УДК 621.372

А.Г. Лощилов, Э.В. Семёнов, Н.Д. Малютин, А.О. Мисюнас, А.А. Ильин

Разработка устройств обработки сверхширокополосных импульсных сигналов для исследования нелинейных свойств объектов методом нелинейной рефлектометрии

Разработаны функциональные устройства формирования и обработки сверхширокополосных тестовых сигналов специальной формы для исследования нелинейных свойств объектов методом нелинейной рефлектометрии. Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований параметров разработанных устройств. Изготовленные узлы вошли в состав экспериментальной установки для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия.

Ключевые слова: сверхширокополосные сигналы, нелинейная рефлектометрия, формирователь, направленный ответвитель, импульсное воздействие.

Введение

В соответствии с методом нелинейной рефлектометрии [1–3] для получения нелинейной рефлектограммы устройства необходимо осуществить воздействие на него парой тестовых сигналов, один из которых является линейным преобразованием другого. Особый интерес представляет режим импульсного воздействия, при котором один из сигналов является видеоимпульсом (импульс Гаусса, трапециидальный) или близким к нему по форме, а второй представляет собой результат фазовой обработки исходного импульса. Такая обработка может осуществляться либо в цифровом виде с последующим цифроаналоговым преобразованием, либо путем аналоговой обработки исходного тестового воздействия (например, перепада напряжения) линейной цепью.

Первый из подходов реализован в приборе векторный импульсный измеритель характеристик цепей Р4-И-01 [4], где наряду с цифровым синтезом сигнала применяется оцифровка откликов в реальном масштабе времени. Недостатком подхода является существенное ограничение по верхней граничной частоте анализа, которая определяется техническими характеристиками современной элементной базы и составляет около 1 ГГц.

Второй подход основан на аналоговом формировании периодической последовательности тестовых сигналов специальной формы и стробоскопической оцифровке откликов исследуемого объекта. Такой подход к исследованию характеристик нелинейности в режиме сверхширокополосного (СШП) импульсного воздействия является более предпочтительным в СВЧ-диапазоне [5].

Постановка задачи

Разработка экспериментальной установки для исследования СВЧ-цепей методом нелинейной рефлектометрии [6] подразумевает разработку специальных устройств обработки сверхширокополосных сигналов. В задачи обработки входит: формирование последовательности сверхширокополосных сигналов специальной формы из исходного перепада напряжения; выделение падающих и отраженных компонент электромагнитных волн, образующихся на входе исследуемого устройства; регистрация сигналов стробоскопическим осциллографом.

На рис. 1 приведен пример формы тестового воздействия, позволяющий проводить исследования нелинейных свойств объекта методом нелинейной рефлектометрии.

На графиках сигналов (см. рис. 1) можно выделить два временных интервала: первый интервал (0–0,5 нс) соответствует положению первого зондирующего сигнала, форма которого близка к видеоимпульсу; на втором временном интервале (4–6 нс) действует сигнал, представляющий собой результат фазовой обработки первого сигнала. Фазовая обработка позволяет уменьшить амплитуду второго тестового воздействия при сохранении общей энергии сигнала в заданной полосе частот, т.е. увеличить базу второго сигнала.

Второй задачей при проведении измерений временных и частотных характеристик устройств является задача раздельной регистрации падающих и отраженных компонент сигналов, образующихся на входе исследуемого устройства.

Далее рассмотрены вопросы проектирования, изготовления и экспериментальных исследований аналоговых устройств формирования и обработки широкополосных сигналов, предназначенных для проведения измерений характеристик СВЧ-цепей с использованием метода нелинейной рефлектометрии.

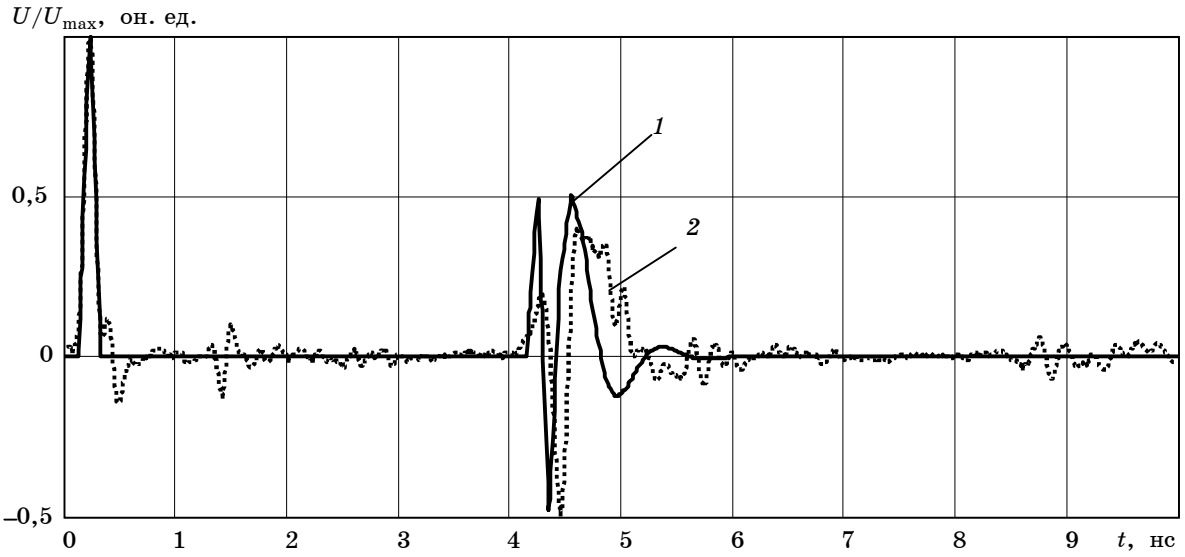

Рис. 1. Форма тестового воздействия для проведения измерений методом нелинейной рефлектометрии: *1* – расчетная; 2 – экспериментальная

Формирователь дополнительного перепада напряжения

Формирователь дополнительного перепада напряжения осуществляет первый этап формирования тестового воздействия в соответствии с рис. 1, а именно обработку фронта исходного широкополосного воздействия и получение дополнительного перепада напряжения, являющегося результатом обработки исходного перепада линейной цепью. Между исходным и дополнительным перепадами напряжения должна быть задержка по времени, величина которой определяет размер окна наблюдения рефлектограммы объекта.

Получение дополнительного перепада напряжения сигнала, задержанного относительно основного на некоторое время τ, возможно путем включения в основную линию разомкнутого шлейфа, время распространения сигнала в котором равно $\tau/2$. Изменение формы второго перепада напряжения по отношению к исходному перепаду достигается путем включения в качестве нагрузки шлейфа формирующего двухполюсника, осуществляющего фазовую обработку сигнала.

На рис. 2 приведен внешний вид разработанного формирователя дополнительного перепада напряжения.

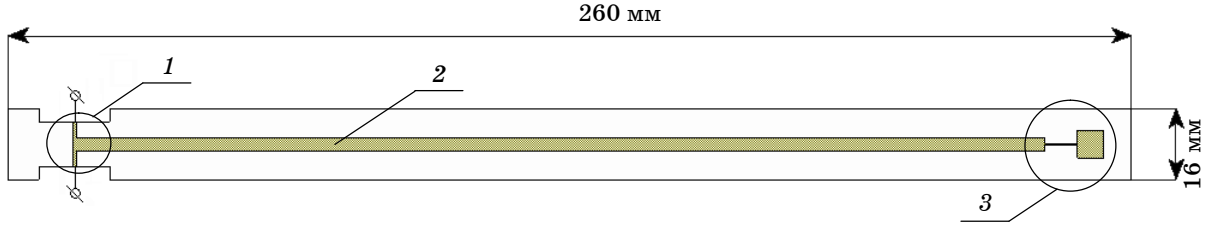

Рис. 2. Формирователь дополнительного перепада напряжения:
1 – тройник; *2* – линия задержки; *3* – формирующий двухполюсник

Формирователь представляет собой шлейф, включенный в основную линию передачи и нагруженный на формирующий двухполюсник. Время распространения сигнала в шлейфе составляет 2 нс. Волновое сопротивление шлейфа Z_0 = 25 Ом. Формирующий двухполюсник (рис. 2, поз. *3*), представляет собой ряд каскадно-включенных отрезков линии передачи с волновым сопротивлением от 75 до 15 Ом. Время распространения сигнала в каждом из отрезков линии передачи составляет 60 пс. На рис. 3 приведены расчетные частотные характеристики формирующего двухполюсника.

Как видно из рис. 3, формирующий двухполюсник имеет близкий к единице модуль коэффициента отражения во всей полосе частот анализа. При этом зависимость группового времени запаздывания (ГВЗ) от частоты существенно неравномерна. В рабочей полосе частот двухполюсника (от 0 до 5 ГГц) наблюдается выброс ГВЗ величиной около 0,73 нс. Минимальное значение ГВЗ составляет 50 пс. Нужно отметить, что характеристика ГВЗ имеет периодический характер, ограничивающий полезную полосу рабочих частот. Рас-

ширение полосы частот возможно путем применения плавно-нерегулярного профиля формирующего двухполюсника [7].

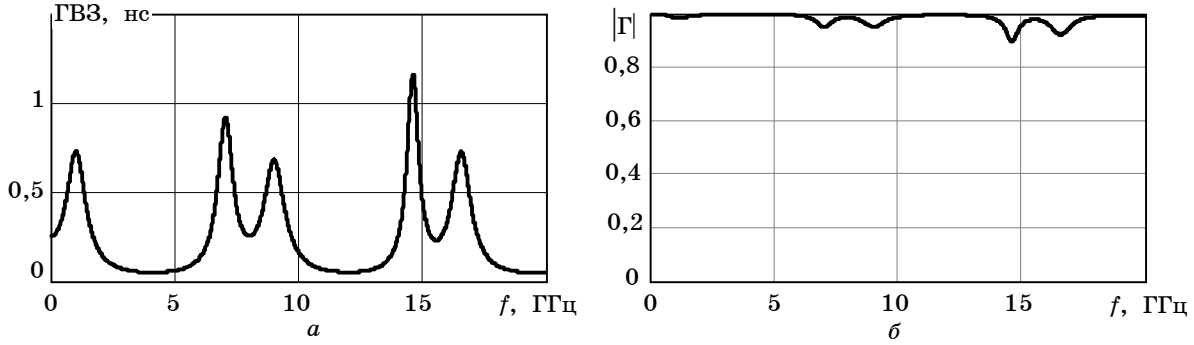

Рис. 3. Частотные характеристики формирующего двухполюсника:
а – групповое время запаздывания (ГВЗ); *б* – модуль коэффициента отражения

На основе результатов анализа был изготовлен формирователь дополнительного перепада напряжения и измерена его переходная характеристика. В качестве генератора исходного перепада напряжения использовался генератор импульсов Г5-84. Измерение сигнала на выходе устройства проводилось стробоскопическим осциллографом Tektronix 11801B. На рис. 4 приведены измеренная форма переходной характеристики формирователя (кривая *1*) и ее первая производная по времени (кривая *2*).

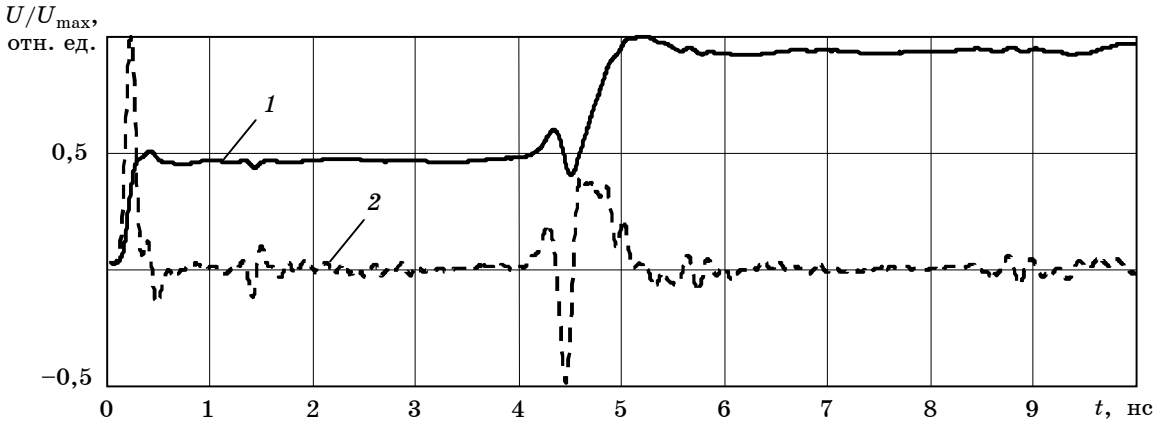

Рис. 4. Временные характеристики формирователя:
1 – переходная характеристика формирователя; *2* – импульсная характеристика формирователя

Разработанный формирователь позволяет получить дополнительный перепад напряжения путем линейной обработки исходного перепада напряжения с выхода генератора Г5-84. Для обеспечения режима импульсного воздействия на исследуемое устройство необходимо осуществить дифференцирование полученного сигнала.

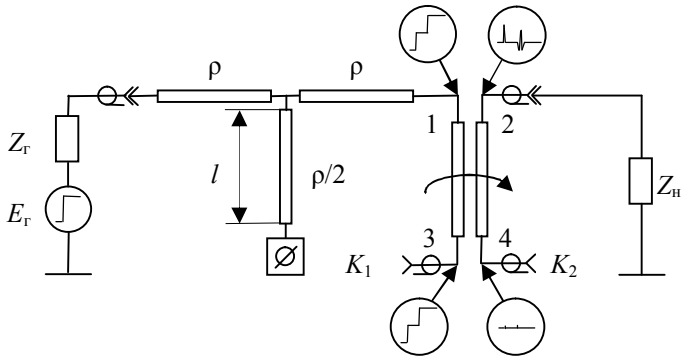

Рис. 5. Схема включения направленного ответвителя в измерительный тракт

Направленный ответвитель-формирователь импульсов

Как было отмечено выше, для формирования последовательности импульсных сигналов необходимо осуществить дифференцирование исходного сигнала, представляющего собой сумму перепадов напряжений. Кроме того, для исследования рассеяния сигнала объектом необходимо разделять падающую и отраженную составляющие сигнала. Данная задача в рамках одного устройства может быть решена путем применения широкополосного направленного ответвителя с сильной электромагнитной связью. Схема включения такого направленного ответвителя в измерительный тракт, поясняющая принцип работы, приведена на рис. 5.

В отличие от традиционных направленных ответвителей со связью порядка 16...20 дБ, применяемых в составе анализаторов характеристик цепей [8] и предназначенных для ответвления незначительной части мощности из измерительного канала без существенного искажения тестового сигнала, предлагаемый направленный ответвитель осуществляет обработку тестового воздействия путем дифференцирования. Для этого используется рабочий участок характеристики переходного ослабления от постоянного тока до центральной частоты направленного ответвителя. Проходная частотная характеристика основного канала в этой же полосе частот представляет собой характеристику интегрирующей цепи. Таким образом, на выходе *3* направленного ответвителя наблюдается сигнал, характеризующий тестовое воздействие (падающая составляющая сигнала), на выходе *2* получается сформированная последовательность импульсов. Выход *4* используется для регистрации сигнала, отраженного от исследуемой нагрузки.

Первичный анализ топологии устройства осуществлялся на основе расчета погонных параметров связанных линий методом конечных разностей. Оптимизация топологии устройства проводилась в САПР AWR Microwave Office. На рис. 6 приведена фотография устройства в открытом состоянии.

Направленный ответвитель-формирователь выполнен в виде трехсекционной структуры на основе тандемного включения отрезков нерегулярных полосковых связанных линий с лицевой связью. Ответвитель изготовлен на диэлектрике ФЛАН-2,8. Толщина верхней и нижней подложек составляет 1 мм. Толщина промежуточной подложки – 0,5 мм.

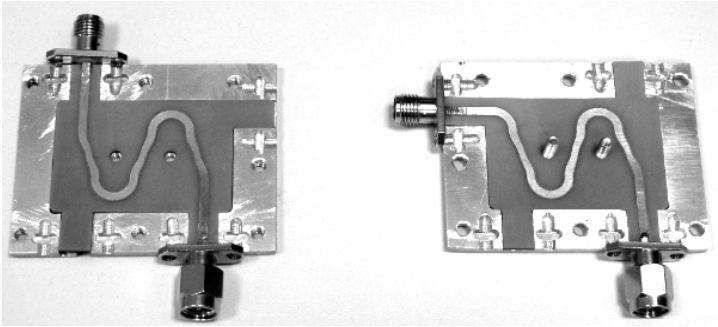

Рис. 6. Фотография направленного ответвителя-формирователя в открытом состоянии

На рис. 7 приведены расчетные и экспериментальные характеристики направленного ответвителя-формирователя. Экспериментальные частотные характеристики измерены с использованием векторного анализатора цепей Rhode & Schwartz ZVA40.

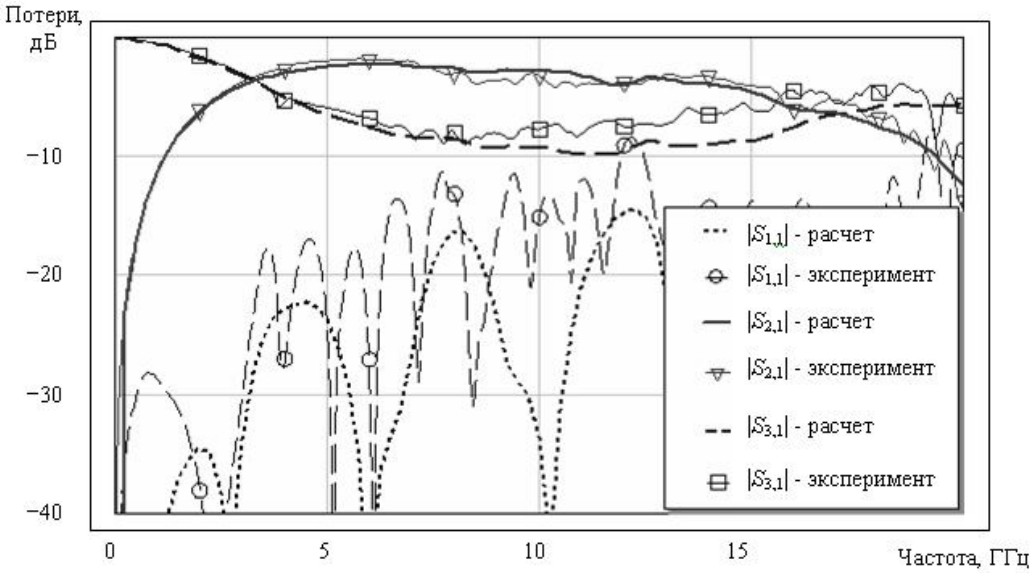

Рис. 7. Частотные характеристики направленного ответвителя-формирователя импульсов

Как видно из результатов измерений (см рис. 7) расчетные и экспериментальные характеристики достаточно хорошо согласуются. Величина переходного ослабления на центральной частоте ответвителя (10 ГГц) составляет −3,2 дБ, затухание в основном канале не превышает −8 дБ. К недостаткам получившейся конструкции относится достаточно высокий коэффициент отражения (−10 дБ на центральной частоте анализируемого диапазона). Это, однако, не имеет существенного значения, поскольку волна на вход направленного ответвителя поступает через отрезок коаксиального кабеля длиной 1 м и отраженные от входа ответвителя волны оказываются задержанными относительно полезных.

Заключение. Таким образом, разработаны и исследованы устройства обработки сверхширокополосных сигналов, предназначенные для формирования сигналов специальной формы и обработки откликов исследуемого объекта. Разработанные узлы успешно применяются в составе экспериментальной установки для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия [6].

Работа поддержана грантами в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты № П453 и № П690) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 09-08-99041).

Литература

1. Пат. 2227921 РФ, МПК[7] G01R23/16, G01S13/00. Способ исследования нелинейных свойств объекта / Э.В. Семёнов (РФ). - № 2002123629; заявл. 04.09.2002; опубл. 27.04.2004; Бюл. – № 12 (III ч.) – 1 с.

2. Семенов Э.В. Нелинейная рефлектометрия с применением видеоимпульсных тестовых сигналов // Известия Том. политех. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 153–155.

3. Семенов Э.В. Использование разности сверток тестовых сигналов и откликов объекта для исследования нелинейности преобразования сверхширокополосных сигналов / Э.В. Семенов, А.В. Семенов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 4. – С. 480–485.

4. Векторный импульсный измеритель характеристик цепей и проводных систем / А.А. Бомбизов, А.А. Ладур, А.Г. Лощилов и др. // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.

5. Средства измерений характеристик нелинейности преобразования сверхширокополосных импульсных сигналов в СВЧ диапазоне / А.Г. Лощилов, Э.В. Семёнов, А.П. Павлов, Н.Д. Малютин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымиКо '2010): матер. 20-й Междунар. конф., Севастополь, Украина, 13–17 сентября 2010 г. – Севастополь: Вебер, 2010. – Т. 2. – С. 977–978.

6. Лощилов А.Г. Экспериментальная установка для исследования характеристик нелинейности СВЧ-цепей в режиме сверхширокополосного импульсного воздействия / А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 1. – С. 161–165.

7. Салий И.Н. Канонические нерегулярные линии передачи и их эквивалентные представления // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике: 8-я зимняя школа-семинар инженеров. – Саратов: Изд-во СГУ, 1989. – Кн. 4. – С. 73–80.

8. Электрорадиоизмерения / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков и др.; под ред. А.С. Сигова. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 384 с.

Лощилов Антон Геннадьевич
Канд. техн. наук, директор НПФ «Сибтроника»
Тел.: (382-2) 25-33-60
Эл. почта: yogl@mail.ru

Семёнов Эдуард Валерьевич
канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа
Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Малютин Николай Дмитриевич
Д-р техн наук, начальник научного управления ТУСУРа
Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

Мисюнас Альгис Олегович
Начальник СКБ «Смена»
Эл. почта: rn1985@sibmail.com

Ильин Александр Алексеевич
Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа
Эл. почта: pjin@mail.ru

Loshchilov A.G., Semyonov E.V., Maliutin N.D., Misunas A.O., Iljin A.A.

The development of UWB pulse signals processing devices intended for investigations of the nonlinear properties of objects by non-linear reflectometry method

The functional devices, which are intended for ultra-wideband test signals forming and processing, have been designed for investigations of the nonlinear properties of objects by non-linear reflectometry method. The results of simulation and experimental investigations of the designed devices parameters are presented. The manufactured components were used in the experimental installation for analysis of nonlinear characteristics of microwave circuits in UWB pulse impact mode.

Keywords: UWB signals, nonlinear reflectometry, former, directional coupler, pulse excitation.