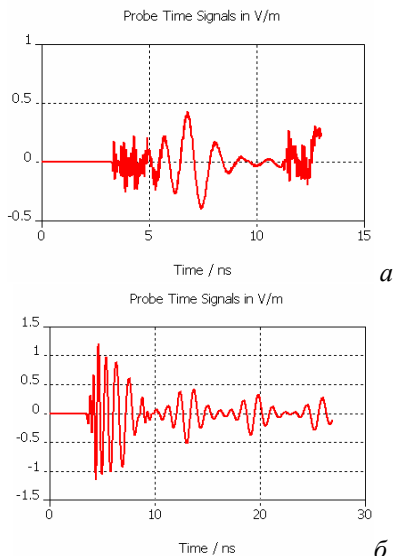


Рис. 8. АВЗ поля в ДЗ при возбуждении плоской двухзаходной арифметической спиральной антенны трапециевидным импульсом тока (а) и импульсом тока гауссовой формы (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численного моделирования излучения СШП электромагнитных импульсов различными электродинамическими структурами позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование методов конечных разностей во временной области позволяет моделировать процессы возбуждения и излучения СШП импульсов с приемлемой достоверностью. Результаты моделирования находятся в хорошем согласовании с экспериментальными результатами. Использование компьютерного моделирования позволяет проводить подготовку к экспериментальным работам в более сжатые сроки и с меньшими материальными затратами, появляется возможность более обоснованно подходить к выбору параметров и детализации при изготовлении макета или опытного образца.

2. Спиральная антенна, будучи широкополосной, не обеспечивает излучения локализованного им-

пульса из-за дисперсии фазового центра. Являясь высокодобротной резонансной электродинамической структурой, она запасает энергию запитывающего импульса, возбуждаясь на собственной частоте, постепенно расходуя энергию на излучение и тепловые потери в самом проводнике. Особенно ярко этот эффект выражен для гладких возбуждающих сигналов типа гауссового импульса. Если все же в качестве излучателя необходимо использовать именно спиральную антенну, то с помощью численного моделирования можно задать параметризацию с дальнейшей оптимизацией геометрических параметров излучателя и амплитудно-временных параметров возбуждающего импульса, задавшись в качестве целевой функции, к примеру, максимумом напряженности электромагнитного поля в заданном направлении, с целью повышения эффективности излучающей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.И. Гапоненко, А.М. Горбань, Д.В. Горожанин, В.И. Курилко, С.М. Латинский, Ю.Ф. Лонин, И.Ф. Харченко. Формирование интенсивных электромагнитных импульсов, излучаемых при прямом возбуждении изолированной штыревой антенны короткоимпульсным сильноточным РЭП // *Физика плазмы*. 2000, т.26, №4, с.1-3.
2. В.А. Балакирев, А.М. Горбань, А.М. Егоров, А.В. Кантемиров, Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, И.Н. Онищенко, В.Т. Уваров, В.И. Чумаков, В.В. Черный. Генерация СШП-сигнала при возбуждении спиральной антенны сильноточным РЭП // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 2006, №2, с.85-87.
3. А.Ю. Бутрым. *Импульсные сигналы в волноводах с неоднородным заполнением и в расширяющихся целевых антеннах (анализ во временной области)*: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2005.
4. B. Scheers. *Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar, with Application to the Detection of Anti Personnel Landmines: Ph.D. thesis / Université Catholique de Louvain, Laboratoire D'Hyperfréquences. Louvain-la-Neuve (Belgium), March 2001, 277 p.*
5. E.G. Farr and C.E. Baum. Time Domain Characterization of Antennas with TEM Feeds // *Sensor and Simulation Notes*. 1998, Note 426.

Статья поступила в редакцию 22.06.2010 г.

DESIGN OF RADIATION OF ELECTRON-BEAMS ANTENNA

Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, A.V. Stolyrchuk, A.Yu. Zvyagintsev, V.I. Chumakov

Theoretical and experimental studies indicate the possibility of generating pulses with a relatively wide range, due to excitation of high-current electron beam antennas (EBA). Experimentally investigated isolated rod and helical antennas. The possibility of UWB radiation with high intensity of the far field. The results of modeling a conical spiral EPA excited her pulse currents of various forms

МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНО-ПУЧКОВОЇ АНТЕНИ

Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов, О.В. Столярчук, О.Ю. Звягінцев, В.І. Чумаков

Теоретичні та експериментальні дослідження свідчать про можливість генерування імпульсів з відносно широким спектром за рахунок збудження сильнострумовим електронним пучком антени (ЕПА). Описуються ізольована штирєва і спіральна антени. Показана можливість отримання надширококуткового випромінювання з великою напруженістю поля в дальній зоні. Наведено результати моделювання конічної спіральної ЕПА при збудженні її імпульсними струмами різної форми.