

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

На правах рукописи



Нескородов Станислав Евгеньевич

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ
ИМПУЛЬСОВ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК
ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОТРАЖЕНИЙ**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
доцент Усков Г.К.

Воронеж – 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Использование сверхкоротких импульсов для определения импульсной характеристики системы.....	11
1.1 Определение параметров импульса для возбуждения излучателя	11
1.2. Методика экспериментального измерения импульсной характеристики	18
1.2.1. Методика эксперимента	18
1.2.2. Обработка результатов экспериментальных измерений.....	21
1.3 Оценка эффективности импульсного возбуждения системы в зависимости от длительности возбуждающего импульса.....	31
Выводы к главе 1	34
ГЛАВА 2. Качественная модель излучения на основе представления возбуждающего импульса эквивалентным движущимся зарядом. Оценка длительности импульсной характеристики.....	35
2.1 Анализ поля несимметричного вибратора, возбужденным током в виде дельта импульса.....	35
2.2 Синтез излучателя с использованием метода сосредоточенного заряда	40
2.3 Макетирование и экспериментальные измерения синтезированного излучателя	45
2.4 Априорная оценка длительности импульсной характеристики некоторых излучателей.....	50
Выводы к главе 2	55
ГЛАВА 3. Измерения характеристик излучателей во временной области с помощью сверхкоротких импульсов при наличии подстилающей поверхности	56
3.1. Исследования границы дальней зоны при импульсных измерениях на открытых полигонах	56
3.2. Исследование распространения импульсного сигнала при поднятых излучателях.....	60

3.3. Пример измерения диаграмм направленности в зоне интерференции с использованием сверхкоротких импульсов.....	64
Выводы к главе 3	69
ГЛАВА 4. Измерение диаграмм направленности излучателей в условиях отражений.....	70
4.1 Требования к месту для измерений характеристик излучателя с помощью сверхкоротких импульсов	70
4.2 Экспериментальная установка и методика измерений	73
4.3 Обработка принятых сигналов, фильтрация отражений с помощью временного окна	77
4.4.Измерения во временной области с учетом фильтрации отражений и их сравнение с результатами, полученными при помощи гармонических сигналов .	84
Выводы к главе 4	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
Список использованной литературы.....	90

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей распространения сверхкоротких импульсов и разработке методик измерений характеристик излучателей на открытых полигонах и камерах с отражениями.

Актуальность темы исследования. Традиционные методы измерения параметров излучателей ультравысоких частот (УВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) диапазонов базируются, как правило, на использовании узкополосных сигналов [1, 2]. При этом необходимо перестраивать несущую сигнала с шагом, обеспечивающим требуемую дискретизацию по частоте. С увеличением полосы пропускания излучателя, время таких измерений линейно растет, кроме того требуется специальная подготовка полигона с целью минимизации отражений для обеспечения точности измерений. Однако, в последние годы появляются измерительные системы, использующие в качестве сигнала сверхкороткие импульсы [3-9]. Появление такого рода систем стало результатом развития радиолокационных станций ближнего радиуса действия, использующих в качестве зондирующих сигналов импульсы нано- и субнаносекундной длительности. Входящие в их состав полупроводниковые генераторы импульсов способны генерировать сигнал с амплитудой от 10 до 200 вольт и длительностями от 10 до 10000 пс [5, 10-11], а используемые приемники, в том числе стробоскопические, способны принимать сверхширокополосные сигналы.

Излучение в импульсном режиме имеет свои особенности [4-6, 12-17], например, отсутствие явно выраженных боковых лепестков диаграммы направленности, которые должны значительно упростить требования, в части подготовки измерительного полигона, при проведении измерений с использованием таких импульсов. Постоянный интерес к описанию излучения структур во временной форме, часто упоминаемый в литературе [5, 9, 12-38], требует развития методов верификации предложенных гипотез.

В основе измерений параметров излучателей лежит преобразование Фурье, позволяющее рассматривать сигнал как во временной, так и в спектральной

областях. В работах [4, 9, 26, 28, 36, 39] показано, что поле симметричного вибратора в широкой полосе частот, рассчитанное на основе теории длинных линий, во временной области представляет собой три последовательных δ -импульса разной полярности и различной амплитуды. По мере удаления от излучателя изменяется временная задержка между импульсами. По величине этой задержки можно сделать вывод о нахождении наблюдателя в зонах Френеля или Фраунгофера. В работах [8, 13, 18, 37, 40] приведены различные критерии оценки дальней зоны, основанные на длительности возбуждающего импульса. Также предполагается, что при нахождении излучателя вблизи других предметов и поверхностей (например, земли) можно управлять временными задержками отраженных импульсов, меняя геометрию системы, например, высоту расположения излучателя и приемной антенны. Обладая возможностью разделения во времени неотраженных и отраженных импульсов, последние могут быть исключены при обработке результатов измерений с помощью временного окна, что позволяет имитировать свободное пространство.

Измерения с применением сверхкоротких импульсов актуальны и в случае, когда есть необходимость скрыть рабочие частоты излучателя [41]. Возбуждающий импульс, чаще всего однополярный, перекрывает ширину частотного спектра излучателя, скрывая истинный диапазон исследуемой структуры. Также ограниченность сигнала во времени, и большая скважность позволяют снизить спектральную плотность энергии, затруднив удаленный несанкционированный прием.

В настоящее время существуют единицы испытательных полигонов для проведения измерений характеристик излучателей с помощью сверхкоротких импульсов. Однако, интерес к этому методу измерений и анализу возможных преимуществ нового подхода достаточно устойчив. Ведущими компаниями мира, специализированными на измерительной технике, предлагаются решения, основанные на предварительной калибровке помещения с использованием монохроматических сигналов. Недостатком таких методов являются значительные

ограничения на размер исследуемых излучателей – их линейные размеры должны быть сопоставимы с калибровочными антеннами. Другой подход состоит в применении сканеров ближнего поля, однако они не позволяют обеспечить удовлетворительную точность измерений для большинства типов излучателей.

В связи с изложенным, исследование излучателей с помощью широкополосных импульсных сигналов является перспективным направлением [42, 43, 38]. Помимо определения диаграммы направленности и коэффициента усиления на различных частотах, применение широкополосных сигналов может повысить точность измерений за счёт компенсации сигналов, рассеянных окружающими предметами (например, элементами вспомогательного оборудования), а в некоторых случаях, способствовать получению дополнительной информации об испытуемом излучателе. Таким образом, исследования аналогового импульсного радиоканала и разработка радиофизических методов обработки сверхширокополосного импульсного сигнала являются актуальными.

Объектом исследования является аналоговый радиоканал, включающий излучатель, среду распространения сигнала и приемную антенну, а **предметом исследования** – характеристики радиоканала при наличии отражений от различных объектов и их компенсация при обработке регистрируемого сигнала.

Целью диссертации является совершенствование и расширение области применения методов измерения характеристик излучения во временной области с помощью сверхширокополосных импульсных сигналов при наличии непоглощающей подстилающей поверхности и иных объектов.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо было решить следующие **задачи**:

- исследовать параметры возбуждающих импульсов и определить критерии, при которых отклик радиоканала на заданный импульс имеет вид, аналогичный его импульсной характеристике;

- разработать метод априорной оценки длительности импульсной характеристики системы;

- исследовать особенности формирования и распространения электромагнитных волн при импульсном возбуждении излучателей;
- разработать метод измерения характеристик излучателей с фильтрацией отражений от непоглощающих подстилающих поверхностей и иных объектов.

Методы исследования. При решении задач, поставленных в диссертации, использовались: методы компьютерного моделирования электродинамических систем, численные методы расчета и анализа, методы и алгоритмы теории распространения радиоволн, методы цифровой обработки сигналов, а также экспериментальные методы радиофизики.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- введено условие максимальной длительности возбуждающего импульса, при котором отклик радиоканала соответствует её импульсной характеристике. Их применение при измерении характеристик излучателя позволяет кратно уменьшить размеры испытательного полигона;
- для априорной оценки длительности импульсной характеристики радиоканала предложена аналитическая модель излучения, основанная на замене поля импульсного тока полем сосредоточенного заряда. Рассмотрен пример синтеза формы проволочного излучателя по заданному полю. На основе моделирования излучателя в широкой полосе частот разработан его экспериментальный образец.
- предложена методика определения характеристик распространения сверхкороткого импульса в свободном пространстве, на основе замены зоны интерференции поля излучения непрерывного сигнала зоной временного разделения прямого и отраженного, от окружающих объектов, импульсов.
- предложен метод фильтрации во временной области на основе оценки длительности импульсной характеристики канала распространения при возбуждении излучателей сверхкороткими импульсами, позволяющий получить корректные диаграммы направленности в условиях отражений от окружающих предметов и поверхностей.

Достоверность результатов диссертации подтверждается строгостью доказательств утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью и корректностью применения математического аппарата, результатами экспериментальных исследований на программных моделях, совпадением новых результатов с известными в частных случаях. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением аттестованной измерительной аппаратуры, обработкой экспериментальных данных современными численными методами.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- предлагаемый метод измерения импульсной характеристики позволяет отказаться от решения некорректной физической задачи при обработке принятого сигнала. При этом исчезает необходимость дополнительного анализа сигнала генератора при измерении параметров канала радиосвязи, что сокращает перечень требуемой аппаратуры и упрощает измерительную установку;

- временная модель излучения позволяет априорно оценить длительность импульсной характеристики излучателя. Метод, основанный на замене поля импульсного тока полем сосредоточенного заряда, позволяет рассчитывать электромагнитное поле, используя уравнения движения частицы. Синтез излучателя, по заданному в широкой полосе частот полю, также сводится к решению уравнения движения сосредоточенного заряда;

- предлагаемый метод измерения параметров излучателя позволяет одновременно рассматривать всю требуемую полосу частот. Требования к полигону измерений могут быть значительно снижены за счет исключения поглощающих покрытий. Дополнительно, присутствие множества спектральных компонент обеспечивает техническое маскирование рабочей полосы частот измеряемой структуры.

Результаты работы могут быть использованы для измерения параметров антенн в ОВЧ, УВЧ и СВЧ диапазонах.

Основные результаты и положения, представляемые на защиту:

- выполнение установленного условия по максимальной длительности возбуждающего сверхширокополосного импульса исключает необходимость дополнительной математической обработки на приемном устройстве для регистрации импульсной характеристики системы;

- использование предложенной модели излучения, основанной на замене короткого импульса тока перемещающимся сосредоточенным зарядом, позволяет провести оценку длительности импульсной характеристики излучателя или синтезировать его геометрию по заданному импульсному полю в широкой полосе частот;

- при небольшой длине радиотрассы достаточно использовать временное разделение неотраженного (прямого) и отраженного от подстилающей поверхности сигнала, что позволяет имитировать его распространение в свободном пространстве;

- результаты экспериментальных и теоретических исследований излучения сверхкоротких импульсных сигналов, указывают на возможность корректного измерения коэффициента направленного действия и построения диаграмм направленности излучателей в условиях наличия отражений от различных объектов и подстилающей поверхности в зоне измерений.

Личный вклад автора состоит в разработке и проведении теоретических и экспериментальных исследований, а также анализе полученных результатов. Результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора на этапах постановки задач и разработки экспериментальных и теоретических методов для их решения, обработки полученных данных и написании публикаций.

Апробация работы. Основные материалы по всем разделам диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами (г. Саратов, 2016);

- Международной научно-технической конференции «Антенны и распространение радиоволн» (г. Санкт-Петербург, 2019);

- XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI Международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2015-2021 гг.);

- Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2020);

- Международной научно-технической конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2020);

- Научном форуме «Телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021» (г. Самара, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК – 5, из них 2 – в изданиях, индексируемых в Scopus, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 98 наименований. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, 48 рисунков.

ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ.

1.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Измерение характеристик излучателей во временной области основано на воздействии на излучатель негармонического сигнала. Обычно под таким сигналом понимают импульс прямоугольной или колоколообразной формы малой длительности, в идеализированном случае – дельта-импульс [4, 12, 13, 18, 39]. Такой подход позволяет на приемнике зарегистрировать финитный во времени сигнал, а затем с помощью преобразования Фурье оценивать его спектральные компоненты. Очевидно, что используемый импульс должен обладать достаточной шириной спектра для перекрытия всей рабочей полосы излучателя, что, в свою очередь, накладывает ограничения на его длительность. Обладая знанием о временных формах возбуждающего сигнала и сигнала регистрируемого приемником, можно смоделировать импульсную характеристику системы математическими методами. Задача нахождения импульсной характеристики неустойчива и требует регуляризации. Поэтому наилучшим вариантом, с точки зрения простоты обработки результатов, является формирование такого возбуждающего импульса, при котором на приемнике регистрировался бы сигнал, схожий с импульсной характеристикой радиоканала.

В настоящей главе будет представлено условие для параметров воздействующих импульсов, при выполнении которого на приемнике будет регистрироваться сигнал, совпадающий с импульсной характеристикой системы, а также проведена экспериментальная проверка сформулированного условия.

Упрощенно систему «излучатель – радиотрасса – приемная антенна» можно представить как пассивный четырехполюсник. Импульсная характеристика есть реакция системы на воздействие дельта импульса. Однако, дельта-импульс в общем случае является математической абстракцией, не реализуемой на практике. В работе показано, что при возбуждении излучателя сверхкороткими импульсами

излученный сигнал, с достаточной степенью точности, совпадает с импульсной характеристикой радиоканала. Для антенн ОВЧ и УВЧ диапазонов таким возбуждающим импульсом может быть импульс субнаносекундной длительности.

Рассмотрим простой случай возбуждения полосового фильтра с импульсной характеристикой, включающей в себя несколько периодов центральной частоты [44]. Для определенности будем считать, что число периодов равно 3. Тогда импульсную характеристику (ИХ) можно записать в виде:

$$h(t) = \frac{\omega_0}{3\pi} \sin \omega_0 t \cdot H(t)H\left(\frac{6\pi}{\omega_0} - t\right),$$

где $H(t)$ – ступенчатая функция Хевисайда. Ввиду невозможности применить описание аналитическими сигналами [4], воспользуемся представлением сигналов в виде вещественных функций. Согласно общей теории цепей [45] сигнал на выходе пассивного фильтра при входном сигнале вида $x(t) = A \cdot H(t)H(\tau - t)$, где τ – длительность импульса, при $\tau < 6\pi/\omega_0$ будет выглядеть как

$$y(t) = \int_{-\infty}^t A \cdot H(\zeta)H(\tau - \zeta)h(t - \zeta)d\zeta.$$

Рассмотрим классическую постановку задачи генерации радиоимпульса методом ударного возбуждения, описанную в работе [46]. Под ударным возбуждением понимают воздействие на систему сигнала длительностью много меньшей длительности ее импульсной характеристики. В таком случае можно применить некоторые упрощения, в частности функция $h(t)$ становится медленно меняющейся на интервале $[0, \tau]$, то тогда $y(t) = \text{const} \cdot h(t)$. При этом условии ограничение на длительность входного импульса составит $\tau < 57$ пс, $1/\tau = 17.5$ ГГц, при $\omega_0 = 2.5\pi$ ГГц

При увеличении длительности, приближения, описанные выше, теряют силу, и выходной сигнал будет представлен в виде:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t A \cdot H(t-\zeta)H(t-\tau+\zeta) \frac{\omega_0}{3\pi} \sin \omega_0 \zeta \cdot H(\zeta)H\left(\frac{6\pi}{\omega_0}-\zeta\right) d\zeta,$$

$$y(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ \frac{A}{3\pi} (\cos \omega_0 t - 1), 0 < t < \tau \\ -\frac{A}{3\pi} \sin \frac{\omega_0 \tau}{2} \sin \omega_0 \left(t + \frac{\tau}{2}\right), \tau < t < \frac{6\pi}{\omega_0} + \tau \\ 0, \frac{6\pi}{\omega_0} + \tau < t \end{cases}$$

Аналогичные рассуждения можно провести и для реального сигнала, модель которого представлена в работе [47] и записывается как

$$x(t) = \frac{A}{\pi} \left(\frac{t}{\tau}\right)^n \left[M^{m+1} e^{-\frac{Mt}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1.1)$$

где n, m, M – параметры, определяющие форму сигнала, τ – длительность импульса по уровню 0.5. При параметрах $n=2, m=2.1, M=10$ получаемый сигнал имеет наибольшую схожесть с выходным сигналом генератора сверхкоротких импульсов, используемого в следующих главах. На рис. 1.1 непрерывной черной линией изображен сигнал генератора, а сигнал вида (1.1) показан красной пунктирной линией. В дальнейшем будем называть сигнал вида (1.1) реальным сигналом.

Для анализа отклика системы на возбуждающий импульс используем в качестве параметра эффективную длительность, определенную, например, в работе [48]. Эффективная длительность сигнала описывается следующим выражением:

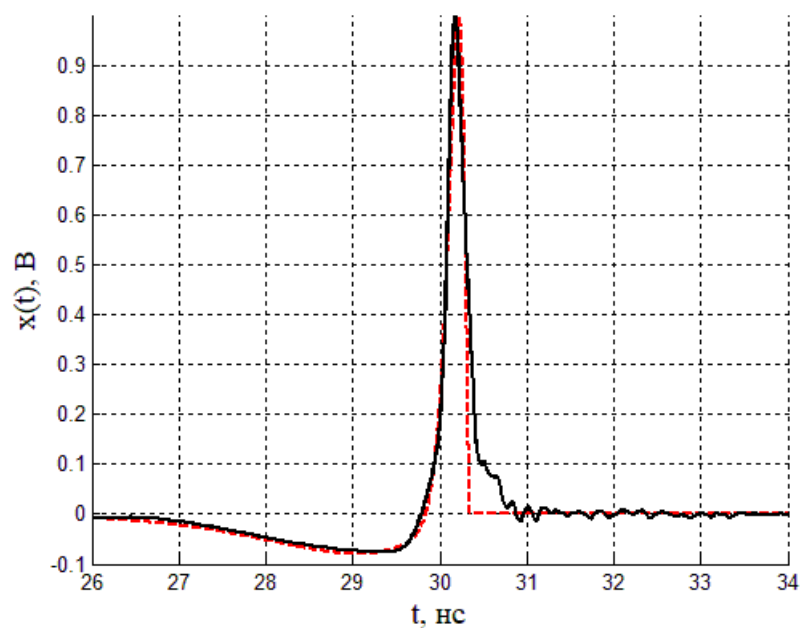


Рис. 1.1. Нормированные сигналы: черным сплошным - с генератора сверхкоротких импульсов, красным штриховым - сигнал вида (1.1).

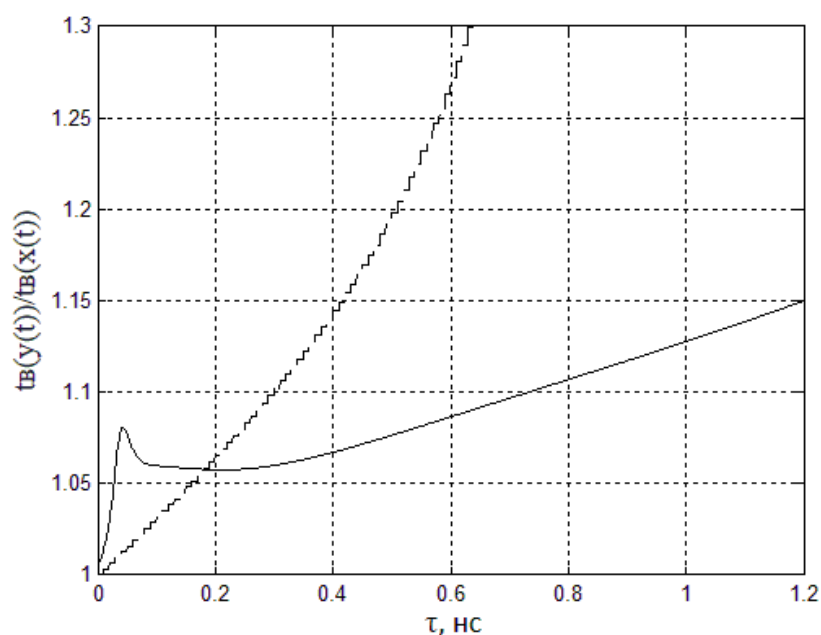


Рис. 1.2 Отношение эффективной длительности отклика системы $t_e(y(t))$ к эффективной длительности импульсной характеристики $t_e(x(t))$ в зависимости от длительности τ возбуждающего импульса для реального сигналов (сплошная линия) и прямоугольного импульса (пунктирная линия)

$$t_e = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t^2 s^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt}}, \quad (1.2)$$

где $s(t)$ –временная функция напряжения. Будем считать, что пока эффективная длительность сигнала $y(t)$ не превышает более, чем на 10 % эффективную длительность импульсной характеристики $h(t)$, сигналы $y(t)$ и $h(t)$ являются эквивалентными с точностью до постоянного множителя. Величина 10 % является общепринятой в обобщениях подобного рода, например дальняя зона антенны также определяется как удаление, на котором фазовый набег лучей от разных ее концов не превышает 10 %. Назовем это критерием соответствия принятого сигнала импульсной характеристике по эффективной длительности.

На рис. 1.2 представлена зависимость отношения эффективных длительностей сигналов $y(t)$ к $h(t)$ от длительности τ возбуждающего импульса. Сплошной линией показана зависимость для реального сигнала вида (1.1), пунктирной – для прямоугольного импульса. При воздействии прямоугольного видеоимпульса кривая растет монотонно в рассматриваемом интервале τ . При воздействии же сигнала вида (1.1) наблюдается локальный экстремум вблизи 70 пс. Его наличие связано с различной длительностью переднего и заднего фронтов импульса (1.1). При длительностях меньше 70 пс передний и задние фронты являются достаточно острыми и импульс можно считать симметричным. С ростом длительности импульса проявляется несимметричность переднего и заднего фронта и присутствие переходных процессов, что приводит к локальному минимуму, а также к менее крутому росту в дальнейшем. Переход через пороговые 10 % происходит при длительностях 750 пс и 300 нс соответственно для реального сигнала и прямоугольного, что составляет 0,3 и 0,12 от длительности импульсной характеристики.

Таким образом, необходимое условие для фиксации на приемнике сигнала, равному импульсной характеристике системы можно сформулировать следующим образом: длительность возбуждающего импульса не должна превышать величины ν от длительности импульсной характеристики системы. При этом ν зависит от формы импульса: для прямоугольного $\nu = 0,12$, для импульса вида (1.1) $\nu = 0,3$.

Рассмотрим коэффициент полезного действия (КПД) системы, рассчитанный как отношение энергии выходного импульса к энергии входного. Управлять амплитудой отклика, при фиксированной амплитуде возбуждающего импульса, можно с помощью изменения его длительности.

На рис. 1.3 изображены КПД системы при воздействии на нее прямоугольным сигналом и вида (1.1). При $\tau < 57$ пс (критерий ударного возбуждения) КПД не превысит 4 % для прямоугольного импульса и 5 % для сигнала реального вида. Для обоих типов сигнала наблюдается глобальный максимум КПД. Этот максимум расположен при длительностях прямоугольного импульса около 300 пс, что является наибольшей возможной длительностью для сохранения соответствия, по критерию 10 %, отклонения эффективной длительности отклика от ИХ. Аналогичная картина и для сигнала вида (1.1): КПД системы уменьшается при невыполнении критерия по эффективной длительности, однако экстремум расположен при меньших значениях $\tau = 400$ пс, что составляет примерно 0,15 от длительности импульсной характеристики.

Таким образом, можно сформулировать необходимое и достаточное условие для возбуждающего импульса, при выполнении которого отклик системы на воздействующий сигнал будет совпадать с импульсной характеристикой системы: длительность возбуждающего импульса не должна превышать величины ν от длительности импульсной характеристики системы для заданного критерия.

При этом длительность импульса, в пределах рассматриваемых значений, при необходимости, может быть выбрана наибольшей для максимизации амплитуды отклика.

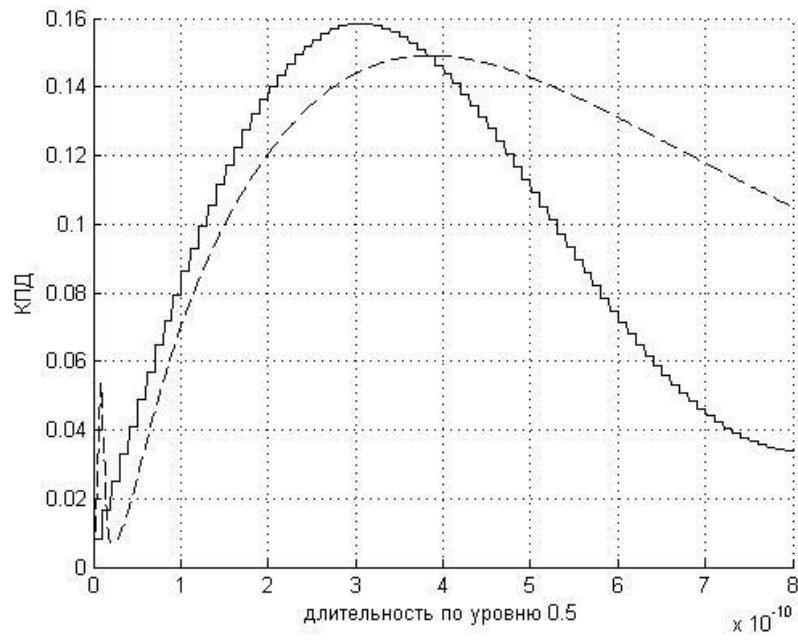


Рис. 1.3 КПД системы для прямоугольного импульса (пунктирная линия) и сигнала вида (1.1) (непрерывная линия)

1.2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.2.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведена проверка полученного в п.1.1 необходимого условия экспериментально. Для этого сигналом (1.1) возбуждали несколько излучателей, причем их геометрические размеры превышали пространственный размер импульса ct , что гарантировало выполнение условия $v < 0,3$ для длительности возбуждающего импульса. В качестве исследуемых излучателей выбраны: симметричный вибратор, биконический и рупорные излучатели. Симметричный вибратор выбран как наиболее рассмотренный в литературе, биконический излучатель как вариант вибратора, но с хорошим согласованием в широкой полосе частот, а рупорный излучатель в качестве примера направленной антенны. Оценено отличие отображаемого на экране осциллографа сигнала от импульсной характеристики канала «излучатель – среда распространения - приемная антенна».

Во всех проводимых экспериментах в настоящей работе оцениваться будет импульсная характеристика радиоканала «излучатель - среда распространения - приемная антенна», поскольку невозможно выделить импульсную характеристику излучателя из него в силу отсутствия других детекторов поля. Таким образом, приемная антенна, как и радиотрасса, всегда будет влиять на получаемые результаты. Для минимизации этого влияния можно воспользоваться двумя подходами. Первый состоит в том, чтобы приемная антенна была идентична исследуемому излучателю. Второй подход состоит в том, чтобы полоса пропускания приемной антенны превосходила полосу излучателя и имела постоянный коэффициент усиления в рассматриваемом диапазоне частот. Такими антеннами могут быть логопериодические структуры, самоподобные излучатели (фрактальные), т.н. «детекторы поля» (электрически короткие компактные антенны с неизменными от частоты параметрами) или иные частотнонезависимые антенны.

В настоящей работе использовалась сверхширокополосная измерительная логопериодическая антенна с постоянным коэффициентом усиления.

Основными параметрами будем считать эффективную длительность сигнала, описываемую выражением (1.2) и энергию сигнала.

Энергия сигнала $s(t)$ описывается следующим образом:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt \quad (1.3)$$

В настоящей работе рассмотрено возбуждение с помощью видеоимпульсов субнаносекундной длительности: (а) - биконического излучателя, (б) - симметричного вибратора и (в) - рупорного излучателя, блок 1 (рис.1.3). Регистрируемый на осциллографе сигнал сравнивается с импульсной характеристикой канала по параметрам (1.2) и (1.3). Если отличие не превышает 10 %, то делается вывод о совпадении сигнала на осциллографе с импульсной характеристикой системы. Для измерений собрана установка, схема которой изображена на рис. 1.3 [49-52]. Расстояние между мачтами 15 м, высота 4 м. Поляризация излучения - горизонтальная.

(а) - используемый биконический излучатель описан в работе [53]. Высота конуса 115 мм, наибольший диаметр 260 мм. Технологически излучатель изготовлен из медной фольги, закрепленной на пластиковом каркасе. Каркас изготовлен с помощью 3D печати. Питание осуществлялось жестким коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом. Также было предусмотрено крепление диэлектрической линзы, описанной в работе [54].

(б) - используемый симметричный вибратор имел следующие параметры: длина плеча 1100 мм, резонансная частота 70 МГц. Питание излучателя проводилось без симметрирующего устройства напрямую коаксиальным кабелем – центральный проводник соединялся с одним плечом вибратора, внешний – с другим.

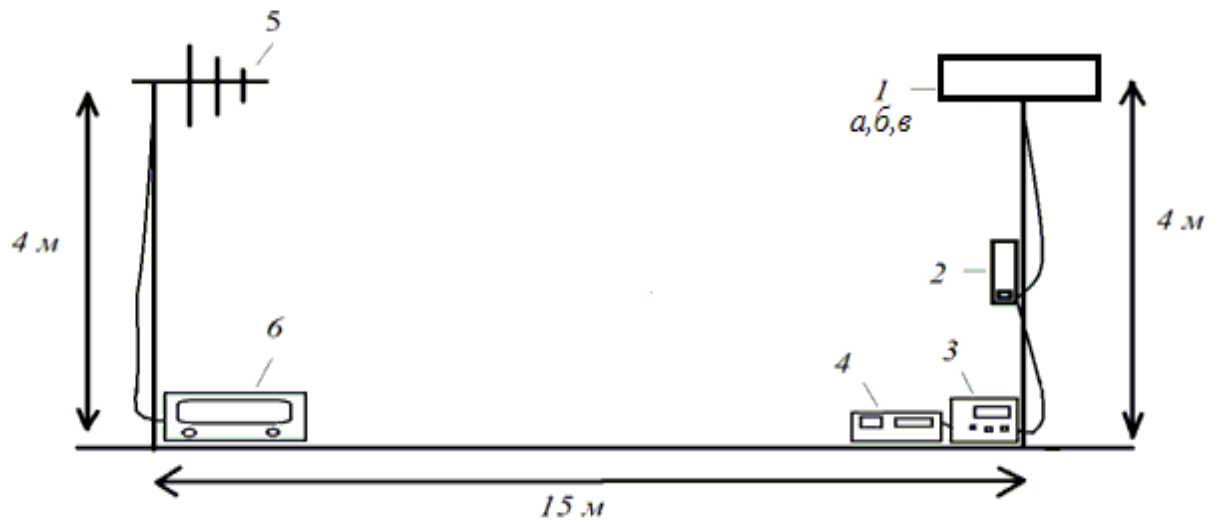


Рис. 1.3 Схема экспериментальной установки

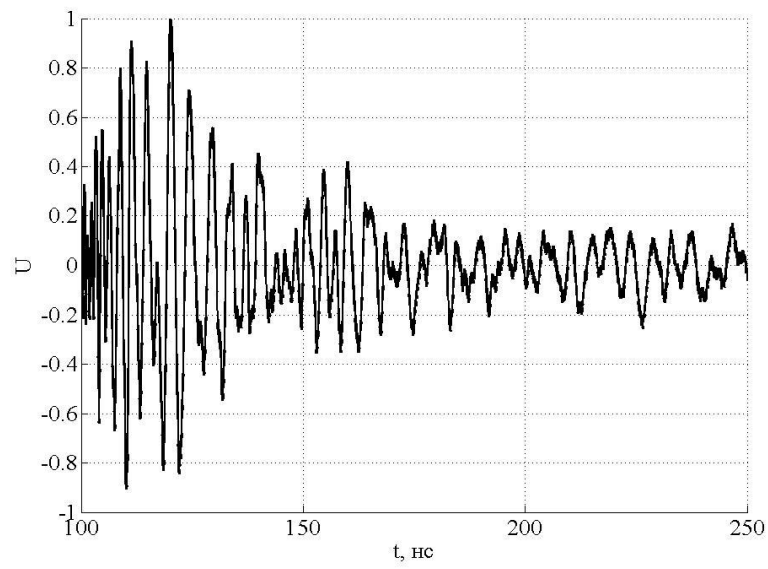
(в) - рупорный излучатель был изготовлен по методике, описанной в [2] и имеет рабочий диапазон от 100 МГц до 800 МГц.

Излучатели возбуждались генератором импульсов 2, подробно описанным в работах [55-59] с длительностью выходного импульса 250 пс, закрепленным на диэлектрической мачте на расстоянии 0,8 м от излучателя. Соединение между ним и генератором было выполнено кабелем РК-50-4-21 ГОСТ 11326.37-39. Выходной сигнал с генератора показан на рис. 1.1. Его форма описана выражением (1.1).

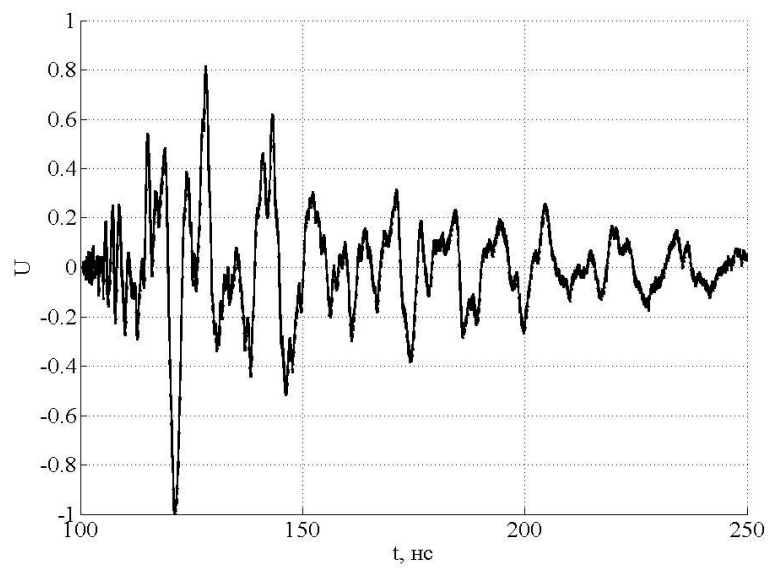
Генератор запускающих импульсов (ЗИ) 3, Agilent 91104A, располагался у подножия мачты вместе с источником питания 4, Mastech NY3005M2. Запускающий импульс длительностью 20 нс и амплитудой 7,3 В, поступал на генератор импульсов по кабелю РК-50-4-21 длиной 4 м. В качестве приемной антенны 5 использовалась измерительная логопериодическая антенна с горизонтальной поляризацией ETS-Lindgren Model 3142D. К ней, с помощью кабеля РК-50-4-21 ГОСТ 11326.37-39 длиной 6 м, был подсоединен стробоскопический осциллограф 6, с полосой пропускания 20 ГГц, Agilent DCA-X 86100D, расположенный у основания мачты. Осциллограф регистрировал принятый сигнал.

1.2.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1.4 изображены примеры сигналов, принятых осциллографом на приемной антенне. В полосу приема также попадает множество узкополосных помех от внешних источников, наиболее мощными и устойчивыми из которых, являются сигналы вещательных радиостанций, в полосе от 90 до 110 МГц, сигналы телевидения 200 и 450 МГц, сигналы GSM-сети в диапазоне от 950 до 1000 МГц и от 1900 до 2000 МГц, а также сигналы Wi-Fi и мобильного интернета, в диапазоне частот от 2300 до 2400 МГц. Рассмотрение сигнала во временном окне, содержащим основные колебания, значительно меньшем, чем период



а)



б)

Рис. 1.4 Нормированные осциллограммы сигналов: а - биконического излучателя,
б – симметричного вибратора

повторения импульсов, позволяет минимизировать накопление энергии помех и снижает их влияние при обработке результатов.

Покажем, что принятый сигнал является импульсной характеристикой канала (излучатель – среда распространения – приемная антенна). Определим ИХ канала по известному сигналу генератора и сигналу на осциллографе, прошедшему через радиотрассу. Нахождение ИХ - некорректная задача с малой устойчивостью, поэтому для ее повышения воспользуемся регуляризацией по Тихонову [60]. Регуляризация решения состоит в построении семейства обратных операторов, зависящих от некоторого числового параметра α , называемого параметром регуляризации. Каждый оператор дает решение корректной задачи, причем, при стремлении параметра α и ошибки исходных данных к нулю, решение корректной задачи стремится к истинному решению некорректной задачи.

Иначе говоря, если в некорректной задаче $Af = g$ вместо точной правой части мы имеем элемент $g_\gamma \in G$, то элемент $f_\gamma \in F$ можно определить с помощью оператора, зависящего от параметра α , значения которых надо брать согласованными с погрешностью у исходных данных g_γ . Эта совместность должна быть такой, что при приближении правой части g_γ к точному значению, приближенное решение f_γ стремилось бы к искомому точному решению f_T . Таким образом, идея регуляризации сводится к поиску такого оператора $R(g, \alpha)$ который, действуя на правую часть уравнения $Af = g$ приводит к решению: $f_\alpha = R(g, \alpha)$, которое не сильно отличается от точного решения. Физический смысл регуляризации, заключается в введении неоднозначности решения, заведомо не превосходящей определенных границ.

Метод регуляризации А. Н. Тихонова сводится, к нахождению регуляризирующих операторов и к определению параметра регуляризации α по дополнительной информации о задаче. Построение регуляризирующих операторов по методу А. Тихонова основано на вариационном принципе и состоит в следующем. Пусть $\Omega(f)$ – некоторый неотрицательный функционал, определенный на подмножестве F_1 множества F и такой, что для всякого числа $c >$

0 множество $F_{1,c}$ элементов f из F_1 для которого $\Omega[f] \leq c$ является компактом на F_1 . Функционалы $\Omega[f]$, обладающие такими свойствами, называются стабилизирующими функционалами.

Таким образом, приближенное решение исходной задачи заменяется решением другой задачи (задачи на минимум функционала), близкой к исходной при малых значениях погрешности задания правой части g_γ . В то время как исходная задача не обладает устойчивостью к малым изменениям входных данных, задача, с учетом минимизации функционала, обладает этим свойством.

При компьютерной обработке результатов эксперимента регуляризация по Тихонову была реализована следующим образом. Исходными данными для программы являлись наборы отсчетов сигналов с генератора импульсов (входной сигнал) и с приемной антенны (выходной сигнал). Расчет импульсной характеристики проводился в несколько этапов.

При возбуждении системы сверхкоротким импульсом в системе наблюдалось множество переходных процессов, помимо ярко выраженных импульсов большой амплитуды. Для их точной регистрации требовалась дискретизация по времени в 10 пс. Однако, в таком случае, максимальная ширина окна составляет около 160 нс (≈ 16000 отсчетов), что недостаточно для регистрации полного отклика системы с длительностью 300 нс. Для полной регистрации сигнала, с учетом переходных процессов, замеры проводились следующим образом. Сначала выбиралось широкое окно в 400 пс, в котором регистрировался отклик целиком, затем первые 150 нс отклика рассматривались другим окном с дискретизацией в 9 пс. Таким образом, с осциллографа снимался сигнал целиком и его часть, при этом эти реализации имеют разную дискретизацию по времени. Необходимо привести их к единому шагу дискретизации, который, очевидно, должен соответствовать шагу в малом окне. При получении промежуточных значений применялась линейная аппроксимация по соседним отсчетам. Далее непосредственно решалась задача регуляризации,

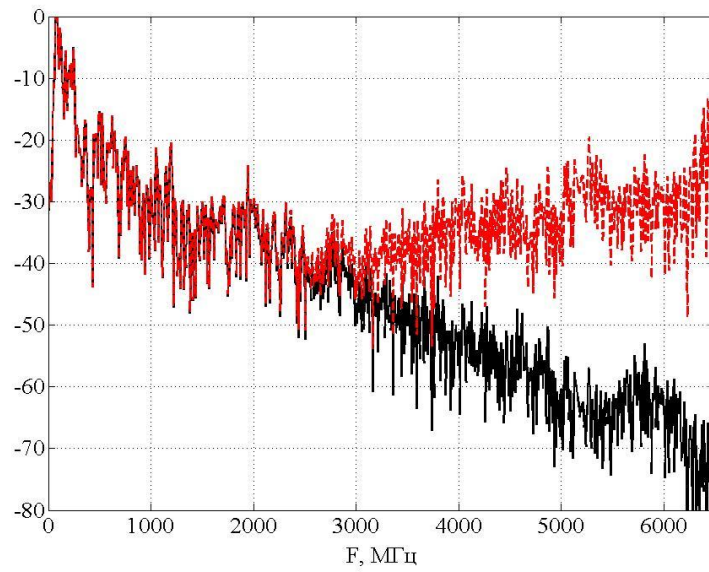


Рис. 1.5 Нормированные спектры сигнала с приемной антенны до регуляризации (красным) и после (черным) при излучении симметричным вибратором

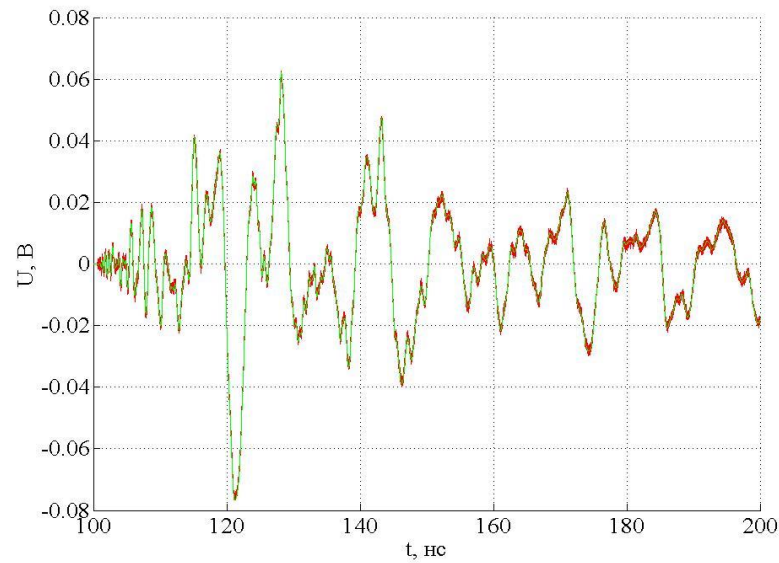


Рис. 1.6 Временная зависимость снятого с осциллографа (красный) и восстановленного по синтезируемой импульсной характеристике (зеленый) сигнала на приемной антенне при излучении симметричным вибратором

при этом подбор оптимального α проводился методом наискорейшего спуска. На рис. 1.5 изображены спектры выходного сигнала до (красным) и после (черным) регуляризации для симметричного вибратора. Для остальных рассмотренных излучателей качественных отличий нет, поэтому для них будут приведены только конечные результаты. Наличие затухания составляющих спектра с увеличением частоты приводит к устойчивости задачи.

На следующем этапе проводился синтез импульсной характеристики и ее оценка. Для этого рассматривалось воздействие входного сигнала на «черный ящик» с рассчитанной импульсной характеристикой. Выходной сигнал «черного ящика» сравнивался с сигналом с приемной антенны. По критерию (1.2) оценивались энергия, амплитуда, эффективная длительность. Максимальное отклонение расчетных значений выходного сигнала от экспериментальных по параметра (1.2) и (1.3), составило не более 4%. Визуализация сравниваемых сигналов приведена на рис. 1.6.

Проведено сравнение эффективной длительности (1.2) и энергии (1.3) синтезированной импульсной характеристики с сигналом, принятым осциллографом, для исследуемых типов излучателей.

Проведено сравнение энергии, определяемой выражением (1.3). Рассмотрим симметричный вибратор. Значения энергии, полученные для симметричного вибратора составляют 6,34 нДж для ИХ и 6,19 нДж для принятого сигнала. Отличие по энергии между синтезированной ИХ и принятым сигналом составляет примерно 3 %. Рисунок 1.7 отображает полученные нормированные на максимум мгновенного значения напряжения ИХ и принятого сигнала.

Рассмотрено соответствие по критерию (1.2). В эффективной длительности переменная времени t входит как весовая функция. Для корректного отображения физических процессов и улучшения отношения сигнал/помеха, максимум весовой функции должен приходиться на момент присутствия сигнала. Для выполнения этого условия проведена коррекция весовой функции, для чего построено распределение энергии сигнала по времени. Из рисунка 1.8 очевидно, что почти

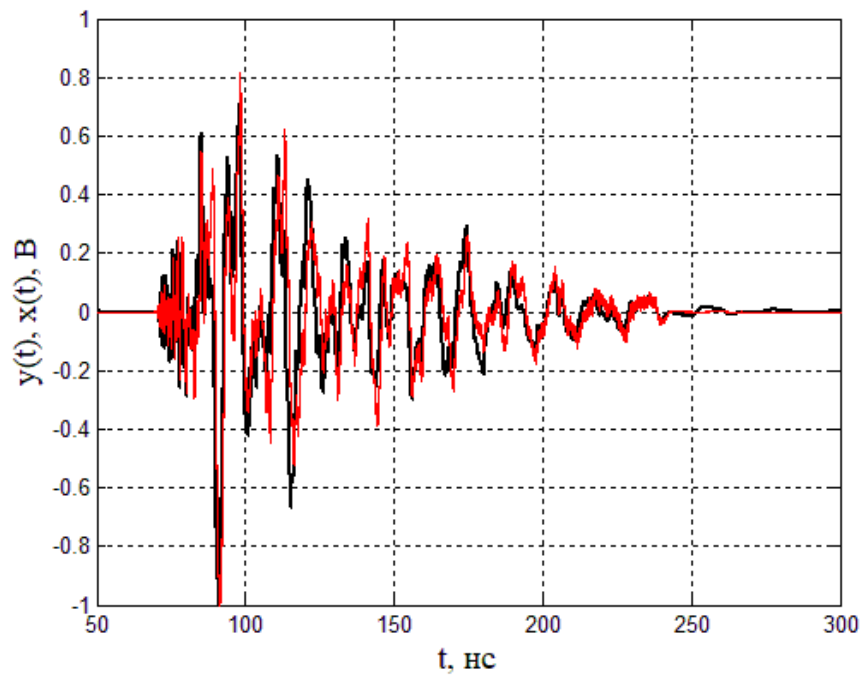


Рис. 1.7. Временные формы нормированных ИХ симметричного вибратора (черный) и принятый сигнал (красный).

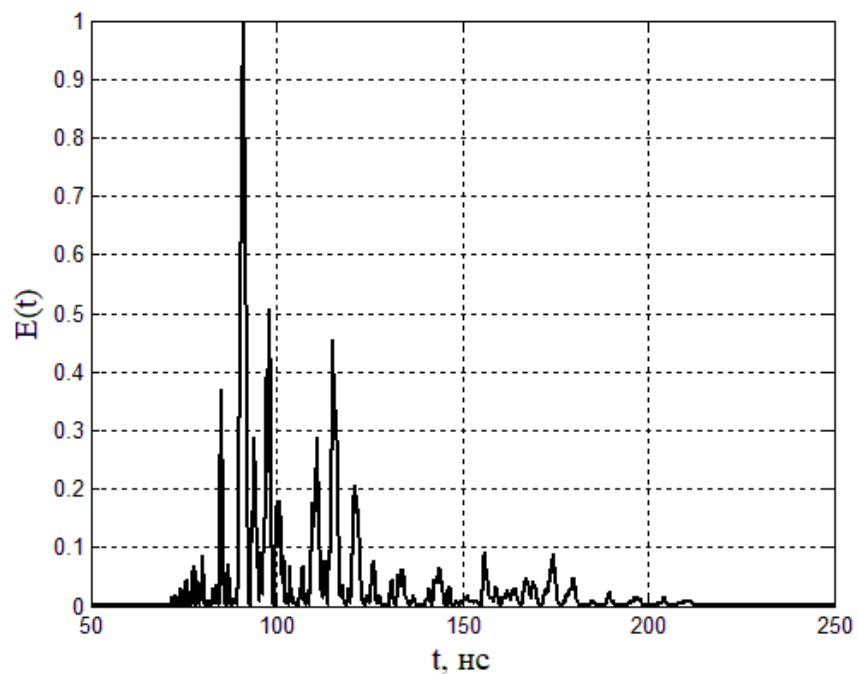


Рис. 1.8. Распределение энергии принятого сигнала по времени при излучении симметричного вибратора.

вся энергия расположена в интервале времени $[80, 100]$ нс, а отрезки $[0, 50]$ нс и $[200, 400]$ нс фактически не содержат энергии. Это дает возможность выбрать длительность окна, в котором сосредоточена основная энергия сигнала, без потери информации о системе. Период следования был уменьшен до значения $T = 150$ нс. Используя свойство периодичности сигналов, импульс перемещен в во временную область вблизи $T/2$. Введена весовая функция эквивалентного времени, принимающая значения от 0 до $T/2$ и от $T/2$ до 0 по линейному закону. Для расчета эффективной длительности использовано эквивалентное время, вместо обычного. Таким образом, максимум весовой функции приходится на импульс, а влияние шумов и помех уменьшается.

Рассчитанная эффективная длительность по эквивалентному времени составляет 55 нс для синтезированной ИХ, и 53 нс для принятого сигнала. Отличия между значениями эффективной длительности ИХ и принятого сигнала составляет около 4 %.

Таким образом, энергия и эффективная длительность ИХ и зарегистрированного сигнала отличаются соответственно на 3 и 4 %, что позволяет считать зарегистрированный сигнал импульсной характеристикой системы.

Аналогичные вычисления проведены для биконического излучателя. Значения энергии составляют около 8,92 нДж для ИХ и 8,78 нДж для принятого сигнала. Отличие между ИХ и принятым сигналом по энергии равно 2 %. Согласно выражению (1.2), получаем эффективную длительность 95 нс для ИХ, и 99 нс для принятого сигнала. Отличие по эффективной длительности равно 5 %. На рис. 1.9 показаны нормированные на максимум мгновенного значения временные формы принятого сигнала и ИХ биконической излучателя. На рисунке 1.10 построена зависимость распределения энергии принятого сигнала по времени.

Для рупорного излучателя, значения энергии равны 1,57 нДж для ИХ и 1,65 нДж для принятого сигнала. Отличие значений энергии составляет 6 %.

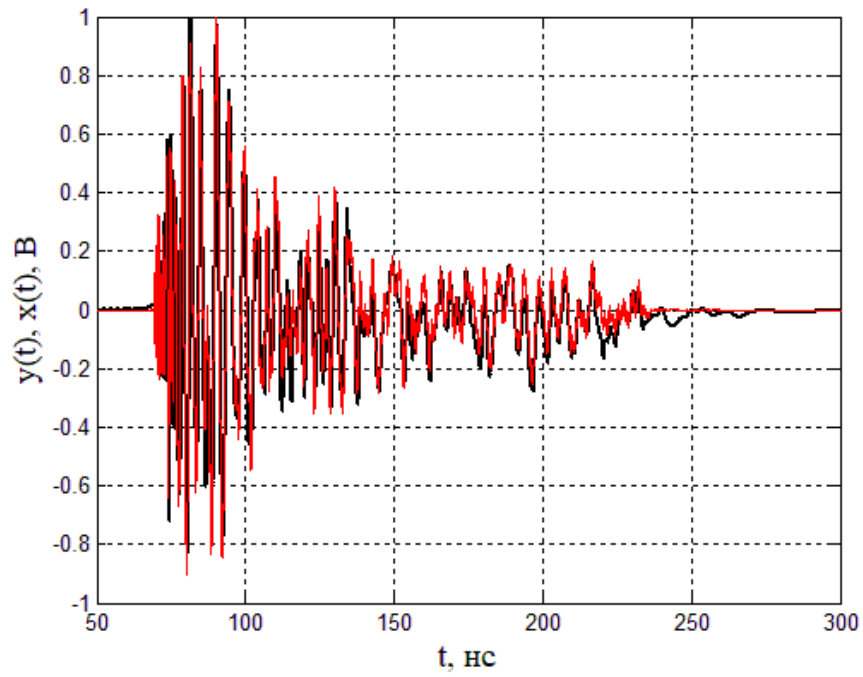


Рис. 1.9 Временные формы нормированных ИХ биконического излучателя (черный) и принятый сигнал (красный).

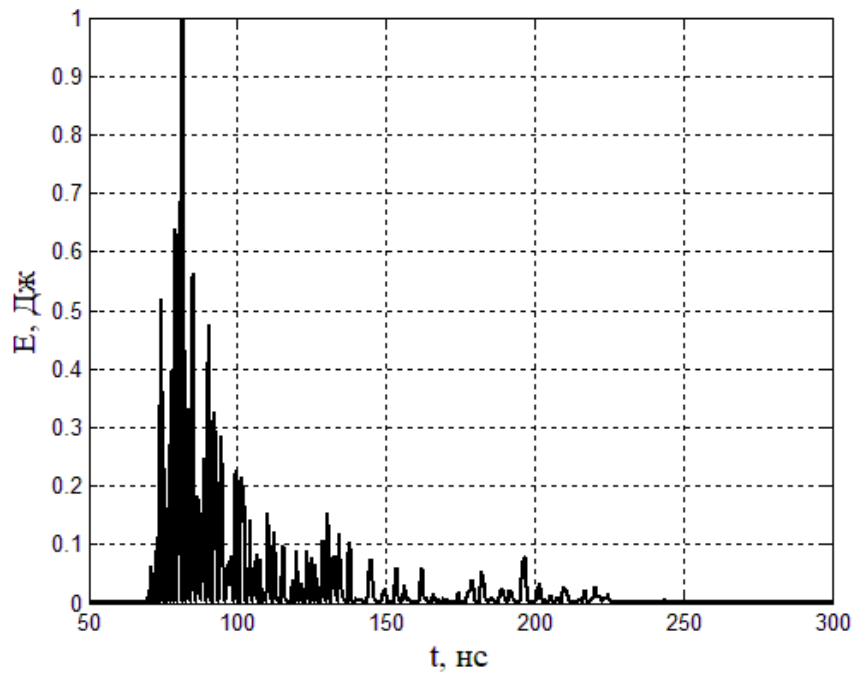


Рис. 1.10 Распределение энергии сигнала по времени.

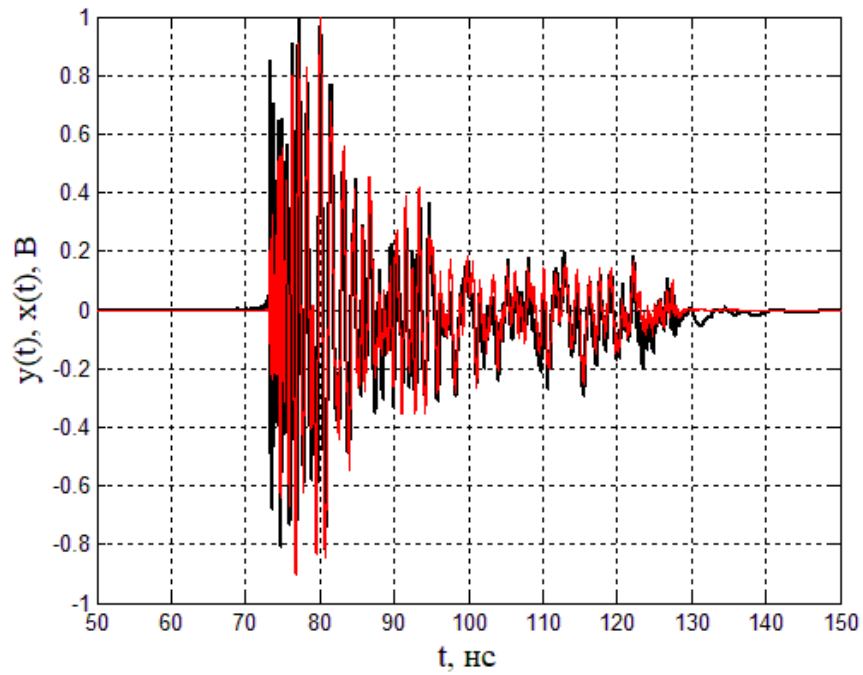


Рис. 1.11 Временные формы нормированных ИХ рупорного излучателя (черный) и принятый сигнал (красный).

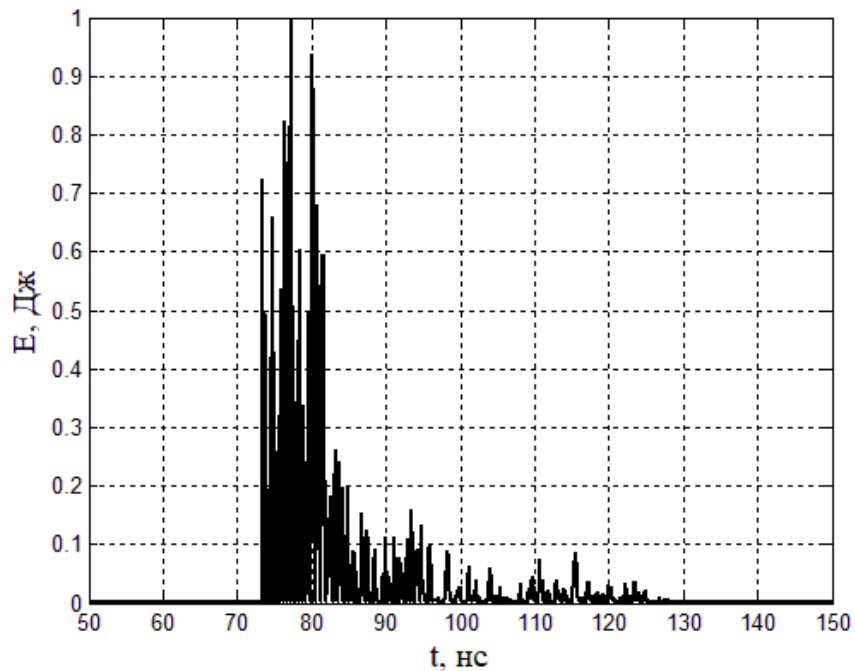


Рис. 1.12 Распределение энергии сигнала по времени.

Эффективная длительность равна 22 нс для ИХ и 24 нс для принятого сигнала. Отличие по эффективной длительности составляет 7 %. На рис. 1.11 изображены, нормированные на максимум мгновенного значения, временные формы ИХ и принятого сигнала. На рис. 1.12 приведено распределение энергии принятого сигнала во временном окне.

Таким образом, для всех типов излучателей, отличие значений энергии импульсной характеристики и значений энергии принятого сигнала составило не более 6 %, а отличие эффективной длительности импульсной характеристики от эффективной длительности зарегистрированного осциллографом сигнала составило не более 7 %. Если считать порогом расхождения величину, равную 10 %, как указано в п.1.1, то зарегистрированные осциллографом характеристики сигналов эквивалентны импульсным характеристикам системы для всех типов рассматриваемых излучателей.

1.3 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА.

Экспериментально покажем корректность зависимости КПД системы от длительности импульса, изображенной на рис. 1.2. Блок-схема измерений приведена на рис. 1.13. Возбуждающий импульс формировался на генераторе (ГИ), который описан работах [58, 59]. Возбуждаемый полосовой фильтр (ПФ) имеет центральную частоту пропускания 1250 МГц (что соответствует $\omega_0=2.5\pi$ ГГц) и полосой пропускания 500 МГц по уровню минус 10 дБ. Особенностью генератора (ГИ) является отсутствие протекания тока через диод с накоплением заряда в режиме ожидания запускающего импульса, поэтому потребление энергии происходит только в период генерации и релаксации, что при малой частоте повторения (скважность более 10) значительно снижает среднее потребление тока. С выхода генератора сверхкороткий видеоимпульс подавался через делитель на полосовой фильтр и, дополнительно, через аттенюатор 20дБ на осциллограф Rohde&Schwarz RTO 1022 (O). На второй вход

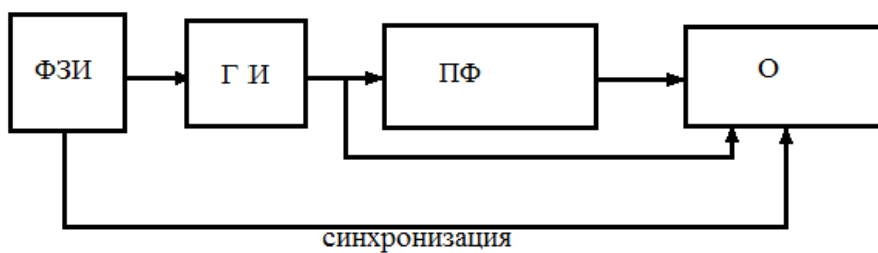


Рис.1.13 Блок-схема эксперимента по проверке КПД

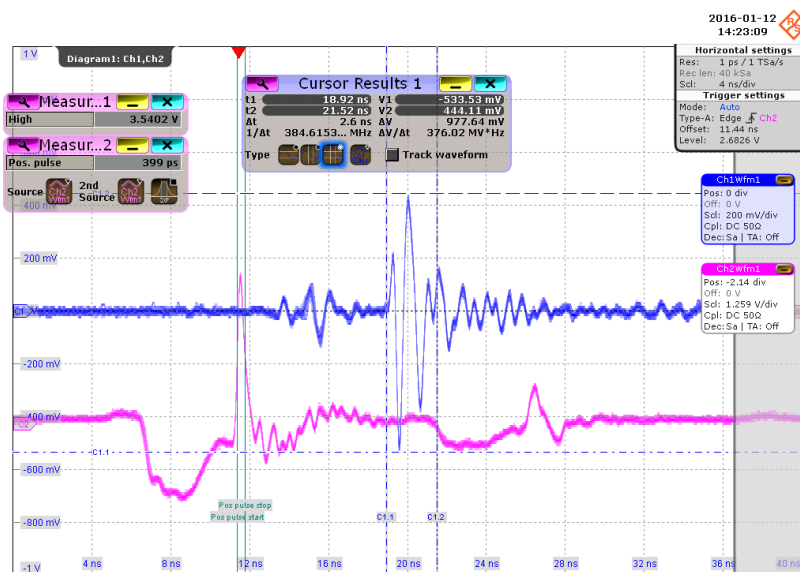


Рис.1.14а Осциллограммы возбуждающего импульса длительностью 400 пс (внизу) и выходного сигнала (вверху)

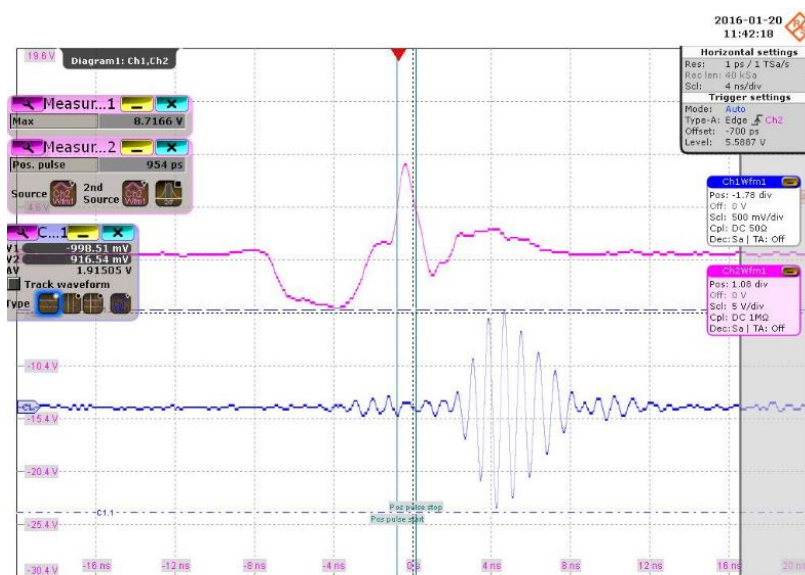


Рис. 1.14б Осциллограммы возбуждающего импульса длительностью 900 пс (вверху) и выходного сигнала (внизу)

осциллографа поступал сигнал с выхода полосового фильтра. Длительность видеоимпульса варьировалась в пределах от 180 до 1200 пс с шагом 20 пс. Запуск генератора (ГИ) и синхронизацию системы обеспечивал формирователь импульсов (ФИ) Agilent 91104A.

При увеличении длительности импульса в пределах 180..400 пс КПД системы возрастал и достиг максимума при длительности возбуждающего импульса 400 пс. На рис. 1.14а приведены осциллограммы входного возбуждающего импульса с длительностью 400 пс и выходного сигнала. КПД системы в данном случае составил 0.14. Дальнейшее увеличение длительности запускающего СКИ приводит к снижению КПД системы. Так на рис. 1.14б, при длительности запускающего импульса 954 пс, наблюдалось изменение формы выходного сигнала и падение КПД системы до величины менее 0.1. Полученные экспериментальные результаты, связанные со снижением эффективности и изменением формы сигнала, при длительностях запускающего импульса больших оптимальной, подтверждают верность соотношений, приведенных в п.1.1. Аналогичные рассуждения можно провести и для случая возбуждения антенны. При этом полученные закономерности изменения КПД системы от длительности сохраняются [61].

Таким образом, регистрация импульсной характеристики канала на приемном устройстве возможна при соблюдении ограничения на длительность возбуждающего сверхкороткого импульса. Для конкретной системы длительность возбуждающего импульса не должна превышать величины ν от длительности импульсной характеристики системы.

Такой подход позволяет уточнить параметры и свойства этого класса сигналов, наделить его универсальностью по отношению к частотным диапазонам, не привязывая к абсолютным значениям ширины полосы или длительности импульса. Соответствие регистрируемого сигнала импульсной характеристике системы можно использовать, например, при анализе диаграмм направленности излучателей, поиску резонансных частот и др. В дальнейших разделах данной работы СКИ будет основным возбуждающим сигналом.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Определено необходимое и достаточное условие для соответствия отклика системы ее импульсной характеристике: если длительность возбуждающего импульса составляет некоторую долю, размер которой зависит от формы, или менее от длительности импульсной характеристики системы, импульса, то отклик системы с точностью до постоянного множителя будет равен ее импульсной характеристике.

2. Экспериментально показано, что при возбуждении системы сверхкороткими импульсами на приемнике регистрируется импульсная характеристика системы.

3. Выявлено, что при соответствии возбуждающего импульса критерию по длительности, максимальная энергия отклика системы достигается при максимальной длительности возбуждающего импульса. Однако, при несоответствии условию по длительности, амплитуда и энергия начинают уменьшаться, а форма отклика изменяться.

ГЛАВА 2. КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ДВИЖУЩИМСЯ ЗАРЯДОМ. ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1 АНАЛИЗ ПОЛЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА, ВОЗБУЖДЕННЫМ ТОКОМ В ВИДЕ ДЕЛЬТА ИМПУЛЬСА

Время излучения антенны зависит только от длительности поданного сигнала и ее импульсной характеристики (ИХ). При импульсном характере возбуждающего сигнала время излучения становится ограниченным по времени, так как ИХ антенны, а точнее канала «антенна – среда распространения – антенна» так же является ограниченным по времени. Таким образом, можно все характеристики излучения зафиксировать в некотором временном окне, если известна импульсная характеристика канала и возбуждающий импульс. Согласно данным, полученным в главе 1, при использовании сверхкоротких импульсов достаточно только регистрировать об импульсной характеристике для корректной локализации отклика системы.

В настоящей главе рассмотрены анализ излученного поля при заданной геометрии излучателя и синтез проволочного излучателя по заданному полю с помощью модели сосредоточенного заряда. Также предложена методика оценки длительности импульсной характеристики излучателя, основанная на этой модели.

Будем считать, что приёмная антенна обладает значительно большей полосой пропускания. В таком случае ее вкладом можно пренебречь и длительность импульсной характеристики канала определяется только исследуемым излучателем.

Для оценки ИХ канала желательно иметь быстрый приближенный метод расчета для корректного определения параметров окна. В работах [9, 16-17, 19-28, 31, 33, 36, 38-39] приведены различные подходы, используемые при рассмотрении излучения антенн во временной области, такие как метод последовательной решетки, метод сосредоточенного заряда, метод параболического уравнения и др.

При этом целевым параметром является длительность излученного сигнала. Рассмотрим метод сосредоточенного заряда, впервые описанный в работе [39].

В основе подхода лежит предположение о том, что если длина импульса, равная произведению длительности на скорость света в среде, много меньше апертуры антенного элемента, то при подаче его на вход антенны возникающее возбуждение сосредоточено на одном или нескольких локальных участках антенны. При излучении возбуждающие токи малых пространственных размеров последовательно возбуждают разные локальные участки проводников. Представим перемещающиеся токи малых пространственных размеров движущимися сосредоточенными зарядами. Тогда поле излучения антенны можно заменить суммой полей, создаваемых этими зарядами.

На рис. 2.1а показано примерное расположение силовых линий вокруг проводника в некоторый момент времени. Электрическое поле E отлично от нуля на небольшом участке проводника. По нормальной составляющей поля $E_n(t)$ можно рассчитать поверхностную плотность заряда $\sigma_{пов}$:

$$\sigma_{пов} = \varepsilon E_n(t)$$

Для тонких проводников поверхностную плотность заряда можно заменить зависимостью линейной плотности заряда ρ от продольной координаты l . рис. 2.1б.

На рис. 2.1в показан сосредоточенный заряд q , введенный взамен распределенного, и движущийся вдоль проводника с некоторой скоростью $v(t)$. Будем считать, что поле излучения сосредоточенного заряда близко к истинному полю $\vec{E}(\vec{r}, t)$, изображенного на рис. 2.1а.

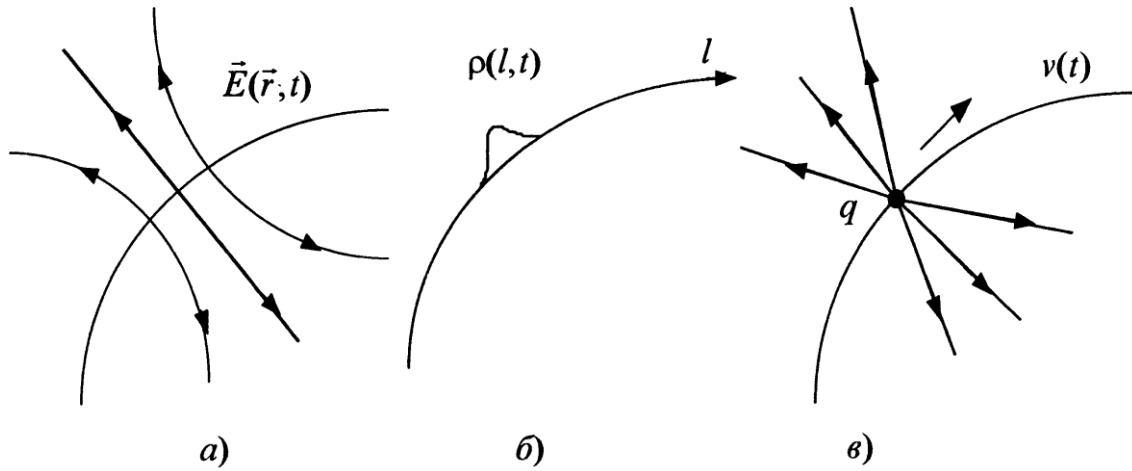


Рис. 2.1 Зарядовая модель антенны: а — силовые линии поля вблизи проводника, возбужденного импульсным сигналом; б — зависимость плотности заряда на проводнике от продольной координаты; в — поле сосредоточенного заряда, заменяющего распределенный

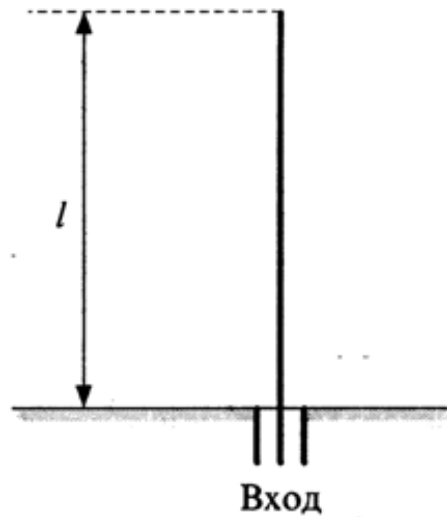


Рис. 2.2 Модель несимметричной вибраторной антенны

Пусть заряд q движется по некоторой траектории, определяемой зависимостью вектора $\vec{r}(t)$. Вектор $\vec{r}(t)$ проведен из точки наблюдения в точку расположения заряда.

Зависимость напряженности \vec{E} электрического поля в точке наблюдения от времени t определяется выражением

$$E(t) = \frac{q}{4\pi\varepsilon} \left[\frac{\vec{e}(t)}{r^2(t)} + \frac{r(t)}{c} \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{e}(t)}{r^2(t)} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{e}(t)}{dt^2} \right], \quad (2.1)$$

где $\vec{e}(t) = \frac{\vec{r}(t)}{r(t)}$ — единичный вектор, c — скорость света в вакууме, ε —

диэлектрическая проницаемость среды (для вакуума $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$).

Выражение (2.1) довольно громоздкое, и непосредственные вычисления по ней оказываются сложными. Поэтому рассмотрим приближение, которое можно получить при условии, что точка наблюдения находится далеко от траектории (приближение дальней зоны). В этом случае можно пренебречь первыми двумя членами выражения (2.1), убывающими как R^{-2} . Тогда в (2.1) остается только последний член, убывающий как R^{-1} , определяющий поле излучения в дальней зоне.

В декартовой системе координат составляющие вектора напряженности электрического поля движущегося заряда в точке наблюдения, находящейся на оси z , будут описываться следующими соотношениями [62]:

$$\begin{aligned} E_x(t) &= -\frac{\mu_0 q}{4\pi R} \frac{d^2 x(t)}{dt^2}; \\ E_y(t) &= -\frac{\mu_0 q}{4\pi R} \frac{d^2 y(t)}{dt^2}; \\ E_z(t) &= 0, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\mu_0 = \varepsilon^{-1}c^{-2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; $x(t)$ и $y(t)$ – зависимости координат заряда от времени (уравнения траектории), R – расстояние до точки наблюдения. Время t – время в точке наблюдения, и τ – время в точке излучения, и они связаны следующим соотношением: $t = \tau + \frac{R}{c}$.

Таким образом, поле излучения определяется траекторией движения заряда. Рассмотрим движение заряда по тонкому несимметричному вибратору (монополью) длиной l (рис. 2.2).

Возбуждающий сосредоточенный заряд движется от фидерной линии до конца вибратора, отражается и продолжает движение в обратном направлении. При этом моменты возбуждения и поглощения заряда питающей линией для стороннего наблюдателя эквиваленты началу и окончанию движения заряда соответственно.

Траектория движения заряда будет определяться уравнениями:

$$\begin{aligned} x(\tau) &= c\tau l(\tau) - 2c\left(\tau - \frac{l}{c}\right)l\left(\tau - \frac{l}{c}\right) + c\left(\tau - \frac{2l}{c}\right)l\left(\tau - \frac{2l}{c}\right); \\ y(\tau) &= 0; \\ z(\tau) &= 0, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $l(\tau)$ – единичный перепад, $\tau = t - \frac{R}{c}$, c – скорость света в среде.

Подставляя выражение (2.3) в (2.2), получим выражение для напряженности поля в дальней зоне:

$$E_x(t) = -\frac{\mu_0 q}{4\pi R} \left\{ c\delta\left(t - \frac{R}{c}\right) - 2c\delta\left(t - \frac{l+R}{c}\right) + c\delta\left(t - \frac{2l+R}{c}\right) \right\}. \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) с точностью до постоянного множителя можно получить путём обратного преобразования Фурье для поля вибраторной антенны, что показано в работе [4], а временная форма поля излучения показана в работах [16, 17].

Таким образом, длительность импульсной характеристики излучателя, согласованного с фидером, определяется временем движения эквивалентного заряда от точки «запитки» до концов проводника и обратно. Как показано в работах

[63, 64], при рассогласовании антенны с фидером, могут наблюдаться различные переходные процессы, которые являются неотъемлемой частью импульсной характеристики. Подобный подход можно использовать и при антеннах другой формы, структура которых известна, например рупорных, биконических и т.д. Длительность импульсной характеристики соответствует времени движения импульсов по излучателю до концов проводника и обратно.

2.2 СИНТЕЗ ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННОГО ЗАРЯДА

Рассмотрим задачу синтеза структуры излучателя по заданной временной форме поля, используя метод сосредоточенного заряда. Зададим излучаемое им поле $E_x(t)$ в следующем виде:

$$E_x(t) = -\frac{1}{2\pi R \varepsilon_0} ab^2 \cos bct, \quad 0 \leq t \leq \frac{l_0}{c}$$

где a , b , c – константы, R – расстояние от центра до точки наблюдения. Уравнение заданного поля соответствует результату двойного дифференцирования траектории заряда. При этом в конце траектории сосредоточенный заряд должен поглотиться аттенюатором, иначе отражение от несогласованной нагрузки вызовет дополнительные импульсы. Из уравнения (2.1) можно получить траекторию движения сосредоточенного заряда:

$$\int_0^{t_0} \int_0^t E(\theta) d\theta dt = 0 \quad (2.5)$$

$$l = \int_0^y \sqrt{1 + a^2 b^2 \sin^2 y} dy$$

Траектория движения заряда это набор последовательно возбуждаемых проводящих точек, соответственно их совокупность является формой проводника. Выражение, описывающее форму проводника (рис.2.3), выглядит следующим образом:

$$x = a \cdot (1 - \cos by)$$

Тем самым из заданного поля получена геометрия излучателя. Для удобства моделирования и последующего макетирования преобразуем получившийся симметричный излучатель в несимметричный путем замены проводника 2 на экран. Полученная структура изображена на рис. 2.4.

Размер a выбран равным 2,25 см. Чтобы проводник можно было считать тонким, его толщина должна быть значительно его меньше длины.

Слева от излучателя расположен источник высокочастотного напряжения, подключаемый к концу излучателя. В нашем случае точка наблюдения располагается перпендикулярно проводящей плоскости на некотором расстоянии.

Анализ излучателя проведен методом конечных элементов во временной области [65, 66].

В процессе работы было рассмотрено три типа нагрузки: согласованная (аттенюатор 20 дБ), холостой ход (ХХ), короткое замыкание (КЗ). Рассматривался диапазон частот от 0 до 4 ГГц. Сосредоточенный заряд должен быть поглощен в конце траектории, соответственно целевой нагрузкой является аттенюатор, однако для рассмотрения физических процессов в момент излучения добавлены случаи ХХ и КЗ.

Качественно описать происходящие процессы можно следующим образом. На вход излучателя подается импульсный сигнал длительностью 250 пс. Заряд проходит по всему излучателю, потом он отражается от установленной нагрузки на другом конце излучателя и идет обратно. Движущийся заряд излучает сигнал

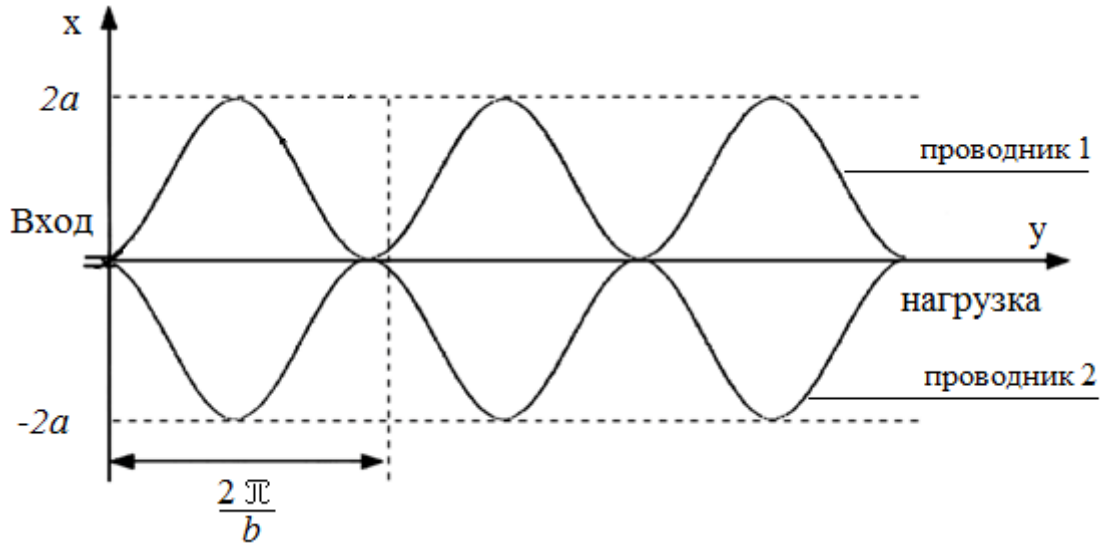


Рис. 2.3 Синтезированная форма излучателя.

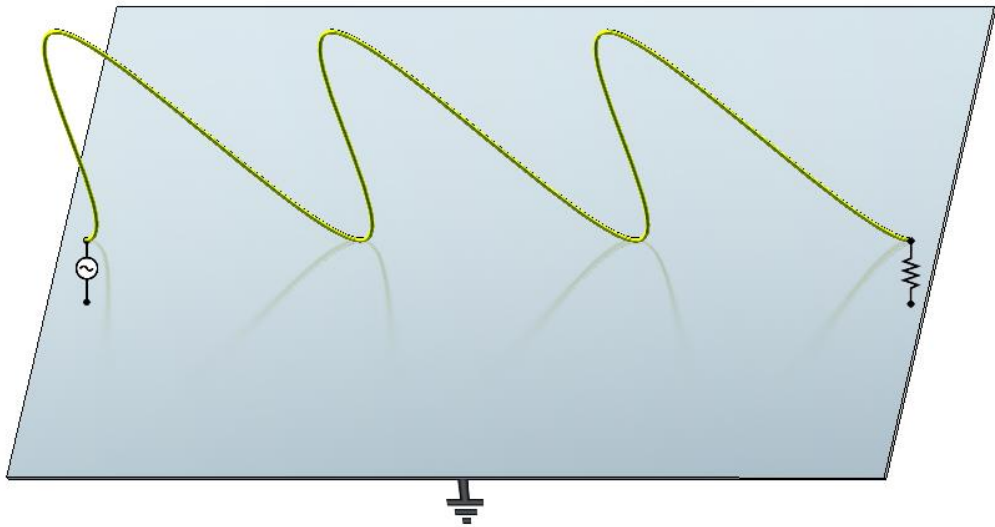


Рис. 2.4 Внешний вид модели излучателя.

на всем протяжении маршрута, так как полученная форма излучателя не имеет прямолинейных отрезков, заряд в каждой точке имеет некоторое ускорение.

Точка наблюдения расположена на расстоянии 2,2 м от центра проводящей плоскости, что соответствует дальней зоне для рассматриваемых частот. Графики электрического излучения антенны синусоидальной формы изображены на рис. 2.5.

В зависимости от нагрузки на втором конце излучателя поле выглядит по-разному. В первом случае (черный график) в качестве согласованной нагрузки был установлен аттенюатор на -20 Дб. Во втором случае (синий график) нагрузкой выступал ХХ. В третьем случае (красный график) второй конец излучателя и экран были соединены накоротко (КЗ).

Исходя из полученных результатов, очевидно, что поле в каждом случае примерно повторяет структуру модели. Конструктивно синусоидальный излучатель имеет семь точек экстремума: три максимума и четыре минимума.

Все первые семь точек максимумов и минимумов хорошо прослеживаются на графиках временной формы. Во всех случаях заряд, двигаясь по излучателю по одной траектории произвел, как видно, схожее излучение. Пройдя всю длину антенны и достигнув ее конца, заряд отражается. В дальнейшем, в зависимости от того, что установлено на конце излучателя, появляются различия в полученных данных. В момент времени 4 нс хорошо заметно, что синяя и красная кривые находятся в противофазе – это соответствует различному характеру отражения заряда от нагрузки разных типов: ХХ и КЗ. С увеличением времени эти кривые также остаются в противофазе до момента времени в 6 нс. Этот момент соответствует предполагаемому времени приходу заряда в точку «запитки». Это косвенно подтверждает концепцию теории сосредоточенного заряда, качественно описывающую процессы при воздействии СКИ.

Рассмотрим вариант с аттенюатором на конце (черный график, вынесен отдельно на рис. 2.6). Заряд, перемещаясь по излучателю, претерпевает практически полное поглощение нагрузкой. У излученного поля с заданным

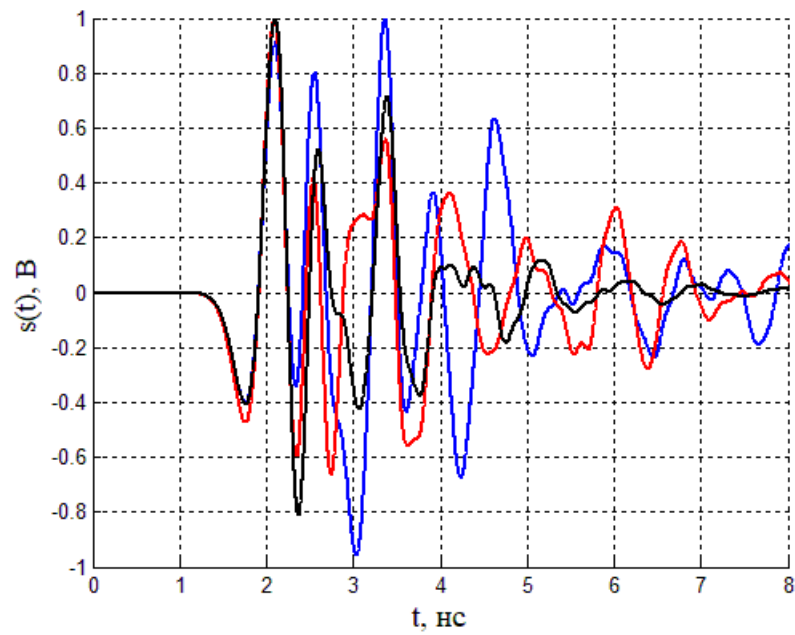


Рис. 2.5 Временные формы электрических полей при различных нагрузках на конце излучателя: аттенюатор 20 дБ (черный), ХХ (синий), КЗ (красный)

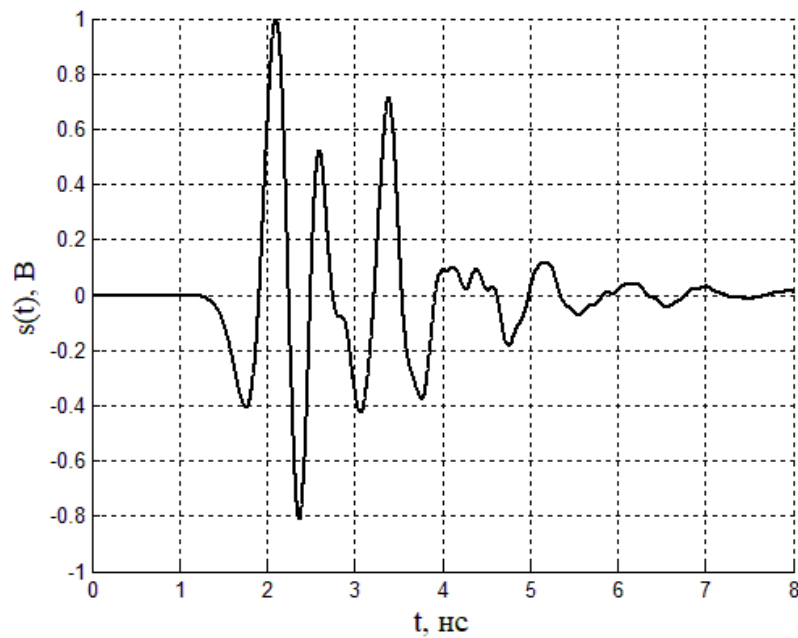


Рис. 2.6 Вид электрического поля с нагрузкой в виде аттенюатора на конце излучателя

совпадает общая длительность и количество локальных экстремумов в теле импульса. Небольшие переходные процессы свидетельствуют о неполном поглощении заряда в нагрузке – малая его часть отражается и продолжает излучение при движении в сторону точки подключения питающего фидера.

2.3 МАКЕТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Для проверки адекватности приведенной модели излучателя разработан макет, позволяющий получить экспериментальные характеристики. Физические размеры и форма его структуры были воспроизведены с достаточной степенью точности. Внешний вид излучателя изображен на рис. 2.7.

В качестве излучающего элемента была использована медная проволока диаметром 2 мм, длина которой, по аналогии с компьютерной моделью, составила 29,25 см. Поскольку, диаметр проволоки намного меньше ее длины, то можно говорить о тонкопроволочном приближении. Прямое расстояние от одного конца излучателя до другого составляет 9,42 см, размах равна 4,5 см.

В качестве экрана использовалась панель из металлизированного с двух сторон стеклотекстолита, причем обе стороны были закорочены с целью избежать паразитной емкости. Размеры экрана – 142x142 мм. Излучатель размещен на пластиковом каркасе перпендикулярно экрану. К концам излучателя, расположенных на высоте 1 мм от экрана, были присоединены SMA – разъемы, расположенные на обратной стороне экрана. К одному SMA – разъему был подключен генератор, к другому подключалась выбранная нагрузка: аттенюатор, блоки ХХ, КЗ. Корпус разъема имеет электрический контакт с экраном.

На рис. 2.8 изображена блок-схема экспериментальной установки. Здесь 1 – излучатель; 2 - приёмная антенна рупорного типа с экспоненциальным раскрытием, характеристики которой в полном объеме приведены в работе [67].

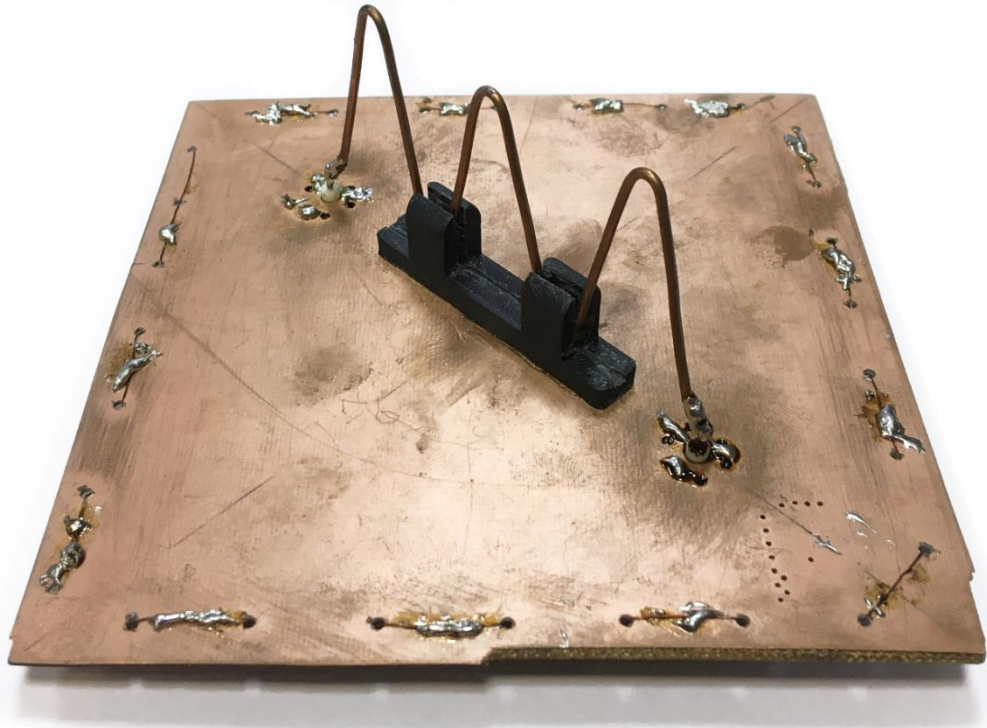


Рис. 2.7 Экспериментальный аналог модели

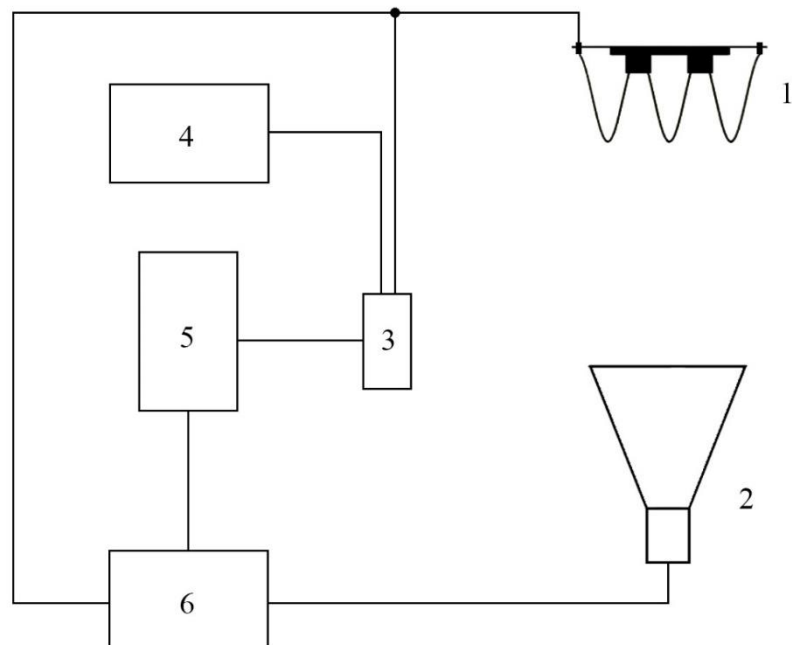


Рис. 2.8. Блок-схема экспериментальной установки.

Антенна предназначена для приема сигналов в диапазоне частот от 500 МГц до 6 ГГц и расположена на расстоянии в 1 м от излучателя.

В качестве нагрузки к приемной антенне 2 подключен осциллограф 6 Agilent TecDCA-X 86100D для наблюдения сигнала на экране

Излучатель 1 возбуждался сигналом генератора сверхкоротких импульсов 3, рассмотренным в главе 1.

Импульсы генератора 5 Agilent B11004A используются в качестве запускающих импульсов генератора 3 и синхронизации осциллографа 6. Сигнал с генератора 3, возбуждающий излучатель 1, изображен на рис. 1.1. 4 – источник питания.

Фото экспериментальной установки показано на рис.2.9.

Принятые антенной 2 сигналы, отображаемые на экране осциллографа (6), представлены на рис. 2.10. Как и в компьютерном моделировании, здесь черные линии иллюстрируют случай с аттенюатором на 20 дБ, красный – КЗ, синий – ХХ.

Согласно рис. 2.10, первая часть сигнала (до момента времени 4 нс) полностью совпадает во всех трех случаях. В моменте времени 4 нс происходит отражение сигнала от нагрузки на конце излучателя, реализации ХХ и КЗ находятся в противофазе. Реализация с нагрузкой в виде аттенюатора находится между ними за счет большего поглощения импульса нагрузкой. Таким образом, общая картина соответствует, описанной в предыдущем параграфе, и не отличается от характеристик моделирования.

Проведем сравнение результатов макетирования и моделирования, изображенных на рисунке 2.11. Здесь черным цветом представлен результат измерений, синим – моделирования. В обоих случаях, в качестве нагрузки, подключен аттенюатор 20 дБ. Сходство сигналов очевидно, однако экспериментальный результат имеет значительные релаксационные процессы. Эффективная длительность (1.2) и энергия (1.3) рассчитанные для макета и моделирования отличаются не более чем на 9 %, что позволяет говорить о достоверности полученных результатов.



Рис.2.9. Фотография экспериментальной установки

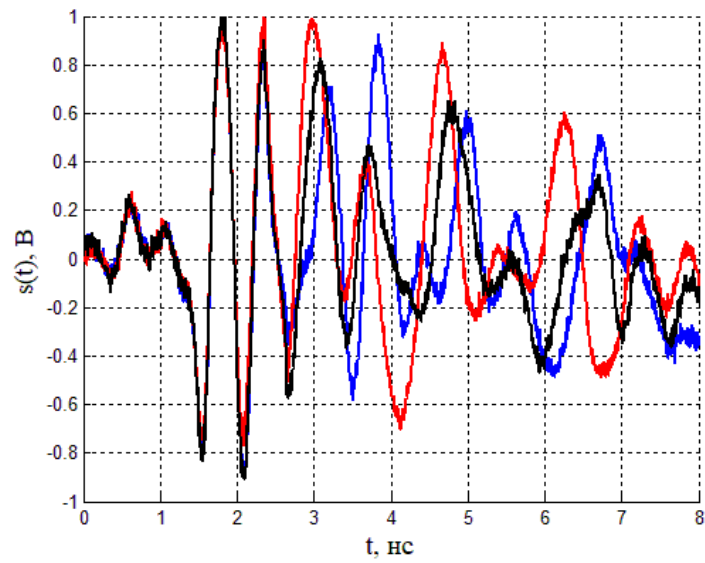


Рис. 2.10 Временные формы излученных полей при различных нагрузках на конце излучателя

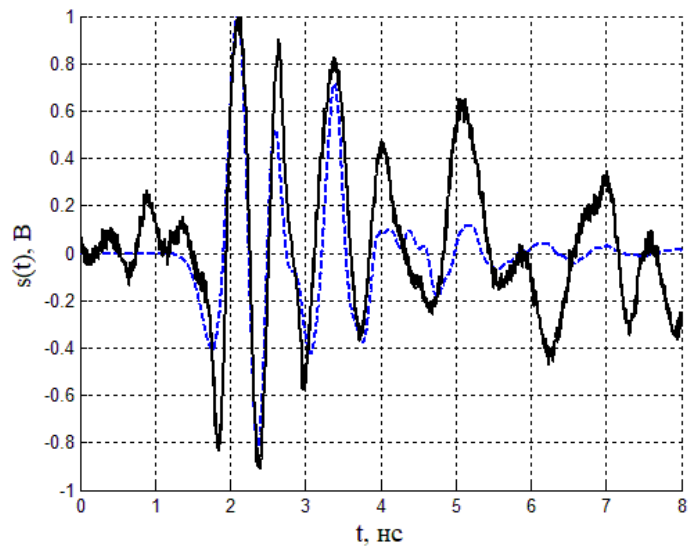


Рис. 2.11 Временная форма полученного поля при нагрузке в виде аттенюатора: черным сплошным – измеренная, синим пунктирным – по результатам моделирования (из рис. 2.6)

Таким образом, используя модель излучения, основанную на движении заряда, удалось по заданному полю синтезировать излучатель, а последующий анализ полученной структуры подтвердил, что его поле соответствует целевому полю, заданному априорно. Предлагается использовать этот метод для корректного определения окна регистрации сигнала при измерениях параметров антенн импульсными сигналами для осуществления безэхового приближения.

2.4 АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.

Рассмотренный выше метод сосредоточенного заряда может быть использован для быстрой априорной оценки длительности импульсной характеристики. Преимуществом данного метода является его математическая простота, что значительно снижает время расчетов.

Методика оценки длительности импульсной характеристики с помощью метода сосредоточенного заряда состоит в следующем. Например, для проволочных излучателей, необходимо знать длину проводника, тип взаимодействия на конце, связанный с отражением при ХХ и КЗ, или с поглощением при нагрузке на согласованный импеданс. В этом случае основных импульсов будет три: при возбуждении, отражении (поглощении), при возвращении возбуждающего заряда в точку питания (кроме случая согласованного импеданса на конце). Также добавятся импульсы в местах изломов и разветвлений проводников при их наличии, однако длительность ИХ будет определяться по максимальной длине пути заряда. Также необходимо учитывать длительность проходящего по излучателю сигнала, которая определяется ее полосой пропускания по входному сопротивлению. Учет длительности импульса происходит следующим образом: заряд продолжает дальнейшее движение по проводнику только после излучения в точке излома импульса конечной

длительности, которая определяется согласованием излучателем с питающим фидером.

В случае, если структура имеет излучающие плоскости, то сосредоточенный заряд преобразуется в поверхностный, каждый элементарный элемент которого следует по своей траектории, подчиняясь общим принципам. Можно это представить как разложение плоскости на набор элементарных проволочных элементов.

Проведем оценку длительности импульсной характеристики излучателей, рассмотренных в главе 1, методом сосредоточенного заряда: это симметричный вибратор, рупорная антенна и биконический излучатель.

Макетный образец симметричного вибратора имеет длину плеча $l = 1100$ мм и диаметр 10 мм, так что будем его считать тонким. Исследуемый излучатель является фильтром верхних частот, с частотой первого резонанса 70 МГц и кратно расположенными последующими резонансами, при этом с ростом частоты эффективность излучения вне резонансов увеличивается. Таким образом, учитывая отражение в месте подключения фидера, длительность входного импульса увеличивается с 250 пс до $t_{isv} = 2$ нс.

Отсутствие диэлектриков и других замедляющих материалов позволяет считать скорость распространения сигнала по проводнику равной скорости света в вакууме c . Сосредоточенный заряд излучает при возбуждении вибратора, далее он движется от точки «запитки» прямолинейно и равномерно без излучения до кончика вибратора. Там он отражается, т.е. его вектор скорости инвертируется, и излучает импульс, затем движется в обратном направлении до точки присоединения фидера, где излучает импульс при поглощении фидером.

Таким образом, длительность импульсной характеристики симметричного вибратора будет составлять:

$$t_{sv} = \frac{2l}{c} + 3t_{isv} = 13,3 \text{ нс}$$

Длительность импульсной характеристики макета рассчитана из рис. 1.8 как длительность зоны максимальной энергии по уровню 0,5 и составляет 13,1 нс.

Рассмотрим биконический излучатель. Макетный образец имеет высоту каждого конуса 115 мм, большой диаметр 260 мм. Таким образом, длина образующей составляет примерно $l_2 = 190$ мм. Технологически излучатель изготовлен из медной фольги, закрепленной на пластиковом каркасе. Каркас изготовлен с помощью 3D печати без заполнения, диэлектрическая проницаемость материала 2,1, а объем каркаса составляет менее 1 % объема антенны. Таким образом, замедлением сигнала за счет каркаса можно пренебречь. Сосредоточенный заряд двигается от точки запитки прямолинейно и равномерно до конца конуса при этом превращаясь в поверхностный заряд в форме кольца, где преломляется и движется внутри конуса по его внутренней стороне до вершины снова собираясь в точку, затем отражается и затем движется в обратном направлении до поглощения в месте присоединения фидера. В случае биконического излучателя входной импульс в 250 пс растягивается в $t_{bic} = 1$ нс. В таком случае длительность импульсной характеристики будет составлять:

$$t_{bic} = \frac{4l_2}{c} + 3t_{ibic} = 5,5 \text{ нс}$$

Длительность импульсной характеристики макета рассчитана из рис. 1.10 как длительность зоны максимальной энергии по уровню 0,5 и составляет 5,6 нс.

Макетный образец рупорного излучателя имеет длину плеча образующей $l_3 = 400$ мм. Каркас расположен снаружи антенны, с обратной стороны излучающих поверхностей. Отсутствие диэлектриков и других замедляющих материалов позволяет считать скорость распространения сигнала по образующей, равной скорости света в вакууме c . Сосредоточенный заряд двигается от точки запитки прямолинейно и равномерно, превращаясь при этом в поверхностный заряд в виде фронта распространения сигнала. Расстояния от точки подключения фидера до

середины раскрыва и до края отличаются, поэтому различные части поверхностного заряда отражаются в разное время из-за разного пройденного расстояния. Излученный импульс в таком случае выглядит «размытым», так как его элементарные компоненты не синфазны. После отражения поверхностный заряд движется в обратном направлении до поглощения в месте присоединения фидера, при этом «размывание» усиливается. Однако, для имеющегося рупорного излучателя, разность хода мала по сравнению с пространственным размером импульса ct , поэтому это не будет учтено. В случае рупорного излучателя импульс входной импульс в 250 пс растягивается в $t_{ir} = 1,2$ нс. В таком случае длительность импульсной характеристики будет составлять:

$$t_r = \frac{2l_3}{c} + 3t_{ir} = 7,9 \text{ нс}$$

Длительность импульсной характеристики макета рассчитана из рис. 1.12 как длительность зоны максимальной энергии по уровню 0,5 и составляет 7,7 нс.

Обобщая полученные результаты, приходим к выводу, что расчетная по геометрии длительность импульсной характеристики и измеренная совпадают. Незначительное отличие связано с представлением сосредоточенного заряда в виде материальной точки и постулатом о мгновенности его отражения. Однако для подбора длительности сверхкороткого импульса такая погрешность не является проблемой, так как его параметры имеют достаточно широкий рабочий диапазон.

Таким образом, временной расчет излучателей, с использованием замены импульсного тока сосредоточенным зарядом, позволяет получить верные временные формы излученного поля в дальней и ближних зонах, при заранее известной форме излучателя. Также с помощью такой модели возможен синтез излучателя по заданному полю, в том числе, в широкой полосе частот, однако при этом входные характеристики полученного излучателя остаются неизвестными. Использование данного метода позволит определить ожидаемое значение

длительности импульсной характеристики радиоканала излучатель – среда распространения – приемная антенна с достаточной точностью. Однако, при этом не учитываются затухающие переходные процессы, что потребует применения защитного интервала, рассмотренного в главе 4.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Установлено, что описание излучения с заменой импульса тока эквивалентным сосредоточенным зарядом позволяет получить качественную картину излученного поля.

2. С использованием метода сосредоточенного заряда разработан проволочный излучатель по заданному импульсу. По результатам моделирования и натурных измерений показана качественная сходимость излученных импульсов с заданным априорно.

3. Разработана методика экспресс оценки длительности импульсной характеристики излучателей, основанная на представлении о сосредоточенном заряде и его траектории движения.

ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

3.1. ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЦЫ ДАЛЬНЕЙ ЗОНЫ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ НА ОТКРЫТЫХ ПОЛИГОНАХ

В настоящее время для измерений параметров излучателей, таких как коэффициент усиления и диаграмма направленности, широко применяют безэховые камеры. Разработка новых поглотителей позволяет несколько расширить рабочий диапазон измерений в сторону более длинных волн. И, тем не менее, для измерения характеристик в метровом, да и в дециметровом диапазонах, требуются камеры размерами в десятки, а то и в сотни метров. Поэтому такого рода измерения, как правило, проводятся на открытых полигонах. Одним из недостатков открытого полигона является невозможность обеспечения конфиденциальности рабочей полосы частот. С этой целью предлагается использовать сверхкороткие импульсы (СКИ), ширина полосы которых маскирует рабочий диапазон частот. Генерация, излучение, распространение, прием и регистрация СКИ на сегодняшний день проработана в приложениях радиолокации [43, 68, 69]. Применение сверхкоротких импульсов для измерения характеристик излучателей во временной области не накладывает дополнительных ограничений на известные методы моделирования и расчета, и дает возможность воспользоваться традиционными подходами [41, 42, 70]. Предложенный алгоритм с использованием сверхкоротких импульсов позволяет с достаточной степенью точности проводить измерения характеристик антенных систем на открытом полигоне.

Метод вышки подразумевает измерения характеристик излучателей в дальней зоне, граница которой определяется известными соотношениями [2]. Критерий дальней зоны при излучении импульсных сигналов связан с их длительностью [40, 18], и определяется выражением

$$l = \frac{2D^2}{c\tau},$$

где D – наибольший размер излучателя, τ – длительность импульса, c – скорость света. Однако, как показано в работе [40], при импульсных длинах $c\tau$ одного порядка с апертурой излучателя D , граница дальней зоны перестает зависеть от длительности импульса.

С другой стороны для нахождения границы дальней зоны для излучателей, расположенных в свободном пространстве, можно воспользоваться формулой Фрииса [2]:

$$P_{res} = P_{tran} G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (3.1)$$

где P_{res} – мощность сигнала в приемном тракте, P_{tran} – мощность, возбужденная передатчиком, G_1 , G_2 – коэффициенты усиления антенн, λ – длина волны излучения, R – длина радиотрассы.

Из формулы следует, что в дальней зоне величина $L = P_{res} r^2$ является константой ввиду того, что остальные параметры, входящие в правую часть уравнения (3.1) не зависят от параметров радиотрассы распространения сигнала. Для экспериментальной проверки отсутствия зависимости величины границы дальней зоны от длительности сверхкоротких импульсов использовалась установка, состоящая из идентичных приемопередающих антенн в виде рупорных излучателей с раскрывом 15 см [71], и установленных на диэлектрические штативы высотой 2 м. Передающий излучатель возбуждался перестраиваемым генератором импульсов с длительностями от 200 до 600 пс по уровню 0,5 амплитуды на основе диодов с накоплением заряда [58, 59]. В качестве приемной системы использовалась антенна с подключенным к ней стробоскопическим осциллографом AgilentDCA-X 86100D с полосой пропускания 18 ГГц, на экране которого

отображались реализации напряжений, соответствующих протекающему наведенному на антенне току через нагрузку. Размеры излучателя выбраны таким образом, чтобы импульсная длина ct в эксперименте составляла величину одного порядка с размером излучателя и соответствовала одной трети ожидаемой длительности импульсной характеристики системы, при частоте следования импульсов 1 МГц и амплитуде 60 В. Для нахождения расстояния до границы дальней зоны, в соответствии с формулой (3.1) для напряжения, удобно воспользоваться нормированным критерием $L_n = Ur = 1$, где U – амплитуда напряжения на нагрузке, а r – расстояние между излучателем и приемной антенной.

На рис.3.1 приведены зависимости $L_n(r)$ для импульсов с длительностями 600 (*) и 250 (+) пс. Сплошная линия соответствует усредненным значениям. Как видно из графиков, за начало дальней зоны может быть принята величина, равная 4,7 м. С увеличением расстояния между излучателем и приемной антенной точки на графике группируются около прямой, соответствующей критерию L_n , равному 1. Обращает на себя внимание чуть больший разброс точек для длительности импульса 250 пс. Это связано с распределением энергии сигнала в большей полосе частот и, соответственно, уменьшением отношения сигнал/шум на входе осциллографа. Но, тем не менее, измеренные значения не выходят за пределы погрешности измерений, составляющей величину порядка 10%, допустимой в экспериментах такого рода. Приведенные результаты измерений подтверждают независимость границы дальней зоны от длительности импульса и согласуются с результатами моделирования, приведенными в работе [40]. При ширине спектра возбуждающего импульса превышающего полосу пропускания антенны, характеристики излучения вне номинального рабочего диапазона незначительно влияют на энергетические параметры спектра сигнала, принимаемого антенной.

Расчет границы дальней зоны для квазимонохроматических сигналов по критерию $\frac{3D^2}{\lambda}$ [2], позволяющему не учитывать размер вспомогательной

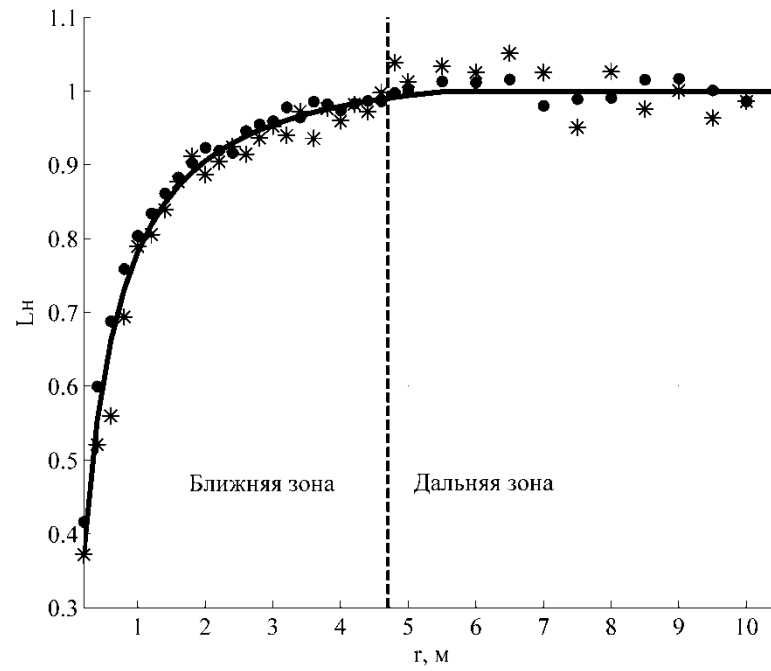


Рис. 3.1. Зависимость нормированного критерия $L_n(r)$ от расстояния между излучателем и приемной антенной для длительностей 600 пс (•) и 250 пс (*).

антенны, дает результат в 4,6 м. Таким образом, ограничения на минимальное расстояние между излучателем и приемной антенной практически совпадают как для монохроматического, так и для сверхширокополосного сигналов и определяются только верхней частотой рабочего диапазона.

3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ПРИ ПОДНЯТЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЯХ.

Известно [2], что область распространения монохроматических сигналов вдоль земли делят на несколько зон – зону интерференции, освещенную зону, а также зоны полутени и тени. В каждой из них напряжение на приемной антенне представляется, как правило, разложением с различным количеством членов ряда Фока. При этом реально полученные результаты всегда будут отличаться от случая распространения сигнала в свободном пространстве. Поэтому, для получения адекватных результатов при использовании монохроматических сигналов, испытываемую и вспомогательную антенны располагают как можно выше над землей (используют так называемый поднятый полигон). Вспомогательную антенну можно расположить и у земли (наклонный полигон). При этом расстояние между антеннами и высота их расположения выбираются таким образом, чтобы минимумы диаграмм направленности вспомогательной и испытываемой антенн были направлены в сторону земли. Менее строгими оказываются требования к организации полигона при использовании сверхкоротких импульсов. В этом случае достаточно разместить антенны так, чтобы расстояние между ними превышало зону интерференции, определяемую выражением:

$$l = \frac{4h_1h_2}{\lambda}, \quad (3.2)$$

где h_1 и h_2 - высоты подъема антенн, а λ – минимальная длина волны рабочего диапазона. Такое расположение антенн позволит избежать интерференционного влияния на всех измеряемых частотах.

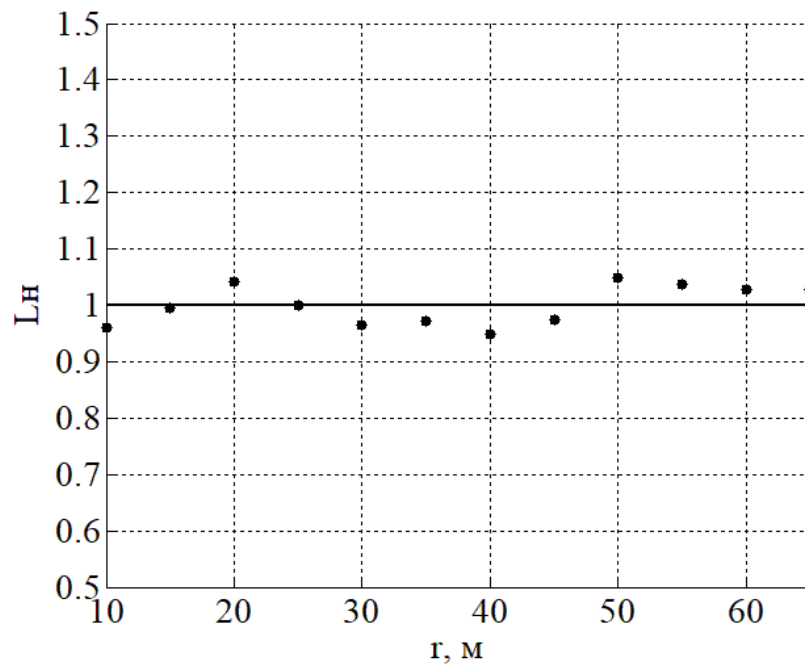


Рис.3.2 Зависимость нормированного критерия $L_n(r)$ для антенны, расположенной на высоте 8 м.

Отраженный от земли импульс будет отставать по времени относительно прямого и может быть отфильтрован с помощью временного окна. Вывод о распространении сигнала в виртуальном свободном пространстве подтверждается и выполнением критерия $L_n=1$ (рис. 3.2) в диапазоне расстояний 10..65 м. между приемной антенной и излучателем, расположенными на высоте 8 м. Как видно, отклонения приведенных результатов от выбранного критерия не превышают погрешности измерений. Отраженный от земли сигнал оказывается за рамками выбранного временного окна, что позволяет проводить измерения в имитируемом свободном пространстве в рассматриваемом диапазоне частот.

При достижении определенного расстояния между излучателем и приемной антенной время прихода отраженного импульса становится близким к прямому (неотраженному). Даже их слабое взаимодействие способно значительно исказить общую картину [72].

Для определения максимального возможного расстояния между антеннами для разных высот их расположения был проведен следующий эксперимент [73]. Измерительная установка представляла собой две диэлектрических мачты, с возможностью перемещения антенн на высоту до 8 м. Генератор импульсов с амплитудой 70 В и длительностью 2,5 нс подключался к излучающей антенне Пб-48 ИУШЯ.464653.001. На приемной стороне размещалась антенна АШП-1 производства АВМ-Системс. Измерения проводились в частотном диапазоне 300-900 МГц. Частота следования импульсов в эксперименте составляла 5 МГц, а дискретизация отсчетов осциллографа по времени - 1,2 пс. На приемной антенне в фиксированном временном окне T , равном 15 нс, по форме принятого сигнала рассчитывалась его энергия в соответствии с выражением

$$E = 10 \cdot \lg \left(\int_0^T u(t)^2 dt \right), \quad (3.3)$$

где, $u(t)$ – сигнал, принятый осциллографом.

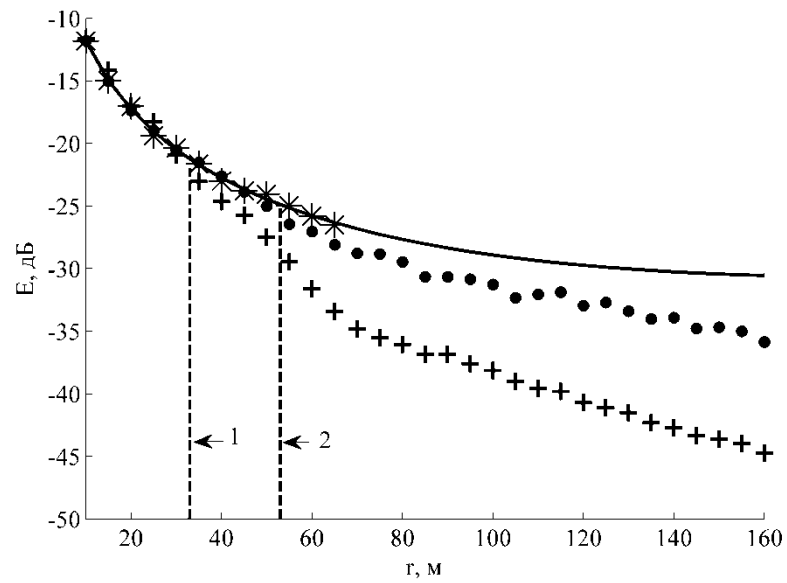


Рис.3.3 Зависимость энергии на приемной антенне от расстояния для различных высот расположения 1 (+), 2 (•), 8 (*) м (сплошная линия – $1/r^2$).

1 – граница зоны измерений для высоты подвеса 1 м;

2 – граница зоны измерений для высоты подвеса 2 м.

На рис. 3.3 изображено распределение энергии принятого сигнала от расстояния между антеннами для различных высот расположения антенн над землей. Видно, что вне зависимости от высоты расположения антенн, энергия сигнала на малых расстояниях между ними убывает как $1/r^2$, что соответствует закону убывания энергии в свободном пространстве. Однако с увеличением расстояния между антеннами прямой и отраженные сигналы начинают интерферировать, причем для низкорасположенных антенн начало интерференции наступает раньше. Значение энергии сигнала уменьшается и его характер затухания перестает соответствовать закону $1/r^2$. Граница нарушения соответствия составляет величину порядка 50 м для антенн, поднятых на высоту 2 м. Это соответствует границе зоны интерференции [2], равной 48 м, для верхней рабочей частоты антенны.

Очевидно, что для обеспечения временного разделения неотраженных и отраженных от земли импульсов необходимо располагать антенны в зоне интерференции. Однако, временная задержка увеличивается с увеличением их разности хода, что достигается приближением антенн друг к другу. При выборе компромисса необходимо сохранить расположение приемной антенны в дальней зоне для исключения учета ее размеров при измерениях. Таким образом, можно сформировать «безэховое» приближение, т.е. сигнал на регистрируемом устройстве будет аналогичен сигналу при распространении в свободном пространстве, несмотря на наличие подстилающей поверхности любого типа.

3.3. ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ В ЗОНЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Для подтверждения адекватности предложенных методик проведены измерения диаграмм направленности излучателя (антенны П6-48) с использованием сверхкоротких импульсов и проведено их сравнение с результатами измерений узкополосными сигналами в безэховой камере [74]. В процессе эксперимента использовалась измерительная установка, описанная в

предыдущем случае. Измерения проводились для антенн, расположенных на высоте 8 м. и на расстоянии 30 м друг от друга. В этом случае граница дальней зоны по критерию (3.1) для частоты 900 МГц составляет величину порядка 6 м, а зоны интерференции по критерию (3.2), более 800 м.

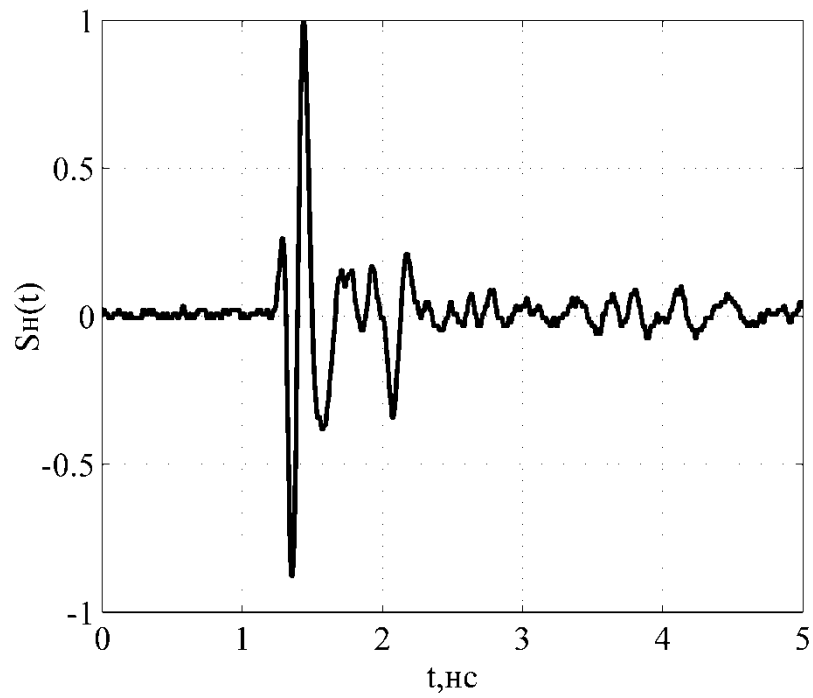
Антенна Пб-48 устанавливалась на поворотное устройство, обеспечивающее вращение в азимутальной плоскости. Измерение диаграммы направленности осуществлялось в Н-плоскости антенны. При ориентации антенны в требуемом направлении проводилось измерение параметров принятого сигнала. Дискретизация измерений по углу в эксперименте составляла 10° , при точности установки угла $\pm 0,5^\circ$.

В качестве примера на рис. 3.4 приведены формы принятых сигналов для двух углов ориентации антенны Пб-48 0° и 40° относительно приемной антенны АШП-1. На графиках наблюдается отличие временных форм принятого сигнала при изменении угла поворота.

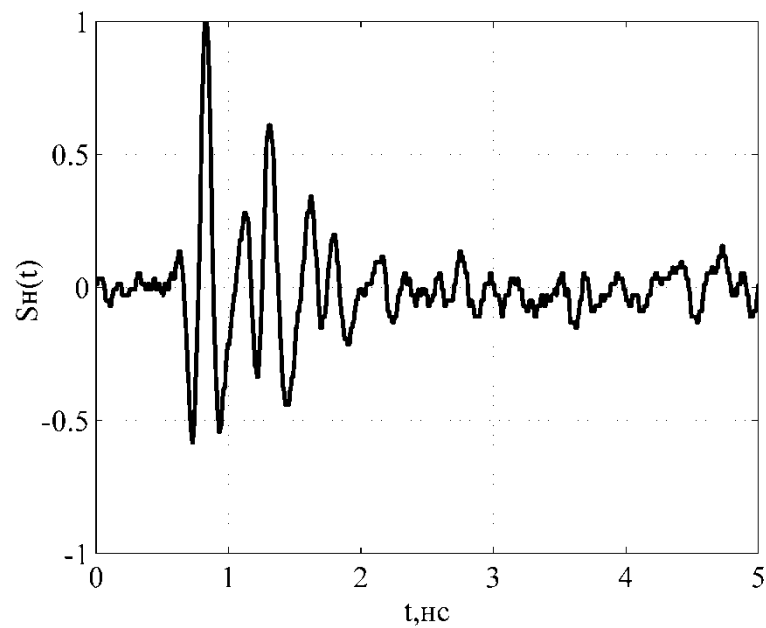
При обработке результатов измерения на полученные реализации накладывалось временное прямоугольное окно длительностью 10 нс. Внутри окна реализация представлялась 16384 отсчетами, равномерно распределенными во временной области. С помощью преобразования Фурье рассчитывался частотный спектр каждой реализации. А на основе соотношений спектральных компонент построены диаграммы направленности для каждой из исследуемых частот.

На рис. 3.5 приведено сравнение полученных нормированных диаграмм направленности в Н-плоскости на частотах 300 (+), 500 (.) и 700(*) МГц, с паспортными характеристиками измеряемых антенн. В основном направлении излучения различие составляет менее 1 дБ, при углах поворота более 30° различие возрастает до 1 дБ и остается таким до крайнего положения антенны.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют совпадение результатов измерения диаграммы направленности антенны на открытом



а)



б)

Рис. 3.4 Нормированные формы принятых сигналов для различных отклонений от соосной ориентации антенн: а - 0° , б - 40° .

полигоне с результатами измерений в безэховой камере, предоставленных производителем. Измерения с помощью сверхкоротких импульсов проводились при расположении антенн в дальней зоне и на расстоянии друг от друга, не превышающем зону интерференции для верхней рабочей частоты. При этом полигон не требовал особой подготовки и инфраструктурных затрат, а его размеры значительно сократилась по сравнению с требованиями к использованию классических методик измерения [1, 2].

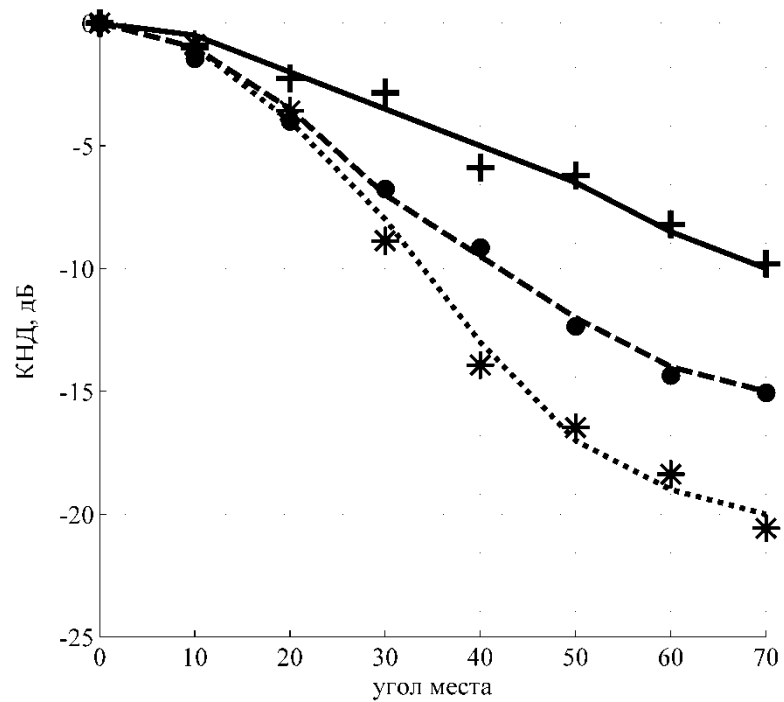


Рис. 3.5 Нормированные диаграммы направленности для разных частот. Экспериментальный результат показан точками: (+) 300 МГц, 500 МГц (•), 700 МГц (*); параметр указанный производителем - кривыми: сплошная -300 МГц, прерывистая – 500 МГц, пунктирная – 700 МГц.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Анализ излучения СКИ в ближней зоне позволил установить совпадение границ дальней зоны для наибольшей рабочей частоты и при возбуждении антенны сверхкоротким импульсом.

2. Экспериментально исследовано распространение СКИ над земной поверхностью. Показано, что зона временного разделения отраженного и неотраженного от земной поверхности импульсов пространственно соответствует зоне интерференции для наибольшей рабочей частоты антенны.

3. Разработана методика измерения диаграмм направленности антенн сверхкороткими импульсными сигналами методом поднятого полигона. Показано, что с помощью использования временного окна можно добиться «безэхового» приближения, исключив отраженный от подстилающей поверхности сигнал.

ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОТРАЖЕНИЙ

4.1 ТРЕБОВАНИЯ К МЕСТУ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Существенным недостатком традиционных [1, 2] методов измерения излучателей является требования специально оборудованной площадки или камеры с поглощающим покрытием, оснащенной необходимым оборудованием, которое является достаточно дорогостоящим и сложным инженерно-техническим сооружением. Уменьшение технических требований к полигону, а также необходимость экспресс-измерений, которые можно было бы проводить, в том числе, и на необорудованной площадке, лежит в основе поиска новых методов измерений. Метод «полуподнятого полигона» требует больших свободных пространств, особенно в случае с широкополосными многодиапазонными излучателями, что подразумевает под собой значительные издержки в аппаратуре испытаний: приборы с аккумуляторным питанием, средства связи для персонала, диэлектрические мачтовые устройства и т.д. Отдельный интерес представляет измерение параметров излучателей ОВЧ и УВЧ диапазонов: отношение верхней рабочей частоты к нижней может составлять до 20, что увеличивает размеры открытого полигона до нескольких сотен метров, а поглотители в безэховых камерах еще недостаточно эффективны для поглощения радиоволн таких частот.

К примеру, для измерения излучателя с рабочим диапазоном от 30 до 500 МГц дальность зоны интерференции при расположении фазовых центров излучателя и приемной антенны на высоте три метра составит около 80 метров. В этом случае, взаимодействие между персоналом возможно только с дополнительными радиостанциями, а коммутация приборов для автоматизации измерений может быть исключена или требовать дорогостоящих всепогодных комплектующих. Использование же сверхкоротких импульсов в качестве сигнала

позволяет провести измерения на расстояниях порядка 15 м, решая описанные проблемы.

В настоящей главе предложен метод измерения диаграмм направленности антенн с помощью сверхкоротких импульсов на полигоне с отражениями. При этом производится автоматизированное отделение отражений на основе априорно оцененной длительности импульсной характеристики.

В настоящее время не так много испытательных полигонов для проведения измерений характеристик излучателей с помощью СКИ. Однако, интерес к этому методу измерений и анализу возможных преимуществ нового подхода достаточно устойчив [7-9, 28, 75-77]. Также возрастающий акцент на модели импульсного излучения, часто упоминаемый в литературе [12, 13, 18, 19-27], требует методов верификации предложенных моделей.

В главе 3 показано, что при излучении вблизи земли в зоне интерференции узкополосных сигналов частотой f , прямой и отраженный от земли импульсы будут разделены по времени, при условии, что максимальная частота в спектре импульса не превышает частоту f . Таким образом, создается зона, в которой с помощью оконной функции можно оставить только прямой импульс, получив имитацию свободного пространства. Не ограничиваясь приземным распространением радиоволн, можно поместить исследуемую антенну в полностью экранированную камеру. В данном случае, высокий КПД отражения стенок камеры только улучшит ситуацию, поскольку позволит лучше детектировать отраженные импульсы для их последующей фильтрации.

Определим основные параметры места для измерения характеристик излучателей с помощью сверхкоротких импульсных сигналов.

Во-первых, камера должна быть достаточно большой, чтобы исследуемый излучатель и вспомогательная антенна находились в дальней зоне друг друга, стенки камеры также должны находиться за пределами первой зоны Френеля радиотрассы [78]. В таком случае излученное поле сформируется без искажений.

Границы зоны Фраунгофера также определяются верхней частотой импульса, что показано в главе 3. Этот критерий можно записать следующим выражением:

$$r > \frac{2D^2}{c\tau}, \quad (4.1)$$

где r – расстояние между излучателем и приемной антенной, D – апертура излучателя, τ – длительность импульсной характеристики излучателя.

Во-вторых, разность хода прямого и отраженных лучей должна быть достаточной для возможности временного разделения прямого и отраженных от стен камеры сигналов. Согласно главе 3, эта зона также определяется верхней частотой спектра импульса. Достигнуть этого можно либо с увеличением размера камеры, либо уменьшением расстояния между антеннами. Этот критерий можно записать следующим выражением:

$$r < 2h - c\tau,$$

где h – расстояние до объекта, вызывающего отражение сигнала, например, подстилающей поверхности. Необходимо также чтобы эти объекты не находились в зоне формирования поля излучателем, то есть h должно соответствовать критерию (4.1).

Таким образом, размеры камеры должны быть достаточны для обеспечения измерений в дальней зоне, но при этом расстояние между излучателем и вспомогательной приемной антенной должны обеспечивать наибольшее временное разделение прямого и отраженного сигналов.

4.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе экспериментально получены диаграммы направленности рупорной антенны с экспоненциальным раскрывом. Для этого была собрана установка, схема которой изображена на рис. 4.1. Расстояние между антеннами составляло 8 м, расстояние от антенн до боковой стенки- 4 м, до задней- 9 м, высота подвеса- 2 м.

Используемый рупорный излучатель 1 описан в работе [79, 80]. Внешний вид показан на рис. 4.2. Представляет собой пластиковый пустотелый каркас, изготовленный по технологии 3D печати, внутри которого закреплен медный излучатель. Питание осуществляется жестким коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50 Ом. Излучатель закреплен на поворотном устройстве.

Генератор СКИ 3 использовался такой же, как и в предыдущих главах [55-59]. Длительность выходного импульса 200-250 пс. Соединение между ним и излучателем выполнено кабелем РК-50-4-21 ГОСТ 11326.37-39.

Запускающий импульс (ЗИ) для генератора СКИ формировался на генератором 4 Agilent 91104A. Он располагался у подножия поворотного устройство вместе с генератором СКИ и источником питания Mastech NY3005M2. Запускающий импульс (ЗИ) поступал к генератору СКИ по кабелю РК-50-4-21 длиной 0,5 м.

Для определения влияния поворотного устройства была проведена следующая оценка. На поворотном устройстве закреплялась осесимметричная всенаправленная широкодиапазонная антенна, подробно описанная в работе [81-85]. Преимуществом данной антенны по сравнению с другими всенаправленными антеннами, например биконической, является малый поперечный размер, характерный для антенн вибраторного типа. Основные идеи использования такого излучателя изложен в работах [86-89]. При совершенствовании конструкции за счет оптимального распределения емкостей, удалось добиться более чем пятикратного перекрытия по рабочим частотам с сохранением диаграммы направленности. Таким образом, был превышен предел Фано для вибраторных

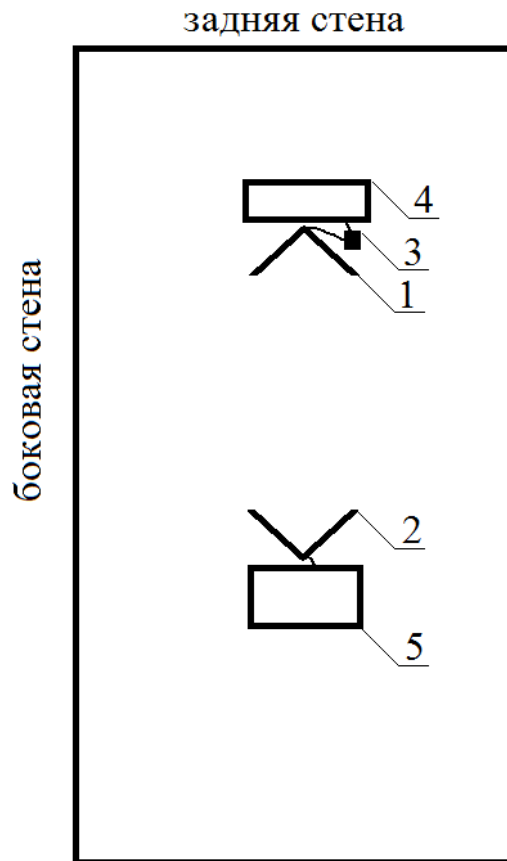


Рис. 4.1 Расположение основных элементов экспериментальной установки.



Рис. 4.2 Внешний вид рупорного излучателя.

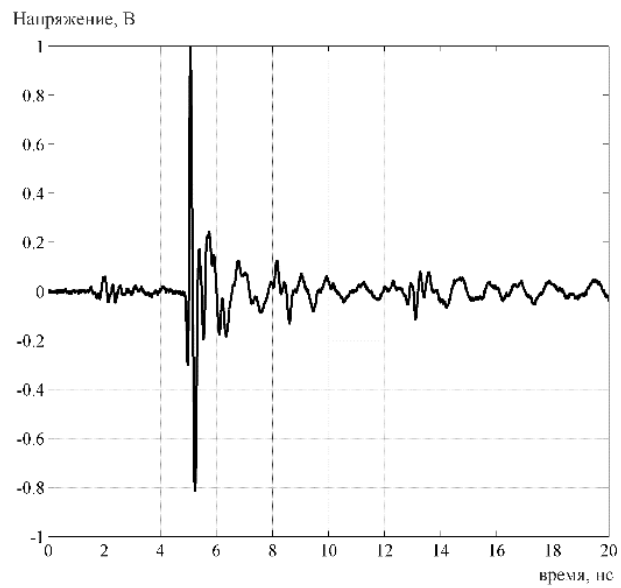
антенн [90, 91], однако данную конструкцию нельзя отнести к вибраторным в узком смысле.

При вращении осесимметричной антенны на 360° неравномерность принятого сигнала по энергии не превысила 1 дБ, неравномерность по эффективной длительности (1.2) не превысило 1 %. На основе этого сделан вывод, что поворотное устройство и аппаратура под ним не вносят искажений при вращении.

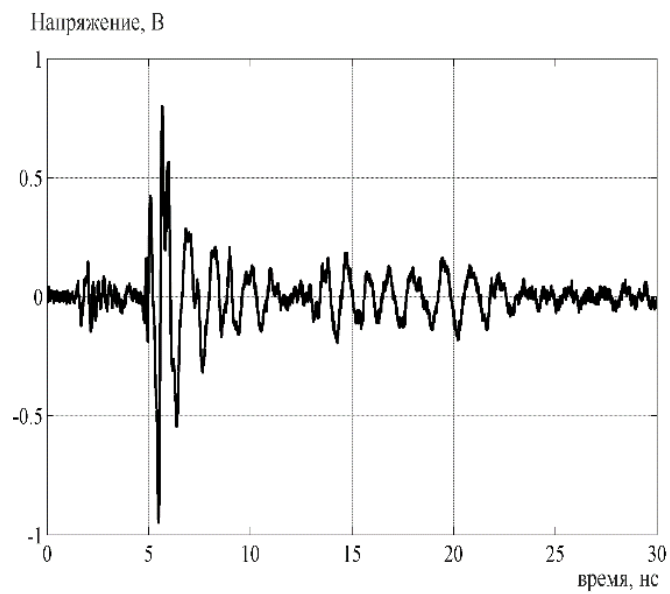
В качестве приемной антенны 2 использовалась измерительная рупорная антенна П6-23. К ней, с помощью кабеля РК-50-4-21 ГОСТ 11326.37-39 длиной 0,5 м, подсоединен стробоскопический осциллограф 5 с полосой пропускания 20 ГГц Agilent DCA-X 86100D, расположенный у основания мачты. Осциллограф регистрировал принятый сигнал.

Измерения производились следующим образом. На каждый отсчет угла поворота накапливалось 64 реализации принятого сигнала, которые затем усреднялись по реализациям блоком обработки осциллографа, и после этого происходило считывание сигнала с осциллографа на ЭВМ. Дискретизация поворотного устройства по углу – $1,5^\circ$. Общее время измерений составило 14 часов. [92, 93]

На рис. 4.3 изображен принятый сигнал в различных азимутальных направлениях. За 0° взято направление, при котором антенны направлены встречно. Как видно из рис. 4.3, принятый сигнал состоит из импульсов с различным временем прихода. Все импульсы кроме первого принадлежат лучам, отраженным от стен или пола. Измерительная установка позволяет исключить их из рассмотрения в автоматическом режиме с помощью оконной функции и, таким образом, выделить целевой сигнал неискаженным. При этом необходимо провести априорную оценку импульсной характеристики канала «антенна – среда - антенна», полученную на основе метода сосредоточенного заряда.



а)



б)

Рис. 4.3 Пример сигнала, зарегистрированного осциллографом для разной ориентации антенн: а – 0° , б – 60° .

4.3 ОБРАБОТКА ПРИНЯТЫХ СИГНАЛОВ, ФИЛЬТРАЦИЯ ОТРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВРЕМЕННОГО ОКНА

Блок-схема автоматизированной обработки сигналов, принятыми осциллографом приведена на рис. 4.4. Ниже проведено последовательное описание каждого этапа.

Поступающий с осциллографа сигнал представляет собой набор отсчетов с полосой сигнала 0-20 ГГц. Однако, диапазон излучающей антенны 0,6..10 ГГц, а приемной П6-23 – 0,85..17 ГГц. Таким образом, часть полезного сигнала на частотах ниже 850 МГц не воспринимается системой. Генератор СКИ формирует сигнал с полосой до 10 ГГц, следовательно, полезный сигнал на частотах выше 10 ГГц также отсутствует. В тоже время на частотах до 850 МГц расположены мощные помехи от радиовещания (~ 100 МГц) и телевидения (~500 МГц). Для улучшения отношения сигнал-помеха входная последовательность отсчетов пропускается через цифровой фильтр Чебышева с полосой пропускания 0,8..10 ГГц, неравномерность в полосе 0,5 дБ, и затуханием внеполосного излучения не менее 30 дБ. Отфильтрованный сигнал поступает в массив реализаций, где каждый сигнал соответствует определенному углу поворота антенны.

Далее, на основе априорно известного сигнала генератора СКИ, синтезируется импульсная характеристика канала «антенна – среда распространения - антенна» по методике, изложенной в главе 1. Набор импульсных характеристик от различных углов представлен на рис. 4.5. На импульсной характеристике видно не только время прихода импульса, но и время прихода каждого отраженного от стенок сигнала. На рис. 4.5 время прихода импульса с антенны на антенну 17 нс (по максимальному пику), в момент 24 нс приходит импульс, отраженный от потолка, на 31 нс – импульс отраженный от боковой стены, и, наконец, в момент времени 46 нс. Эти данные получены из анализа геометрии помещения, расстояния до стен и потолка. Наиболее выделяется импульс, отраженный от задней стенки камеры. При сонаправленном

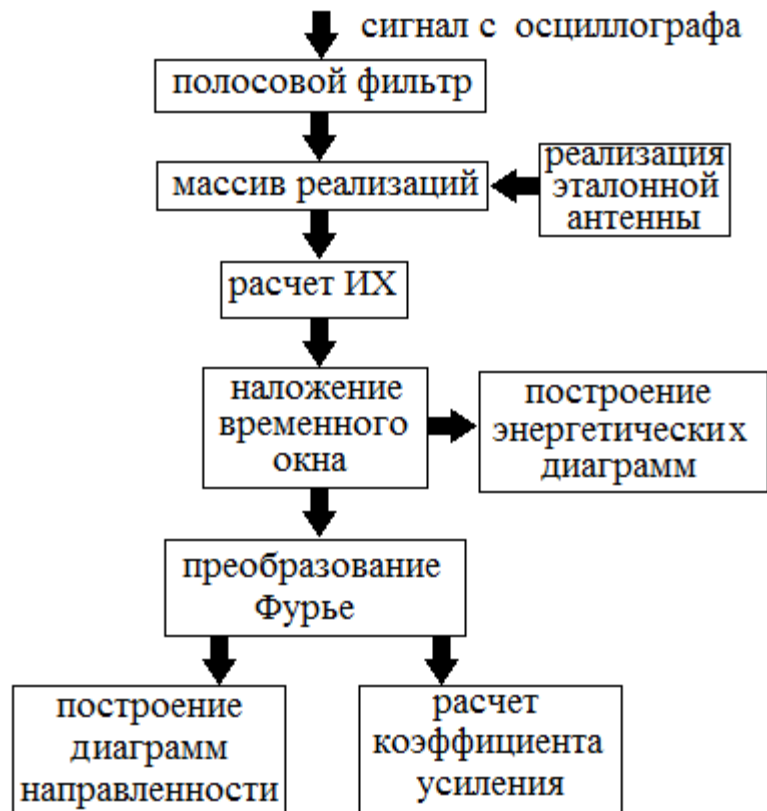
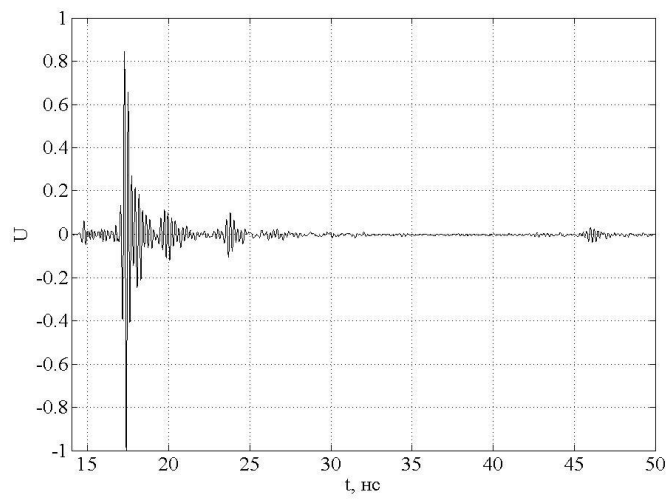
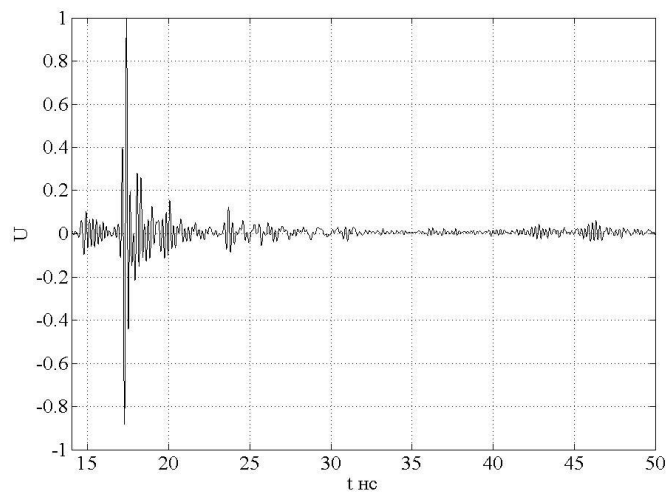


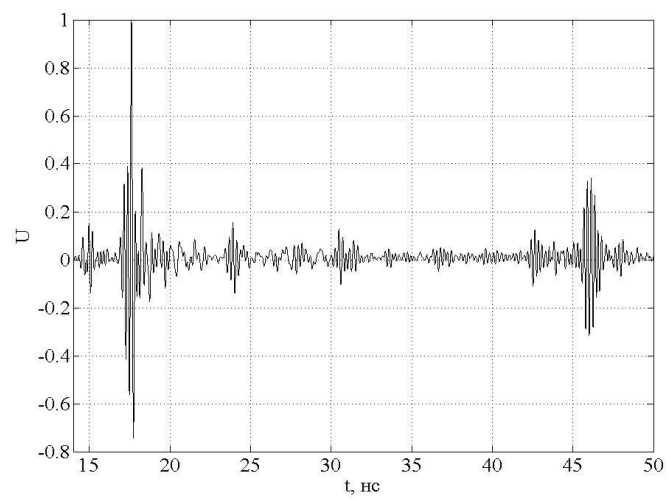
Рис. 4.4 Блок-схема обработки результатов измерений



а)



б)



в)

Рис. 4.5 Набор нормированных импульсных характеристик для разных углов поворота исследуемой антенны: а - 0° , б - 45° , в - 180° .

расположении антенн, основное излучение направлено в заднюю стену камеры, а прямой сигнал характеризует задний лепесток диаграммы направленности. При таких условиях отношение амплитуд основного и отраженного импульса уменьшается с 26 раз до 3, что влечет за собой стремительное нарастание погрешности измерений.

Для устранения ошибок, вызванных отражениями, на следующем этапе на каждую реализацию накладывается оконная функция специальной формы. Часто используемые оконные функции, такие как прямоугольное окно или окно Хэмминга не подходят по различным причинам. Прямоугольное окно имеет резкий перепад, нарушающий непрерывность производной. В этом случае преобразование Фурье может дать неконтролируемые шумовые выбросы, что может повлиять на диаграмму направленности. Окна типа Ханна, Хэмминга и др. хотя и обеспечивают непрерывность производной результирующей функции, но имеют иной недостаток – вводят искажение полезного сигнала за счет собственной неравномерности [94, 95]. Для борьбы с перечисленными недостатками была применена оконная функция, описываемая следующим выражением:

$$F(t) = \begin{cases} e^{-\frac{(t+\tau)^2}{\sigma}}, & -\tau < t \\ 1, & -\tau < t < \tau \\ e^{-\frac{(t-\tau)^2}{\sigma}}, & t < \tau \end{cases},$$

где τ – длительность импульсной характеристики, рассчитанная методом сосредоточенного заряда. Предложенная оконная функция не вносит искажения в полезный сигнал и убирает отклики отражений, при этом их затухание определяется параметром σ . Полученный сигнал теперь находится в «безэховом» приближении. Длительность импульсной характеристики τ рассчитывается по методике п.2.4: сначала по входным характеристикам (полосе пропускания по коэффициенту стоячей волны по напряжению) рассчитывается длительность

импульса в антенне, затем, исходя из ее геометрии, оценивается максимальный путь, который будет пройден сосредоточенным зарядом после возбуждения антенны. Далее рассчитывается время сосредоточенного заряда в пути с учетом замедляющих структур и подсчитывается количество точек.

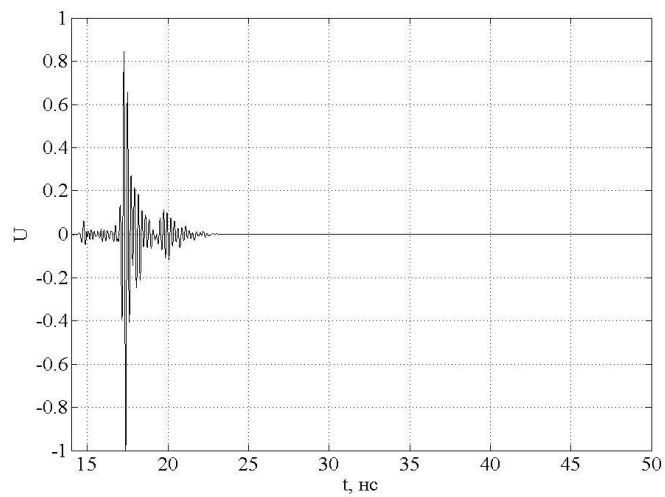
На рис. 4.6 изображены модифицированные импульсные характеристики канала для тех же углов, что и на рис. 4.5.

На основе семейства полученных импульсных характеристик можно построить энергетические диаграммы направленности, что может потребоваться при работе с импульсными сигналами, например, в приложениях радиолокации.

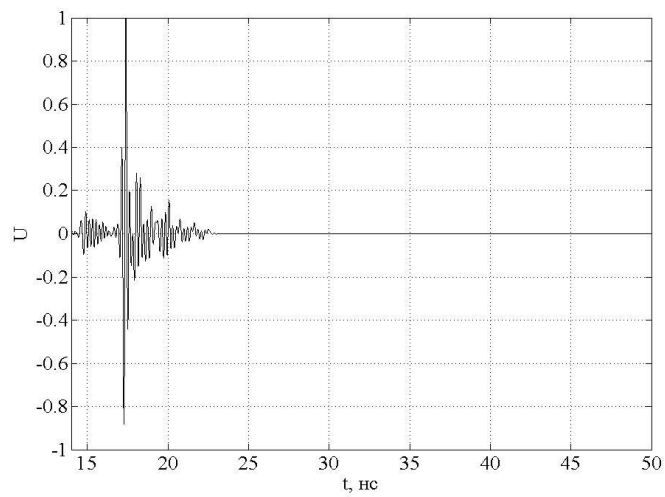
Следующий блок обработки – преобразование Фурье. Используемые параметры излучателя, такие как диаграмма направленности и коэффициент усиления, определены для гармонических сигналов. Для анализа результатов необходимо перейти в частотную область [96-98].

Далее по имеющимся реализациям можно построить диаграмму направленности на любой частоте диапазона, а также коэффициент усиления антенны. Наиболее оптимальным в данной ситуации является метод замещения: сначала оцениваются параметры импульсной характеристики и фиксируется ее форма радиоканала с антенной, характеристики которой известны, затем известная антенна замещается на исследуемый излучатель, измерения повторяются вновь, и после преобразования Фурье определяется разница в сигнале на каждой частоте диапазона, которая и будет являться разницей в коэффициенте усиления антенн.

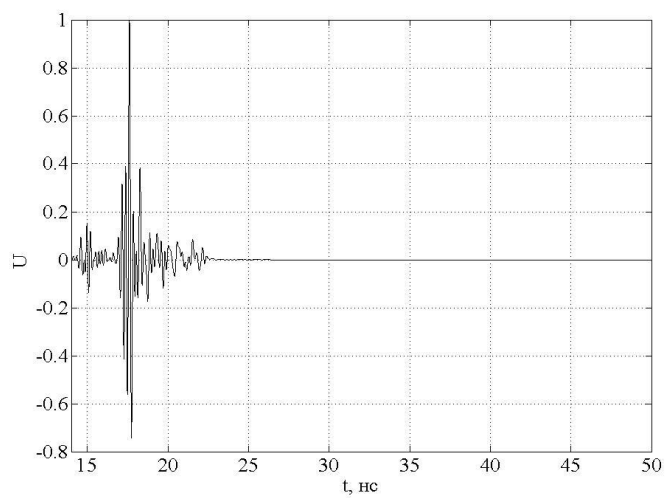
На рис. 4.7 приведено сравнение коэффициента усиления исследуемой антенны, полученного в результате моделирования (сплошная линия) и пересчитанного из диаграммы направленности (штриховая линия). В диапазоне частот от 2,5 ГГц до 4 ГГц отклонение не превышает 0,5 дБ, частоты ниже 850 МГц не учитываются, так как отфильтрованы цифровым фильтром при обработке. Наибольшее отклонение достигается в диапазоне 960..990 МГц, что



а)



б)



в)

Рис. 4.6 Набор нормированных модифицированных импульсных характеристик для разных углов поворота исследуемой антенны: а - 0° , б - 45° , в - 180°

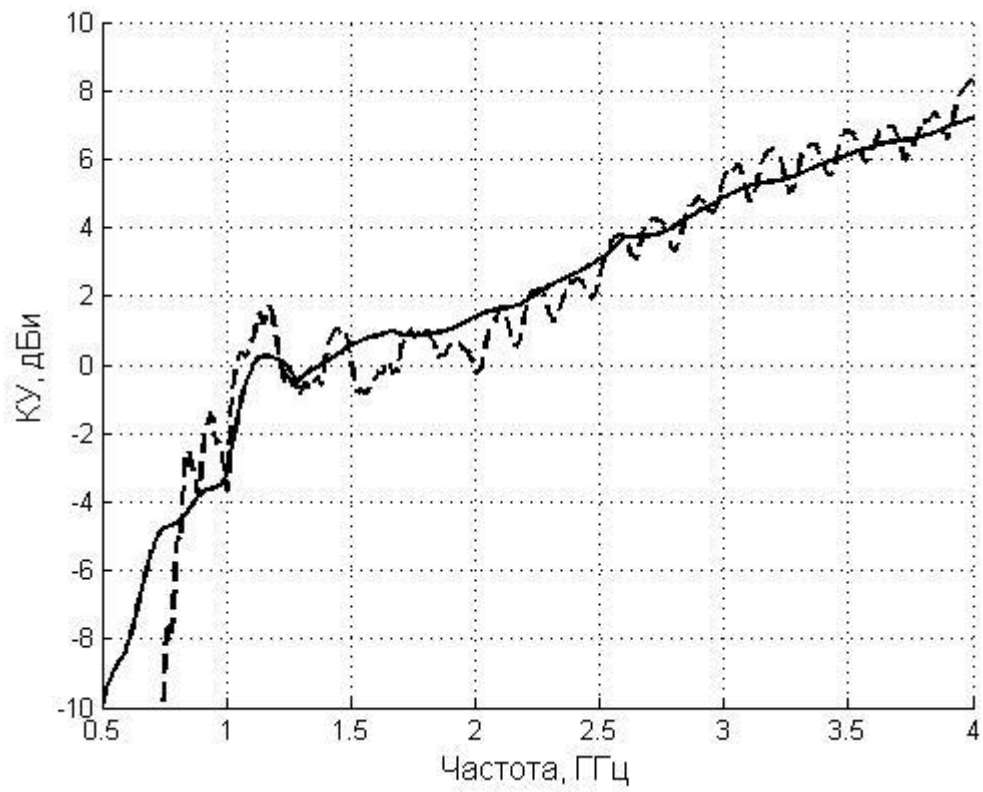


Рис. 4.7 Коэффициент усиления: сплошная линия – результат моделирования, штриховая – измерений.

совпадает с помехой от GSM-стандарта связи, и это может быть причиной такого различия. В целом, отклонения результата измерений от моделирования не превышает 1 дБ, что в условиях эксперимента является допустимым.

4.4. ИЗМЕРЕНИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИИ ОТРАЖЕНИЙ И ИХ СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ ПРИ ПОМОЩИ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Проведем измерения в тех же условиях с помощью монохроматических сигналов. Очевидно, что в схеме, изображенной на рис. 4.1 нарушаются базовые принципы методик измерений, изложенных в [1, 2] – излучатель и антенна находятся слишком близко к поверхностям, которые не поглощают сигналы. Таким образом, в системе установится интерференционная картина поля, которая будет вносить искажения в полученный результат. В данных условиях для сравнения с предложенным методом были проведены измерения диаграммы направленности с помощью гармонических сигналов. Вместо генератора СКИ и осциллографа использовался векторный анализатор AgilentPNA-LN5230C [93].

На рис. 4.8 изображены диаграммы направленности на частоте 2 ГГц по результатам компьютерного электродинамического моделирования исследуемой рупорной антенны и по результатам измерения гармоническими сигналами по приведенной методике. Несмотря на то, что искажения в основном лепестке незначительны, различия в уровнях бокового излучения достигают 5 дБ.

На рис. 4.9 приведены также результаты моделирования рупорной антенны в сравнении с результатами измерений с помощью СКИ и вышеприведенной обработкой. По сравнению с измерением гармоническими сигналами, уровень бокового излучения отличается не более, чем на 1 дБ. Флуктуации в уровне сигнала при углах $\pm 1,5$ рад ($\approx 90^\circ$ разворота) вызваны недостаточным

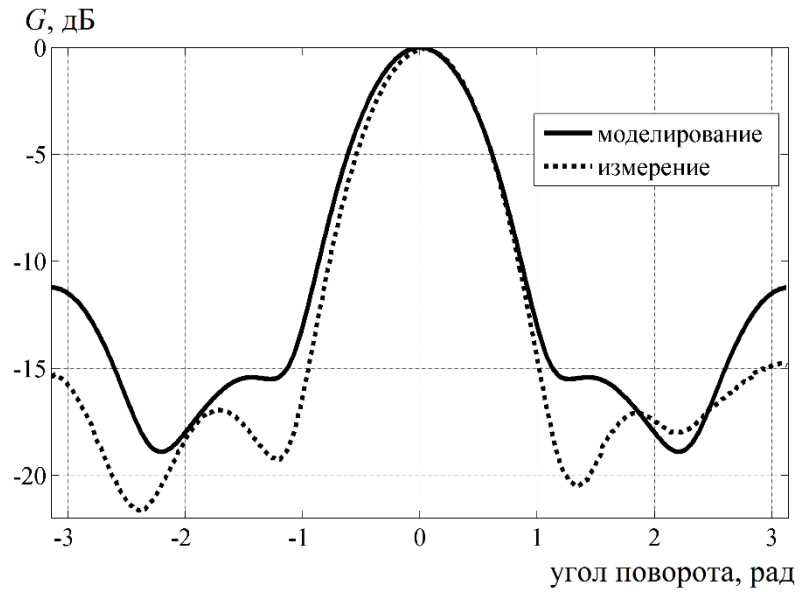


Рис. 4.8 Нормированные ДН в горизонтальной плоскости на частоте 2 ГГц при измерениях монохроматическим сигналами.

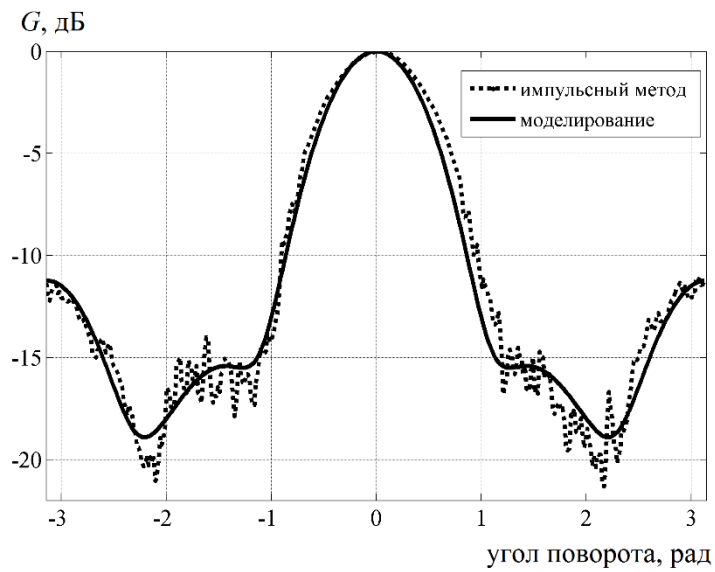


Рис. 4.9 Нормированные ДН в горизонтальной плоскости на частоте 2 ГГц при измерениях с помощью СКИ.

соотношением сигнал – (шум + помеха), вследствие чего при выполнении численных операций накапливались ошибки.

Таким образом, предложенный метод позволил получить корректный результат при наличии существенных отражений от окружающих поверхностей.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. Определены основные критерии по расположению излучателя и приемной антенны в месте для измерений: расстояние между ними должно обеспечивать нахождение приемной антенны в дальней зоне, с другой стороны, разность хода прямого и отраженных лучей должна превышать длительность импульсной характеристики излучателя.

2. Разработан алгоритм проведения измерений и последующей автоматизированной обработки результатов, позволяющий отфильтровать отраженные от предметов и поверхностей сигналы, получить безэховое приближение.

3. Проведено сравнение полученных результатов с результатами измерений, использующих гармонические сигналы на частоте 2 ГГц. Показано уменьшение ошибки в определении уровня боковых лепестков диаграммы направленности в случае использования СКИ на 4 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена изучению особенностей распространения сверхкоротких импульсов и использования их при измерении характеристик излучателей в условиях наличия отражающих поверхностей.

1. Определено необходимое и достаточное условие для соответствия отклика системы ее импульсной характеристике. При этом длительность возбуждающего импульса по отношению к длительности импульсной характеристики системы определяется величиной ν , значение которой зависит от формы импульса. При выполнении этого условия отклик системы, с точностью до постоянного множителя, соответствует ее импульсной характеристике. Экспериментально показано, что при возбуждении системы сверхкороткими импульсами на приемнике регистрируется импульсная характеристика системы.

2. Установлено, что представление излучения с заменой импульса тока эквивалентным сосредоточенным зарядом позволяет получить корректную качественную картину излученного поля, и его основные характеристики. Разработана методика экспресс оценки длительности импульсной характеристики излучателей, основанная на представлении о сосредоточенном заряде и его траектории движения по излучателю, с учетом его формы и размеров.

3. Показано, что граница дальней зоны определяется верхней рабочей частотой антенны не зависимо от типа возбуждающего сигнала. Выявлено отличие распространения импульсного нестационарного поля над земной поверхностью от распространения гармонических сигналов, заключающиеся в отсутствии локальных минимумов и максимумов в зоне интерференции радиотрассы, которое достигается временным разделением прямого и отраженного от подстилающей поверхности импульсов.

4. Предложен метод фильтрации отражений сигнала во временной области с помощью временного окна, ширина которого выбирается по результатам априорной оценки длительности импульсной характеристики излучателя методом сосредоточенного заряда. Проведено сравнение результатов измерения с

использованием гармонического и импульсного сигналов. Показано, что ошибка измерений в определении уровня боковых лепестков диаграммы направленности для гармонического сигнала достигает 5 дБ. В то же время, ошибка измерений по предложенной методике, с использованием сверхкоротких импульсов, составляет около 1 дБ.

Благодарности. Автор благодарит Бобрешова А.М., Чубукова И.Н., Шамардина А.А., Уфаева А.В., Болгова А.Ю., Смусеву К.В. за помощь в организации измерений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цейтлин Н.М. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин и др.; под ред. Н. М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
2. Фрадин А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. – М.: Радио и связь, 1962. – 316 с.
3. Измерение характеристик и параметров антенн и рассеивателей с помощью сверхкоротких импульсных сигналов / Ю.Н. Калинин, П.В. Миляев, А.П. Миляев, В.Л. Морев // Сборник материалов «55 лет на службе Отечеству» – НПП «Радар ММС», 2005. – С. 251-262.
4. Астанин Л.Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев // М.: Радио и Связь, 1989. – 192 с.
5. Meng F. High power EM pulse technology / F. Meng. – Beijing: National Defense Industry Press, 2011. – P. 1-22.
6. Taylor J.D. Ultrawideband radar: applications and design / J.D. Taylor. – CRCpress, 2017. – 528 p. doi: 10.1201/b12356.
7. De Jongh R.V. Antenna time-domain measurement techniques / R.V. de Jongh, M. Hajian, L.P. Ligthart // IEEE Antennas and propagation magazine. – 1997. – V. 39, № 5. – P. 7-12.
8. Shlivinski A. Antenna characterization in the time domain / A. Shlivinski, E. Heyman, R. Kastner // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1997. – V. 45, № 7. – P. 1140-1149.
9. Liang C. Design of a broad-band antenna for time-domain measurement / C. Liang, L. Jianwei, Y. Haiyan, L. Yi // 3rd Asia-Pacific Conference on antennas and propagation. – Harbin, 2014. – P. 587-589.
10. Gerding M. Generation of short electrical pulses based on bipolar transistors / M. Gerding, T. Musch, B. Schiek // Advances in Radio Science. – 2004. – № 2. – P. 7–12.

11. Prokhorenko V. Drift step recovery devices utilization for electromagnetic pulse radiation / V. Prokhorenko, V. Ivashchuk, S. Korsun // Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. – Delft, The Netherlands, 2004. – P. 195-198.

12. Иммореев И.Я. Излучение сверхширокополосных сигналов / И.Я. Иммореев, А.Н. Синявин // Антенны. – 2001. – Т. 47, № 1. – С. 8-16.

13. Содин Л. Г. Импульсное излучение антенны (электромагнитный снаряд) / Л. Г. Содин // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36, № 5. – С. 1014-1022.

14. Генерация и излучение мощных сверхширокополосных импульсов пикосекундной длительности / Ю.А. Андреев, А.М. Ефремов, В.И. Кошелев [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т.56, №12. – С. 1457-1467.

15. Generation and radiation of ultra-wideband electromagnetic pulses with high stability and effective potential / A.M. Efremov, V.I. Koshelev, V.M. Kovalchuk [and etc.] // Laser particle beams. – 2014. – V. 32, №.3. – P. 413-418.

16. Пермяков В.А. Локальный качественный анализ векторной структуры электрического диполя в нестационарном режиме излучения / В.А. Пермяков, Д.В. Сороковик // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 12. – С. 757-764.

17. Пермяков В.А. Качественный анализ импульсного излучения линейных антенн в свободном пространстве / В.А. Пермяков, Д.В. Сороковик // Сверхширокополосные сигналы в локации, связи и акустике. Сборник докладов Всероссийской научной конференции. – Муром, 2003. – С. 43-47.

18. Беличенко В.П. СШП импульсные радиосистемы / В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев. – Новосибирск: Наука, 2015 – 477 с.

19. Калошин В. А. Исследование характеристик ТЕМ рупоров / В.А. Калошин, К.З. Нгуен, Н.Ш. Нгуен // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/oct15/2/text.html> (дата обращения: 15.05.2022).

20. Калошин В. А. Асимптотическая теория биконической антенны / В.А. Калошин, Е.С. Мартынов // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/sep11/12/text.pdf> (дата обращения: 27.01.2022).

21. Зернов Н. В. Антенны в режиме излучения (приёма) сверхширокополосных сигналов / Н. В. Зернов, Г. В. Меркулов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – № 1. – С. 84-94.

22. Skulkin S. Transient far fields of aperture antennas / S. Skulkin, N. Lysenko, G. Uskov, N. Kascheev // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – V. 18, № 5. – P. 1036 – 1040.

23. Mobashsher A.T. Near-field time-domain characterisation of wideband antennas / A.T. Mobashsher, A.M. Abbosh. // Electronics Letters. – 2015. – V. 51, № 25. – P. 2076 – 2078.

24. Skulkin S.P. Formulas for antenna patterns in time domain and for the primitive impulse response function of linearly polarized field of plane aperture / S.P. Skulkin, N. A. Lysenko, G.K. Uskov, A.M. Bobreshov. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2020. – V. 19, №. 9. – P. 1516 – 1520.

25. Ключев Д.С. Электродинамический анализ зеркальных антенн самосогласованным методом / Д.С. Ключев, Ю.В. Соколова. // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. № 9. – С. 155-158.

26. Скулкин С.П. Метод измерений параметров антенн во временной области / С.П. Скулкин, В.И. Турчин. // Известия вузов. Радиофизика. – 1998. – Т. 41, № 5. – С. 614-623.

27. Скулкин С.П. Импульсное поле параболической антенны в дальней зоне / С.П. Скулкин, В.И. Турчин. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 10. – С. 884-888.

28. Farr E.G. Characterizing antennas in the time and frequency domains / E.G. Farr. // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. – San Diego, 2017. – P. 2057-2058.

29. Sarkar D. Dynamics of antenna reactive energy using time domain IDM method / D. Sarkar, S.M. Mikki, K.V Srivastava, Y.M.M. Antar. // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2019. – V. 67, № 2. – P. 1084-1093.

30. Wheeler H.A. The radian sphere around a small antenna / H.A. Wheeler. // Proc. IRE. – 1959. – V. 47, № 8. – P. 1325–1331. doi: 10.1109/JRPROC.1959.287198.

31. Shlivinski A. Time-domain near-field analysis of shortpulse antennas–Part I: Spherical wave (multipole) expansion / A. Shlivinski, E. Heyman. // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1999. – V. 47. №. 2. – P. 271–279. doi: 10.1109/8.761066.

32. Shlivinski A. Time-domain near-field analysis of short-pulse antennas – Part II: Reactive energy and the antenna Q / A. Shlivinski, E. Heyman. // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1999. – V. 47. №. 2. – P. 280–286. doi: 10.1109/8.761067.

33. Michel A. Considering high-performance near-field reader antennas / A. Michel, P. Nepa, X. Qing, Z. N. Chen. // IEEE Antennas Propag. Mag. – 2018. – V. 60, № 1. – P. 1–13. doi: 10.1109/MAP.2017.2774141.

34. Shao W. A time-domain measurement system for UWB Microwave imaging / W. Shao, A. Edalati, T.R. McCollough, W.J. McCollough. // IEEE Transactions on microwave theory and techiques. – 2018. – V. 66, № 3. – P. 2265-2275.

35. Miller E.K. Exploring the behavior of a matched load in the time domain / E.K. Miller. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2014. – V. 56. № 3. – P. 103-111.

36. Bantin C.C. Radiation from a pulse-excited thin wire monopole / C.C. Bantin. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2001. – V. 43, № 3. – P. 64-69.

37. Miller E.K. Time-Domain Far-Field Analysis of Radiation Sources / E.K. Miller. // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2011. – V. 53, № 5. – P. 46-54.

38. Jing X. Research on the technology of EMP measurement in time-domain / X. Jing, X. Zheng, Y. Sun. // Journal of Microwaves. – 2010. – V. S2. – P.76-78.

39. Ковалев И.П. Анализ процессов излучения и приема импульсных сигналов во временной области / И.П. Ковалев, Д.М. Пономарев. – М.: Радио и связь, 1996. – 112 с.

40. Крымский В. В. Анализ зависимости излучаемого импульсного поля от расстояния / В. В. Крымский, М. Г. Вахитов, М. Ю. Сартасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. – Т. 14, № 2. – С.24-30.

41. Ratan S.D. Time domain measurements of high electric fields due to spark gap resonator / S.D. Ratan, A. Syed. // *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – V. 91. – P. 074703-074703-6. doi: 10.1063/5.0002065.

42. Debdeep S. Representation of electromagnetic energy around antennas: current research and future directions / S. Debdeep, S. Mikki, Y.M.M. Antar. // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2021. – V. 63, № 5. – P. 61-71. doi: 10.1109/MAP.2020.3021420.

43. Gharamohammadi A. Optimized UWB signal to shallow buried object imaging / A. Gharamohammadi, Y. Norouzi, H. Aghaeinia. // *Progress In Electromagnetics Research Letters*. – 2018. – V. 72. – P. 7–10. doi: 10.2528/PIERL17091506.

44. Бобрешов А.М. Ударное возбуждение широкополосных пассивных линейных каскадов сверхкороткими импульсами / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // *Радиотехника*. – 2016. – № 12. – С. 64-67.

45. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие для вузов / И. С. Гоноровский; 5 изд., испр. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

46. Финкельштейн М. И. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.

47. Стадник А. М. Искажения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в атмосфере Земли / А. М. Стадник, Г. В. Ермаков. // *Радиотехника и электроника*. – 1995. – Т. 40, № 7. – С. 1009-1016.

48. Лазоренко О. В. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы. 2. Методы анализа и применение / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2008. - Т. 13, №4. – С. 270-322.

49. Bobreshov A. Experimental measurement of impulse response UWB emitters / A. Bobreshov, G. Uskov, S. Neskorodov [and etc.]. // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – Moscow, 2020. – pp. 266-268. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312291.

50. Экспериментальное измерение импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В.

Смусева [и др.]. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2020. – №12. doi: 10.30898/1684-1719.2020.12.13.

51. Экспериментальная оценка импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, С.Е. Нескородов [и др.]. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Сборник научных трудов. – Севастополь, 2020. – Т. 2. – С. 372.

52. Экспериментальное измерение импульсных характеристик сверхширокополосных излучателей / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева [и др.]. // VII Всероссийская Микроволновая конференция. – Москва, 2020. –С. 343-346.

53. Бобрешов А.М. Улучшение характеристик направленности сверхширокополосного биконического излучателя / А.М. Бобрешов, Е.А. Серегина, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Материалы X Международной конференции "Инновационная энергетика". – Пермь, 2019. – С. 69-77.

54. Бобрешов А.М. Методики улучшения направленных свойств апертурных приемных элементов пеленгационной решетки / А.М. Бобрешов, Е.А. Серегина, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т. 22, № 4, Ч. 1. – С. 42–47.

55. Генератор сверхкоротких импульсов с электронным управлением длительностью / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин [и др.]. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №11. – С. 24-28.

56. Бобрешов А.М. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / А.М. Бобрешов, Ю.И. Китаев, В.А. Степкин, Г.К. Усков. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т.14, №3. – С. 103-108.

57. Бобрешов А.М. Генератор сверхкоротких импульсов с одновременной накачкой заряда SRD и накоплением магнитной энергии / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XX Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2014. – Т. 3. – С. 1877-1882.

58. Бобрешов А.М. Генератор сверхкоротких импульсов большой амплитуды с формирователем резкого спада / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, В.А. Степкин, Г.К. Усков. // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 10. – С. 1030-1036. doi: 10.1134/S10642269201000109.

59. Бобрешов А.М. Генератор радиоимпульсов наносекундной длительности / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XXI Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2015. – С. 903-907.

60. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 286 с.

61. Бобрешов А.М. Формирование широкополосного радиоимпульса методом ударного возбуждения широкополосной антенны / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XXII Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 19-21 апр. 2016 г. — Воронеж. – 2016. — Т.2. – С. 979-983.

62. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1976. – 440 с.

63. Бобрешов А.М. Расчет излучения несимметричного вибратора во временной области / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Материалы конференции «Антенны и распространение радиоволн 2019». – Санкт-Петербург, 2019. – С.101-155.

64. Бобрешов А.М. Расчет излучения несимметричного вибратора методом сосредоточенного заряда / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Радиолокация, навигация, связь: XXVI Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2020 – Т. 4.– С. 175-179.

65. Clemens M. Discrete electromagnetism with the finite integration technique / M. Clemens, T. Weiland. // Progress in Electromagnetic Research. – 2001. – №32. – P. 65–87.

66. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Д. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 349 с.

67. Бобрешов А.М. Методики улучшения направленных свойств апертурных приемных элементов пеленгационной решетки / А.М. Бобрешов, Е.А. Серегина, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т. 22, № 4–1. – С. 44–49.

68. Батраков Д.О. Сравнительный анализ спектральных характеристик сигналов подповерхностных РЛС для оценки дорожного покрытия / Д.О. Батраков, М.С. Антюфеева, А.Г. Батракова. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2021. – Т. 64, № 5. – С. 275–285. doi: 10.20535/S0021347021050022.

69. Zhu Y. Ground target recognition using carrier-free UWB radar sensor with a semi-supervised stacked convolutional denoising autoencoder / Y. Zhu, S. Zhang, X. Li [and etc.]. // IEEE Sensors journal. – 2021. – V. 21, №. 18. – P. 20685-20693. doi: 10.1109/JSEN.2021.3099823.

70. Jiang D. Simulation and experiment technology of EMP measurement / D. Jiang, Y. Su, P. He, Y. Wang. // Conference: 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). – 2016. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059179.

71. Бобрешов А.М. Оптимизация угла раскрыва ТЕМ-рупора для эффективного излучения сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, И.И. Мещеряков, Г.К. Усков. // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 3. – С. 320–324.

72. Taylor J.D. Ultrawideband radar: applications and design / J.D. Taylor. – CRCpress, 2017. – 528 p. doi: 10.1201/b12356.

73. Бобрешов А.М. Особенности измерения характеристик антенн во временной области с помощью сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2022 – Т. 65, № 1. – С. 16–22.

74. Бобрешов А.М. Построение энергетических диаграмм направленности антенн при излучении сверхширокополосных сигналов / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Материалы Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов, 2016. – С. 124-127.

75. Miller E.K. Time-Domain Measurements in Electromagnetics / E.K. Miller. – New York: Van Nostrand. Reinhold Company, 1986. – 536 p.

76. Времяимпульсный метод измерения характеристик антенн в ближней зоне / С. В. Горюнова, С. В. Дрожилкин, В. Н. Жаворонков [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. – 1989. – Т. 32, №. 1. – С. 73-83.

77. Kardo-Sysoev A.F. Generation and radiation of UWB-signals / A.F. Kardo-Sysoev. // 33rd European Microwave conference. – Munich, 2003. – P. 845-848.

78. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. / М.П. Долуханов. – М.: Связь, 1972. – 336 с.

79. Бобрешов А.М. Синтез неоднородной диэлектрической среды для улучшения характеристик ТЕМ-рупора / А.М. Бобрешов, П.А. Кретов, Н.С. Сбитнев, Г.К. Усков. // Радиотехника. – 2016. – № 6. – с. 159-162.

80. Бобрешов А.М. Экспериментальное исследование ТЕМ-рупора с неоднородным диэлектрическим заполнением / А.М. Бобрешов, П.А. Кретов, Н.С. Сбитнев, Г.К. Усков. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2016. – Т. 19, № 3. – с. 6-11.

81. Бобрешов А.М. Составная вибраторная сверхширокополосная антенна / А.М. Бобрешов, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. – Воронеж, 2018. – С. 251-255.

82. Бобрешов А.М. Широкополосная комбинированная антенна / А.М. Бобрешов, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-

технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. – Москва, 2019. – С. 104-108.

83. Бобрешов А.М. Всенаправленная широкополосная вибраторная антенна / А.М. Бобрешов, Г.К. Усков, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов. // Антенны. – 2019. – Т. 262, № 8. – С. 5-11.

84. Патент на полезную модель № 197922 U1 Российская Федерация, МПК H1Q 9/18. Штыревая антенна с емкостными нагрузками : № 2020104094 : заявл. 30.01.2020 : опубл. 05.06.2020 / Г.В. Подшивалова, А.Ю. Пикалов, С.Е. Нескородов; заявитель Акционерное общество «Концерн «Созвездие» (АО «Концерн «Созвездие»).

85. Бобрешов А.М. Исследование вибраторной антенны с емкостной вставкой / А.М. Бобрешов, Д.П. Кондратьев, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. – Воронеж, 2021. – С. 228-232.

86. Патент на изобретение №US 9379441 B2 USA. Very wide band tactical vehicular antenna system : заявл. 21.05.2013 : опубл. 28.06.2016 / А. М. Gary, М. John.

87. Патент на изобретение № US 8779996 B2 USA. Low profile, broad band monopole antenna with heat dissipating ferrite/powder iron network and method for constructing the same : заявл. 21.06.2010 : опубл. 15.07.2014 / А.М. Gary, R.J. Henry.

88. Патент на изобретение № 1626289, SU, Советский Союз. Антенна : заяв. 04.04.1988 : опубл. 07.07.1991 / В.Б. Ахмедов, Н.М. Корчевский, А.Ф. Зотов [и др.].

89. Овсянников В.В. Вибраторные антенны с реактивными нагрузками / В.В. Овсянников. – М.: Радио и связь, 1985. – 120 с.

90. Фано Р. Теоретические ограничения согласования произвольных импедансов / Р. Фано. – Ленинград, 1965. – 71 с.

91. Муравьев Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн / Ю.К. Муравьев. – Ленинград, 1978. – 395 с.

92. Бобрешов А.М. Измерение характеристик антенн импульсными сигналами / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, Г.К. Усков. // XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Сборник трудов. – Воронеж, 2018. – Т. 4. – С. 43-47.

93. Бобрешов А.М. Измерение характеристик излучателя в условиях переотражений / А.М. Бобрешов, С.Е. Нескородов, К.В. Смусева, Г.К. Усков. // В книге: V Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021». Материалы XIX Международной научно-технической конференции. – Самара, 2021. – С. 223-224.

94. Радзиевский В.Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В.Г. Радзиевский, П.А. Трифионов. – М.: Радиотехника, 2009. – 288 с.

95. Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В.А. Кутев. – М.: Советское радио, 1977. – 176 с.

96. Надененко С.И. Антенны / С.И. Надененко. – М.: Связьиздат, 1959. – 555 с.

97. Петренко В.И. Системы и средства подвижной радиосвязи. Учебное пособие / В.И. Петренко, В.Е. Рачков, Ю.В. Иванов. – Ставрополь: СВИС РВ, 2010. – 231 с.

98. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев – М.: Высшая школа, 1970. – 443 с.