

УДК 538.87

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Д. М. Пономарев, А. В. Горячев, В. Н. Жаворонков, С. В. Горюнова

Проведено экспериментальное исследование переходных характеристик антенн путем облучения их импульсными электромагнитными полями. Показана возможность определения время-импульсным методом традиционных параметров антенн в условиях лабораторных помещений и открытых полигонов с использованием пространственно-временной селекции сигналов. Приводятся и обсуждаются результаты исследований временных характеристик и диаграмм направленности различных антенн.

Время-импульсные методы исследования находят все более широкое применение для анализа открытых систем и, в частности, антенных устройств [1], что связано с развитием техники генерирования и приема сверхкоротких импульсных сигналов, а также методов их обработки на ЭВМ.

Использование для исследования антенн импульсных электромагнитных полей, благодаря их высокой разрешающей способности, дает возможность селекции сигналов, рассеянных объектами, распределенными в пространстве. При этом можно выделить результат взаимодействия импульсного электромагнитного поля с каждым конкретным объектом, если расстояние между ними превышает разрешающую способность системы, определяемую длительностью переходного процесса в антенне и возбуждающих ее цепях.

Таким образом, время-импульсный метод исследования антенн позволяет разделить во времени сигналы, несущие информацию об анализируемой антенне от сигналов, отраженных от окружающих предметов. Это приводит к значительному снижению требований к оборудованию измерительных полигонов и в целом ряде случаев позволяет проводить высококачественные измерения без использования дорогостоящих безэховых камер (БЭК) в условиях лабораторных помещений и на открытых полигонах. Кроме того, применение время-импульсных методов позволяет получать разнообразные характеристики антенных систем и трактов в широкой полосе частот, проводить исследование электромагнитной совместимости (ЭМС) и переходных процессов, возникающих при воздействии электромагнитных импульсов (ЭМИ).

Реализация временного подхода требует значительного усложнения аппаратных и программных средств обработки сигналов [2], развитие которых затрудняется во многом нетрадиционностью время-импульсных методов исследования антенных систем. Особенности электромагнитных процессов излучения при импульсном возбуждении антенн могут быть проиллюстрированы на примере элементарного диполя Герца, напряженность электрического и магнитного полей которого имеет вид [3]

$$E(t, r) = z_0 \frac{s}{4\pi c} \left[\frac{1}{r} \frac{di}{dt} \frac{r \times (r \times s)}{sr^2} + \frac{c}{r^2} i + \right. \\ \left. + \frac{c^2}{r^3} \int idt \left(\frac{3(s \cdot r) \times r}{sr^2} - \frac{s}{s} \right) \right],$$

$$\vec{H}(t, r) \approx \frac{s}{4\pi c} \left(\frac{1}{r} \frac{di}{dt} + \frac{c}{r^2} i \right) \frac{(s \times r)}{sr},$$

где $i = i(t - r/c)$ — временная зависимость тока в диполе Герца, r — радиус-вектор точки наблюдения поля, s — дипольный момент, c — скорость распространения электромагнитной волны. Анализируя приведенные выражения, можно сделать вывод о том, что при импульсном возбуждении антенн характер временной зависимости поля в ближней и дальней зоне неодинаков. Действительно, напряженность электрического поля в дальней зоне ($E \sim 1/r$) обусловлена производной от тока диполя, тогда как в ближней зоне напряженность поля пропорциональна току ($E, H \sim 1/r^2$) и интегралу от тока ($E \sim 1/r^3$).

В случае дальней зоны для произвольной антенны можно, очевидно, ввести импульсную переходную характеристику антенны $h(t, \gamma, \varphi)$, однозначно связанную с временной зависимостью тока и, следовательно, однозначно характеризующую антенну. При этом γ и φ определяют угловую ориентацию антенны относительно фронта падающей волны.

В настоящей работе исследовался характер переходных процессов в антеннах при их облучении импульсным электромагнитным полем из дальней зоны.

Связь между выходным сигналом антенны и импульсным полем в зоне приема описывается уравнением свертки [4].

$$u_{\text{вых}}(t) = \int_0^t E_z(\tau) h(t - \tau, \gamma, \varphi) d\tau,$$

где $E_z(\tau)$ — временная зависимость тангенциальной компоненты электрического поля, $u_{\text{вых}}(t)$ — напряжение сигнала на выходе антенны, $h(t - \tau, \gamma, \varphi)$ — импульсная характеристика антенны, а τ — переменная интегрирования.

Поскольку большинство антенн являются линейными устройствами, то можно найти все традиционно используемые в антенной технике характеристики антенн. Например, с помощью преобразования Фурье $h(t, \gamma, \varphi)$ находится частотная характеристика исследуемой антенны. Определив частотные характеристики антенны для различных угловых ориентаций γ, φ , можно построить серию диаграмм направленности в диапазоне частот. Однако временные характеристики антенн дают не менее ценную информацию об исследуемых их свойствах, поскольку вид импульсной характеристики целиком определяется электрическими размерами, конфигурацией, ориентацией, резонансными и другими параметрами антенных систем. Форма импульсной характеристики отражает также особенности расположения антенны на элементах конструкций носителя. При этом время-импульсный подход позволяет оценить вклад каждого элемента конструкции в свойства исследуемой антенны за счет пространственно-временного разделения.

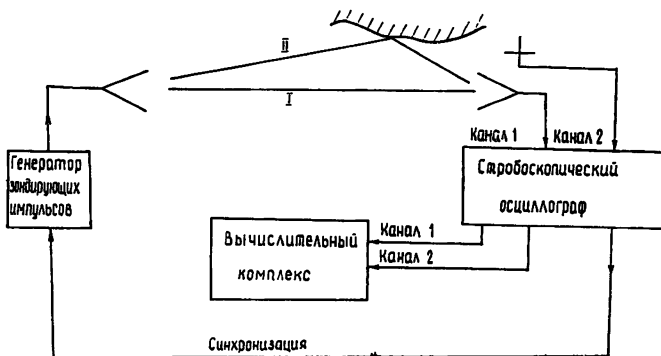


Рис. 1.

Исследования характеристик антенных систем во временной области проводились на экспериментальной установке, блок-схема которой приведена на рис. 1.

Установка содержит генератор зондирующих импульсов с длительностью фронта менее 70 пс, импульсную ТЕМ-антенну, используемую для формирования импульсного волнового фронта, исследуемую антенну, которая подключается ко входу приемного регистрирующего устройства стробоскопического осциллографа, эталонную антенну и ЭВМ, осуществляющую обработку информации и управление измерительной аппаратурой. Выделение полезных сигналов осуществляется путем пространственно-временной селекции сигналов, принятых исследуемой антенной. На рис. 2а в качестве иллюстрации показаны зарегистрированные сигналы на выходе исследуемой рупорной антенны, рядом с которой в соответствии с рис. 1 помещен отражающий металлический экран (масштаб по оси времени — 2 нс). Расстояние в направлении I составляло ~ 4 м, а в направлении II $\sim 5,5$ м. Как можно заметить, сигналы, принятые в направлении I (кривая 1 рис. 2а) и в направлении II (сигнал, отраженный от металлического экрана, кривая 2 рис. 2а), локализованы и разделены во времени. Взвешивание зарегистрированных сигналов функцией «временного окна» 3 (см. рис. 2а) позволяет избавиться от мешающих отражений (рис. 2б). Участки сигнала, входящие в «окно», в результате обработки практически не искажаются, а сигналы мешающих отражений, выходящие за пределы «окна», подавляются.

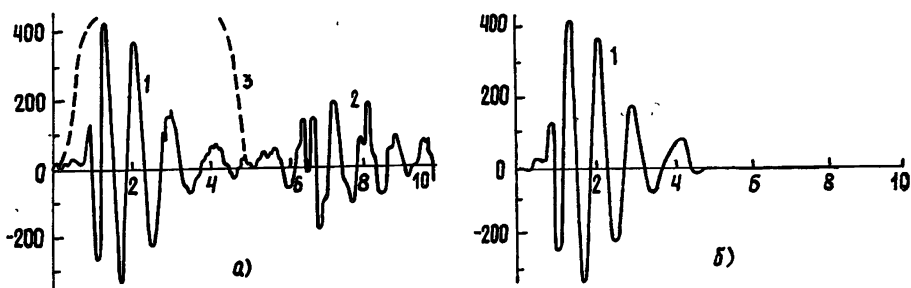


Рис. 2.

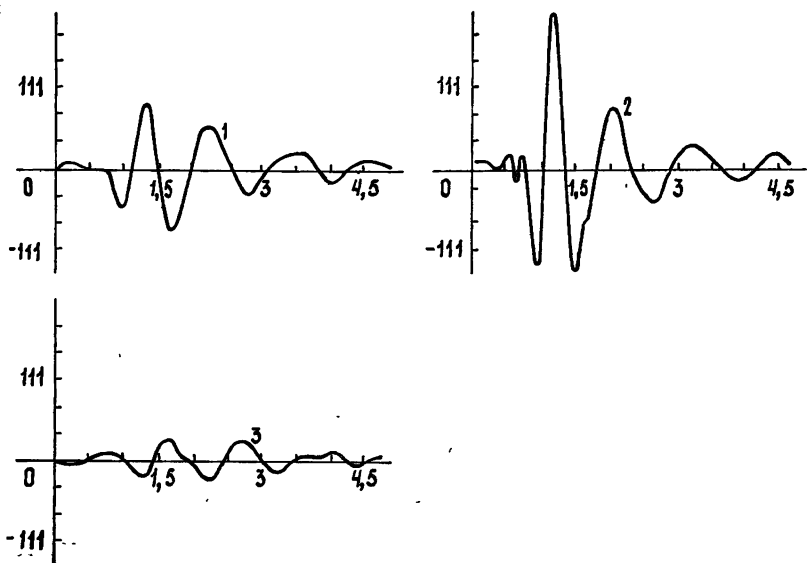


Рис. 3.

Длительность временного «окна» должна определяться из условия «безэховости»

$$t_{\text{н}} < T < (l_{\text{II}} - l_{\text{I}}) / c,$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность отклика исследуемой антенны, а l_1 и l_2 — длины путей распространения импульсного волнового фронта, c — скорость света. Следует заметить, что длительность отклика $t_{\text{и}}$ зависит от добротности исследуемой антенны (диапазона принимаемых частот) и для узкополосных антенн может быть значительной. Однако, как правило, соответствующим выбором пространственного расположения исследуемой и зондирующей антенн можно обеспечить выполнение условия «безэховости» и тем самым реализовать эффективное подавление влияния мешающих отражений и возможность исследований характеристик антенн во временной области в обычных лабораторных условиях.

На рис. 3 представлены результаты исследования импульсной реакции штыревой антенны длиной 5 см, расположенной на проводящем диске диаметром 20 см. Выбор такого объекта не случаен, поскольку его характеристики поддаются теоретическому расчету [5]. Кривые 1, 2, 3 соответствуют сигналам на выходе антенны для различных ракурсов, соответствующих углам места 0; 30; 60° относительно направления на зондирующую антенну (масштаб по оси времени в наносекундах). Размер исследуемой антенны мал по сравнению с пространственной протяженностью волнового фронта. Поэтому такая антенна для зондирующего сигнала эквивалентна колебательному контуру, что хорошо иллюстрируется рис. 3. Следует отметить, что частота колебаний сигнала соответствует в этом случае рабочей частоте антенны (1,5 ГГц), а характер затухания определяет добротность и полосу пропускания антенны.

На рис. 4 показана осциллограмма сигнала с выхода штыревой антенны длиной 31,5 см (масштаб по оси времени в 2 нс). Эта антенна представляет собой пример узкополосной антенны (отношение ширины полосы пропускания по уровню 3дБ к центральной частоте составляет 10%), длительность временного отклика которой ~ 10 нс. Для получения неискаженной картины отклика в соответствии с условием «безэховости» исследуемая антенна помещалась на расстоянии ~ 2 м

от зондирующей антенны и отражающих предметов (оборудование, потолок, пол, стены лаборатории). В данном случае размеры антенны превышают разрешающую способность системы (~ 10 см), определяемую длительностью фронта зондирующего импульса, что позволяет наблюдать более тонкие процессы взаимодействия импульсного

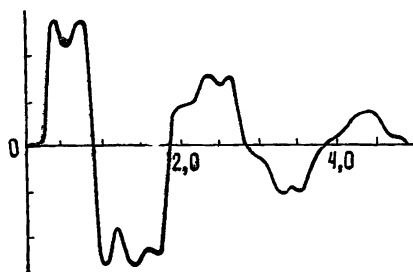


Рис. 4.

электромагнитного поля и определенной антенной системы. Рис. 4 можно интерпретировать как распространение наведенного импульсного сигнала вдоль штыревой антенны, претерпевающего отражения от разъемного соединения и конца антенны. С течением времени, за счет более эффективного переизлучения и диссипации волн высших мод, наведенный в антенне сигнал вырождается в колебания затухающего осциллятора, соответствующие основной частоте антенны ~ 200 МГц. Заметим, что начальный короткий импульсный выброс, представленный на рис. 4, определяется непосредственным приемом импульсного электромагнитного поля областью разъемного соединения антенны. Эти результаты хорошо согласуются с теоретическими результатами, изложенными в [5].

На рис. 5 показаны сигналы, принятые спиральной антенной с переменным шагом и рабочим диапазоном 0,6 — 1,2 ГГц. Кривая 1 соответствует направлению спирали на облучающую антенну. При этом хорошо наблюдается линейно-частотная модуляция сигнала, принятого антенной, обуславливаемая дисперсионными свойствами антенны.

Поворот антенны приводит к существенному изменению фазовой структуры принимаемого сигнала, что определяет изменение формы импульсного отклика спиральной антенны при изменении ее углового положения. При угле, соответствующем 90° , сигнал, принятый спиральной антенной (кривая 2), имеет вид одиночного импульса, что обусловлено синфазным сложением сигналов от отдельных кольцевых элементов этой антенны. Интересно заметить, что верхнюю и нижнюю границы частотного диапазона спиральной антенны можно оценить непосредственно по импульсному сигналу, измерив начальный и конечный периоды колебаний.

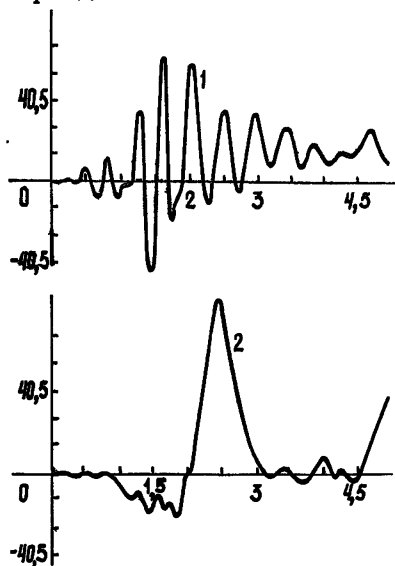


Рис. 5.

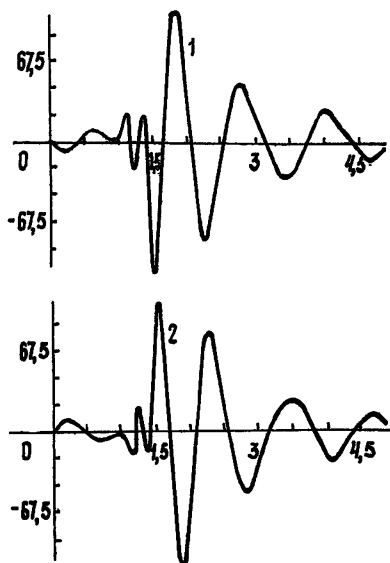


Рис. 6.

Поляризационные свойства антенн во временной области иллюстрирует рис. 6. На нем представлены сигналы, принятые стандартной измерительной антенной ПБ-23 для двух случаев противоположной поляризации (кривые 1 и 2). Заметим, что сигналы имеют противоположную полярность — это иллюстрирует наглядность интерпретации поляризационных эффектов во временной области.

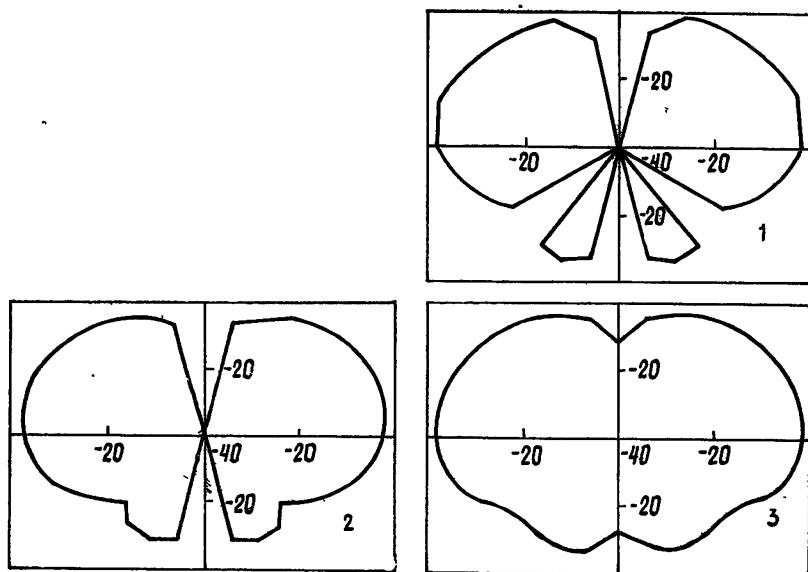


Рис. 7.

В работе исследовались также и характеристики направленности антенн во временной области. Для этого зарегистрированные на различных ракурсах антенны сигналы подвергались фурье-обработке, и по амплитудным значениям, на заданной частоте, формировались диаграммы направленности. Важно отметить, что импульсный метод позволяет определять одновременно целый спектр диаграмм направленности в широкой полосе частот. При этом погрешности определения диаграмм направленности на отдельных частотах во многом определяются погрешностями, связанными с точностью фиксации импульсных откликов антенны измерительной аппаратурой (в частности, стробоскопическим осциллографом) [1] и особенностями процедуры фурье-анализа (выбором функции временного окна и шага дискретизации) [6]. В нашем случае диаграммы направленности формировались в диапазоне частот от 100 до 4000 МГц, который определялся крутизной фронта переходной характеристики зондирующей импульсной антенны (~ 100 пс) и длительностью временного окна фурье-анализа (~ 10 нс). Погрешность фиксации импульсных откликов исследуемых антенн составляла ~ 10 пс, что соответствует эквивалентным пространственным перемещениям $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 7 показаны в сравнении угломестные диаграммы направленности штыревой антенны длиной 5 см на отражающем диске диаметром 20 см для частоты 1,5 ГГц: кривая 1 соответствует теоретической диаграмме направленности [7], кривая 2 определяет диаграмму направленности, снятую с помощью время-импульсного метода, а кривая 3 получена традиционным частотным методом. Отметим хорошее совпадение теоретической кривой 1 и кривой 2 диаграммы направленности, полученной импульсным методом. Поскольку измерения проводились в обычных лабораторных условиях при наличии различного рода переотражений, то диаграмма направленности, снятая в частотной области на гармоническом сигнале (кривая 3), значительно искажена, а ее динамический диапазон не превышает 10 дБ.

На рис. 8 показана диаграмма направленности спиральной антенны на частоте 1 ГГц, а на рис. 9 — диаграммы направленности измерительной антенны ПБ-23: кривая 2 соответствует измеренной время-импульсным методом диаграмме направленности, а кривая 1 отражает паспортную диаграмму. Отличия в этом случае не превышают 2 дБ.

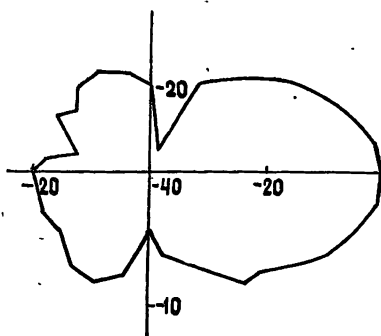


Рис. 8.

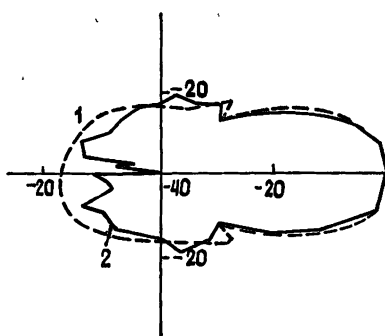


Рис. 9.

Таким образом, проведенные эксперименты показали высокую эффективность время-импульсных методов для анализа и измерения характеристик антенных устройств. В частности, исследования диаграмм направленности разнообразных антенн показали возможность измерений характеристик антенн с помощью данной экспериментальной установки в обычных лабораторных условиях, не отвечающих требованиям безэховых камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Глебович Г. В., Андриянов А. В., Введенский Ю. В. — М.: Радио и связь, 1984.

2. Введенский Ю. В., Горячев А. В., Пономарев Д. М., Жаворонков-В. Н. — Измерительная техника, 1985, № 10, с. 90.
3. Хармут Х. Ф. Теория секвентного анализа. — М.: Мир, 1980, с. 266.
4. Беннет Л., Росс Г. — ТИИЭР, 1978, 66, № 3.
5. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. — М.: Мир, 1977.
6. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978.
7. Пименов Ю. В., Давыдов А. Г. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 1, с. 101.

Горьковский политехнический институт

Поступила в редакцию
13 сентября 1985 г.,
в окончательном варианте
11 марта 1987 г.

TIME DOMAIN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ANTENNA SYSTEMS

D. M. Ponomarev, A. V. Goryachev, V. N. Zhavoronkov, S. V. Goryunova

The experimental investigation of the antenna transient response treated with pulse fringe field is conducted. The measurement possibility of the antenna traditional characteristics using the pulse method under laboratory and conditions testing ground by the timespace selection of the reflection interference is shown. The measurement results of the temporal characteristics and sector-shaped directional patterns are given and discussed.

ИНСТРУКЦИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ РЕФЕРАТОВ

1. В реферате кратко излагается основное содержание статьи. Реферат должен дать читателю представление о характере освещаемой работы, оригинальности постановки вопроса, методике проведения исследования и его основных результатах.

2. Реферату должно предшествовать библиографическое описание в следующем виде: название статьи, фамилия и инициалы автора, название журнала, где помещается статья. Текст реферата начинается непосредственно с изложения существа работы без повторения заголовка. Форма изложения материала не обязательно должна повторять форму изложения оригинальной статьи.

3. Если оригинал содержит большое количество цифровых данных, их следует обобщить и систематизировать.

4. Средний объем реферата 1,5—2 страницы машинописного текста, отпечатанного через два интервала на белой писчей бумаге обычного формата (30×21) в двух экземплярах с полем 4 см с левой стороны.

5. Таблицы, схемы, графики и пр. могут быть включены в том случае, если они отражают основное содержание работы или сокращают текст реферата. Сообщение о наличии в реферируемой работе таблиц, схем, графиков, фотографий, карт, рисунков необходимо давать в конце реферата. Например, табл. 2, ил. 10.

6. Формулы приводятся только в том случае, если они необходимы для понимания статьи. Громоздкие математические выражения помещать не следует. Формулы следует вписывать четко, не изменяя принятых в оригинале обозначений величин. Формулы и буквенные обозначения вписываются черными чернилами во второй экземпляр. Вписывание формул и буквенных обозначений, а также исправление замеченных опечаток в первом экземпляре не делается.

7. В конце реферата в квадратных скобках указывается название учреждения, или предприятия, в котором автор реферируемой работы (если эти данные приводятся в статье) провел работу. Подпись автора и дату написания реферата следует ставить в левом нижнем углу на обоих экземплярах реферата.