

Радиофотонный измерительный преобразователь напряжённости импульсного электрического поля в субнаносекундном диапазоне

А. В. СУХОВ, К. Ю. САХАРОВ, О. В. МИХЕЕВ, В. А. ТУРКИН,

В. Л. УГОЛЕВ, М. Ю. ДЕНИСОВ, Р. А. РОДИН

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,

Москва, Россия, sukhov@vniiofi.ru

Обосновано применение принципов радиофотоники для создания помехозащищённых и быстродействующих средств измерений сильных импульсных электромагнитных полей. Разработана схема радиофотонного измерительного преобразователя напряжённости импульсного электрического поля с временем нарастания переходной характеристики не более 100 пс.

Ключевые слова: радиофотоника, импульсное электрическое поле, преобразователь.

This paper argues the using of microwave photonic concepts for development of not susceptible to interference and rapid-acting measuring instruments of intensive pulse electromagnetic fields. The scheme of microwave photonic measuring transducer of pulse electric field intensity with transient response rise time up to 100 ps is developed.

Key words: microwave photonics, pulse electric field, transducer.

По мере развития средств измерений (СИ) высоких импульсных напряжений и сильных импульсных электромагнитных полей к характеристикам предъявляются всё новые требования. В настоящей работе авторы рассмотрели две ранее неизвестные и взаимосвязанные проблемы в области измерений сильных импульсных сигналов и предложили их общее решение.

Первая проблема связана с измерениями параметров электромагнитных импульсов с коротким фронтом (0,3–1 нс) и относительно большой длительностью (0,5–10 мкс). Подобные измерения необходимы при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры на устойчивость к внешним импульсным электромагнитным воздействиям, для контроля параметров поля в научных физических установках, а также в иных аналогичных задачах [1, 2]. В настоящее время импульсы с указанными параметрами измеряют следующим образом. Длительность фронта импульса определяют с помощью полоскового измерительного преобразователя, компенсирующего наведённые на линию связи помехи в ограниченном временном окне длительностью не более 5 нс [3]. Импульс постоянно регистрируется СИ, имеющим время нарастания переходной характеристики порядка 2–3 нс, например ёмкостным преобразователем с волоконно-оптической линией связи [4]. Затем результаты измерений комбинируются. На рис. 1 показано, что на некотором временном интервале возникает неопределённость измерений мгновенного значения импульсного сигнала, которую нельзя выразить количественно. На одной временной оси представлены выходные импульсы полоскового преобразователя (кривая 4, интервал между началом координат и прямой 5 соответствует длительности временного окна) и ёмкостного преобразователя (кривая 1) при регистрации реального импульса электрического поля (кривая 2). Для наглядности на оси ординат отложены условные единицы, а импульсы нормализованы по амплитуде A . Выделенная область 3 свидетельствует о том, что на некотором временном интервале возникает неопределённость измерений мгновенного значения импульсного сигнала, которую нельзя выразить количественно.

Вторая проблема обусловлена трудностями метрологического обеспечения измерений параметров генераторов быстронарастающих высоковольтных импульсов напряжения. Длительность фронта таких импульсов также находится в диапазоне 0,3–1 нс, а амплитуда составляет не более 100 кВ. Подобными генераторами оснащаются мобильные системы электромагнитного разминирования, оборонные комплексы радиоэлектронной борьбы, охранные системы. Такие генераторы применяются в физических установках (источниках питания мощных лазеров, ускорителях или в качестве драйверов ячеек Поккельса), в медицинской технике и других областях. Эталонов, осуществляющих передачу единицы импульсного напряжения рабочим СИ (например, высоковольтным делителям) и предназначенным для определения параметров подобных генераторов в указанном амплитудно-временном диапазоне, не существует. В настоящее время параметры импульсов напряжения указанных генераторов измеряют в эталонных установках на основе ТЕМ-камер с размещёнными в них полосковыми измерительными преобразователями напряжённости электрического поля. Измеряемый импульс напряжения сначала преобразуется в импульс поля в ТЕМ-камере, после чего импульс поля измеряется с помощью полоскового измерительного преобразователя, на выходе которого возникает эквивалентный импульс напряжения [3]. Однако временное окно, в котором проводятся данные измерения, опять же ограничено длительностью 5 нс, что совершенно недостаточно.

Одновременно указанные проблемы можно решить, если использовать быстродействующий и помехозащищённый измерительный преобразователь напряжённости импульсного электрического поля с фактически бесконечной по отношению к

длительности измеряемых импульсов длительностью временного окна. Требуемым характеристикам удовлетворяют преобразователи, основанные на принципах радиофотоники. В радиофотонных устройствах применяются оптические линии передачи с низкими потерями сигнала. Данные оптические линии устойчивы к электромагнитным помехам и имеют значительную широкополосность (быстродействие) [5, 6].

Основная сложность при создании радиофотонного преобразователя заключается в необходимости использования аналоговых компонентов радиофотонного тракта, так как быстросрастающие или высокочастотные сигналы нельзя оцифровать с требуемой частотой дискретизации. Задача разработчика – обеспечить высокую равномерность амплитудно-частотной характеристики для неискажённой передачи измеряемого импульсного сигнала к регистратору.

В данной статье определены возможные пути создания радиофотонного измерительного преобразователя. Область анализа была ограничена СИ, обеспечивающими максимальное быстродействие. Исходя из параметров измеряемых импульсов, время нарастания переходной характеристики преобразователя должно составлять не менее 100 пс. Авторы предложили схему радиофотонного измерительного преобразователя, удовлетворяющего сформулированным требованиям, а также определили основные технические решения по его компонентам.

Радиофотонные измерительные преобразователи.

Радиофотонные СИ параметров импульсных электромагнитных полей условно можно разделить на два типа. В СИ первого типа в качестве чувствительного элемента применяют электрооптический кристалл,

соединённый непосредственно с волоконно-оптической линией, а в СИ второго типа – антенну, сигнал с которой поступает на модулятор оптического сигнала и далее – в оптический тракт.

Малогабаритные СИ первого типа, не содержащие металлических частей, перспективно использовать для измерений напряжённости поля во внутренних объёмах технических средств при их испытаниях, определении параметров антенн, исследованиях характеристик материалов и в других случаях, когда необходимо минимизировать взаимодействие измерительного преобразователя с объектом измерений.

Принцип действия измерительного преобразователя напряжённости электрического поля с эффектом Поккельса в монокристалле танталата лития LiTaO_3 заключается в следующем [7]. На одном торце кристалла закреплена диэлектрическая пластинка-зеркало. Другой торец соединён с оптическим компенсатором (четвертьволновой пластинкой) и поляризатором. Ввод сигнала в волокно с сохранением поляризации осуществляется через градиентную линзу и стеклянный наконечник. Оптическую несущую генерирует лазер на длине волны $\lambda=1550$ нм. Диаметр кристалла составляет 1,5–2 мм, а его длина 2–10 мм. Выход первичного измерительного преобразователя сопряжён с блоком фотоприёмника (фотодиода). Ток $\tilde{I}$ на выходе фотодиода определяется выражением

$$\tilde{I} = 2\pi L \eta P K E / \lambda,$$

где η – чувствительность фотодиода; P – средняя мощность оптического излучения; L – длина электрооптического кристалла; λ – длина волны; $\mathbf{K}$ – вектор, линейно связывающий изменение показателя преломления кристалла во внешнем электрическом поле

напряжённостью E .

Быстродействующие преобразователи, работающие по такому принципу, выпускаются фирмами Kapeos (Франция), Seikoh Giken (Япония) и Корейским институтом эталонов и науки (KRISS, Южная Корея) [7–9]. В совместной работе Института общей физики РАН и ВНИИОФИ описан прототип подобного измерительного преобразователя, имеющего органический электрооптический кристалл DAST в качестве чувствительного элемента [10]. Данный кристалл встроен в одно из плеч интерферометра Маха–Цендера. Измерительные преобразователи на основе электрооптических кристаллов обладают исключительной широкополосностью – от единиц мегагерц до десятков гигагерц, что соответствует минимальному времени нарастания переходной характеристики порядка 10–20 пс. К их недостаткам следует отнести низкую чувствительность (порог чувствительности для СИ электрического поля составляет в среднем 1 кВ/м) и температурную нестабильность. Температурный диапазон, как правило, ограничен лабораторными условиями, а для температурной компенсации необходимо применение контроллера рабочей точки.

Если из электрооптического кристалла танталата или ниобата лития изготовить микрорезонатор, например, на модах шепчущей галереи) и присоединить его к выходу диэлектрической резонаторной антенны, то можно в разы повысить чувствительность преобразователя [11, 12]. Однако использование резонаторов приводит к резкому повышению добротности и, соответственно, ухудшению полосы пропускания такого преобразователя до 500 МГц и ниже, что делает его непригодным для сверхширокополосных измерений.

Средства измерений второго типа, где первичный

преобразователь содержит традиционную антенну, имеют более высокую чувствительность, однако обладают худшей широкополосностью и не являются малоинвазивными. Выходной сигнал антенны может как напрямую модулировать ток лазерного диода, генерирующего оптическую несущую, так и подаваться на электрооптический модулятор, включённый в оптический тракт [13]. На рис. 2 показаны возможные варианты подключения антенны. Электрооптический модулятор представляет собой интерферометр Маха–Цендера (схема «на проход») или Майкельсона (схема «на отражение»), собранный на кристалле, как правило, ниобата или танталата лития. Схема с интерферометром Майкельсона удобнее для применения, так как в ней требуется подвести только одно волокно к модулятору, при этом антенну можно лучше позиционировать в зоне измерений. Минимальное время нарастания переходной характеристики таких преобразователей может составлять порядка 50 пс (типовые значения находятся в пределах 100–200 пс), диапазон измерений варьируется от десятков вольт на метр до сотен киловольт на метр [13, 14].

При выборе схемы радиофотонного преобразователя не следует забывать, что его можно использовать вне лабораторных условий, например на полигонах в имитаторах электромагнитных импульсов. Несмотря на то, что вопросы температурной стабилизации теоретически решаемы, применение электрооптических кристаллов в полевых условиях достаточно затруднительно. Низкая чувствительность преобразователей с электрооптическим кристаллом не является препятствием, когда речь идет об измерении сильных полей.

В случае построения радиофотонного измерительного

преобразователя по схеме со сверхширокополосной антенной принципиальной разницы в схемах с модулятором и прямой модуляцией нет. Дело в том, что схема с прямой модуляцией кажется самой простой, а в действительности первичный преобразователь кроме антенны должен включать в себя лазерный диод, аккумуляторное питание и схемы управления, что неизбежно увеличивает его массу и габаритные размеры. В случае с использованием модулятора требуется обеспечить контроль рабочей точки и усиление сигнала антенны, что приведёт к такому же увеличению массы и габаритных размеров преобразователя.

Во ВНИИОФИ разработан измерительный преобразователь ИП-Е с волоконно-оптической линией связи [4]. За счёт применения светодиодных компонентов оптического тракта время нарастания переходной характеристики преобразователя составляет 2,5 нс. При разработке и эксплуатации прибора были отработаны схемы управления, переключения диапазонов, решена задача электропитания блока первичного преобразователя. Измерительный преобразователь ИП-Е целесообразно выбрать за прототип быстродействующего радиофотонного преобразователя, если заменить светодиодную оптическую линию на быстродействующую лазерную, а также решить круг технических вопросов, связанных с приёмом быстронарастающего сигнала поля, усилением, модуляцией, передачей и приёмом сигнала по оптическому волокну.

Разработка радиофотонного измерительного преобразователя. Указанный измерительный преобразователь ИП-Е содержит блоки первичного преобразователя (БПП) и фотоприёмника (БФП), соединённые двумя оптическими волокнами – одно для передачи измерительного сигнала, а второе – команд управления. При

разработке схемы радиофотонного измерительного преобразователя напряжённости импульсного электрического поля авторы придерживались этой же схемы.

Для приёма измеряемого сигнала импульсного электрического поля БПП должен содержать приёмную антенну. Приёмная ёмкостная антенна может быть двух типов. Антенна первого типа – это плоский конденсатор, нагруженный на некоторое сопротивление [15]. При увеличении сопротивления можно увеличить и постоянную времени, при этом в течение заданного временного окна будет получаться близкая к ступенчатой форма переходной характеристики (самоинтегрирующий режим). Для расширения частотного диапазона антенны потенциальный электрод обычно выполняют в виде последовательности концентрических колец, которые соединяют с помощью резисторов, равномерно расположенных в промежутках между кольцами [16]. Такое решение увеличивает частотный диапазон антенны пропорционально суммарной ёмкости колец.

Второй тип ёмкостной антенны – так называемая D-dot антенна, т. е. малая ёмкостная антенна, работающая в дифференцирующем режиме. В дифференциальном варианте она представляет собой металлический диск – заземлённый электрод, к которому сверху и снизу через диэлектрические изоляторы подключены потенциальные шарообразные или потенциальные каплевидные электроды. Дифференциальный выход позволяет устранить синфазную помеху. Сигнал на выходе D-dot антенны пропорционален производной по времени от измеряемого сигнала напряжённости электрического поля. Наиболее широкополосные D-dot преобразователи имеют время нарастания переходной характеристики порядка 20–30 пс, но обладают низкой чувствительностью [17]. Ещё один недостаток D-dot

преобразователей заключается в том, что по тракту (как радиочастотному, так и оптическому) необходимо передавать дифференцированный сигнал, а это налагает повышенные требования на широкополосность компонентов.

В разработанном радиофотонном преобразователе для увеличения его широкополосности авторы предложили использовать антенну первого типа, т. е. антенну на основе плоского конденсатора с кольцевыми разрезами. Такое решение позволит уменьшить габаритные размеры преобразователя, увеличить чувствительность и не передавать дифференцированный сигнал по тракту. Структурная схема созданного преобразователя показана на рис. 3. Для предотвращения перегрузки по входу сигнал с антенны *АНТ* должен поступать на устройство защиты-согласования *УЗС*.

Так как функционирование преобразователя предполагается в электрических полях с напряжённостью от десятков вольт на метр до сотен киловольт на метр, то для смены диапазонов измерений целесообразно снабдить его переключаемым аттенюатором *АТТ*. Управление аттенюатором должно осуществляться модулем управления *МУ*, команды которому должны удалённо поступать от БФП. Для самокалибровки в состав модуля управления должен входить генератор ступенчатых импульсов. При поступлении команды от модуля генерации команд управления *МГКУ* режим самокалибровки включается, сигнал генератора передаётся по оптическому волокну в БФП и регистрируется осциллографом *ОСЦ*. По сигналу самокалибровки можно сделать поправку на ослабление сигнала в тракте, вызванное, например, несовершенством стыковки оптических разъёмов или затуханием в волокне.

После необходимого ослабления полезный сигнал усиливается с

помощью усилителя-нормализатора $У$ и поступает на вход передающего оптического модуля $ПОМ$, а затем – по оптическому волокну на вход приёмного оптического модуля $ПРОМ$ блока фотоприёмника. Пройдя фотоприёмник электрический сигнал снова усиливается с помощью сверхширокополосного усилителя $СШПУ$ и по коаксиальному кабелю поступает в осциллограф.

В качестве приёмного и передающего оптических модулей авторы предложили задействовать комплект из лазерного диода ДМПО131-23 и фотодиода ДФДМШ40-16, изготовленных в научно-производственной фирме «Дилаз» (Россия) [18]. Полоса модуляции лазерного диода ДМПО131-23 составляет от 100 кГц до 16 ГГц, длина волны излучения 1310 нм, средняя оптическая мощность 9 мВт, неравномерность АЧХ в полосе модуляции не превышает 2,5 дБ. Модуль снабжен фотодиодом обратной связи, а также элементами контроля и поддержания температуры. Полоса пропускания фотоприёмника ДФДМШ40-16 варьируется в интервале от 1 МГц до 16 ГГц, неравномерность АЧХ не превышает 2 дБ, спектральная чувствительность на длине волны 1310 нм составляет порядка 0,3 А/Вт.

Для измерений электромагнитных импульсов большой амплитуды с коротким фронтом и значительной длительностью целесообразно применять радиофотонные измерительные преобразователи. Они устойчивы к внешним помехам, имеют необходимые быстродействие и длительность временного окна. Чувствительным элементом радиофотонного преобразователя может быть электрооптический кристалл, оптический микрорезонатор или широкополосная антенна. Преобразователи с электрооптическим кристаллом, являясь полностью диэлектрическими, минимально

взаимодействуют с окружающими объектами, имеют малые габаритные размеры и массу, что чрезвычайно важно, например, при измерениях напряжённости поля во внутренних объёмах технического средства во время испытаний. Главный недостаток таких преобразователей – температурная нестабильность, которая ограничивает их использование лишь лабораторными условиями.

Преобразователь со сверхширокополосной антенной можно разработать на основе имеющихся на рынке отечественных радиофотонных аналоговых компонентов. Применение в оптическом тракте лазерного диода и фотоприёмника с полосой пропускания до 16 ГГц позволит радикально, на порядок, увеличить быстродействие преобразователя, снизив время нарастания переходной характеристики с единиц наносекунд до 100 пикосекунд. В настоящей работе предложена схема такого преобразователя, а также выбраны типы основных компонентов.

Заключение. В разработанном радиофотонном измерительном преобразователе решена задача метрологического обеспечения измерений параметров генераторов высоковольтных импульсов напряжения. Такой преобразователь должен заменить полосковый датчик в качестве компаратора напряжённости электрического поля при двойном преобразовании напряжение–поле–напряжение в ТЕМ-камере, возбуждаемой измеряемым генератором. При этом радиофотонный измерительный преобразователь обеспечивает требуемое быстродействие и необходимую длительность временного окна. В дальнейшем планируется его внедрение как СИ для применения в полевых условиях. С помощью данного преобразователя можно контролировать параметры имитаторов электромагнитных импульсов в имитаторах при испытаниях радиоэлектронных

устройств.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Литература

1. **Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В.** Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: «Группа ИДТ», 2007.
2. **IEC 61000-2-13.** Electromagnetic compatibility (EMC). Pt. 2–13: Environment–High-power electromagnetic (HPEM) environments–Radiated and conducted.
3. **Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Dobrotvorsky M. I., Sukhov A.** Microstrip transducer for UWB EMP characterization // Proc. of American Electromagnetics Symposium AMEREM-2014. Albuquerque, USA, 27–31 July 2014. P. 26.
4. **Михеев О. В., Туркин В. А., Сахаров К. Ю., Соколов А. А., Кузнецов Е.В.** Средства измерений для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии электромагнитной совместимости. 2006. № 2. С. 17–21.
5. **Seeds A. J.** Microwave photonics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. V. 50. No. 3. P. 877–887.
6. **Campany J., Novak D.** Microwave photonics combines two

worlds // Nature Photonics. 2007. V. 1. P. 319–330.

7. **Gaborit G., Jarrige P., Gaeremynck Y., Warzecha A., Bernier M., Lasserre J.-L., Duvillaret L.** Pockels' Effect-Based Probe for UWB and HPEM Measurements // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 10. 2014. P. 411–423.

8. **Lee D.-J., Kwon J.-Y., Kang N.-W.** Field Analysis of Electro-Optic Probes for Minimally Invasive Microwave Sampling // Optics Express. 2014. V. 22. No. 3. P. 2897–2909.

9. **Togo H., Shoji M., Kukutsu N.** Optical Fiber Electric Field Sensor for Antenna Measurement // NTT Technical Review. 2009. V. 7. No. 3. P. 1–6.

10. **Долматов Т. В., Букин В. В., Сахаров К. Ю., Сухов А. В., Гарнов С. В., Терехин В. А.** Сверхширокополосный электрооптический преобразователь напряжённости импульсного электрического поля // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 42–45.

11. **Savchenkov A. A., Liang W., Ilchenko V. S., Dale E., Savchenkova E. A., Matsko A. B., Seidel D., Maleki L.** Photonic E-field Sensor // AIP Advances. 2014. No. 4. P. 1–23.

12. **Hsu R.C.J., Ayazi A., Housmand B., Jalali B.** All-Dielectric photonic-assisted radio front-end technology // Nature Photonics. 2007. V. 1. No. 9. P. 535–538.

13. **Loader B., Alexander M., Osawa R.** Development of Optical Electric Field Sensors for EMC Measurement // Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility «EMC'14/Tokyo». Tokyo, Japan, 12–16 May 2014. P. 658–661.

14. **Домашенко Г. Д., Крученев М. Б., Лисицын В. П.** Оптоэлектронная система для измерения импульсных электромагнитных полей, наведённых токов и напряжений // Сб. науч.

трудов к 85-летию ВЭИ / Под ред В. Д. Ковалева 2006. С. 65-73.

15. **Кравченко В. И.** Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991.

16. **Пат. 2463615 РФ.** Сверхширокополосный ёмкостный измерительный преобразователь импульсных электрических полей / В. Ф. Молочков, В. В. Неуструев // Изобретения. Полезные модели. 2012. Бюл. № 28.

17. **Baum C. E.** Tiny Fast-Pulse B-Dot and D-Dot Sensors in Dielectric Media // Sensors and Simulation Notes. 2009. No. 544. P. 1–9.

18. **Иванов С. И., Лавров А. П., Саенко И. И., Иванов Д. В., Одноблюдов М. А., Царук А. А.** Исследование характеристик модулей передатчиков с внутренней и внешней модуляцией в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ радиосигналов. Т. 2. Электроника и микроэлектроника СВЧ // Сб. статей V Всероссийской конференции. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. С. 69–73.

Дата принятия: 04.04.2018.

Подписуемые подписи:

Рис 1. Измерение электромагнитного импульса с коротким фронтом и большой длительностью с помощью двух измерительных преобразователей:

1 – выходной сигнал ёмкостного измерительного преобразователя; 2 – измеряемый сигнал; 3 – область неопределённости измерений мгновенного значения сигнала; 4 – выходной сигнал полоскового измерительного преобразователя; 5 –

граница временного окна полоскового измерительного преобразователя

Рис 2. Варианты подключения антенны в радиофотонном измерительном преобразователе, когда модулятор включён «на проход» (а) и «на отражение» (б):

АНТ – антенна; *ЛД* – лазерный диод; *ФД* – фотодиод; *МОД* – электрооптический модулятор; *Ц* – циркулятор; *З* – зеркало

Рис 3. Схема радиофотонного преобразователя:

БПП – блок первичного преобразователя; *БФП* – блок фотоприёмника; *АНТ* – антенна; *УЗС* – устройство защиты–согласования; *МУ* – модуль управления; *АТТ* – управляемый аттенюатор; *ПИТ* – модуль питания; *У* – усилитель–нормализатор с согласующим буферным каскадом; *ПОМ* – передающий оптический модуль; *МГКУ* – модуль генерации команд управления; *СШПУ* – сверхширокополосный усилитель; *ПРОМ* – приёмный оптический модуль; *ОСЦ* – осциллограф