

**А.Л. Чиж<sup>1</sup>, С.А. Малышев<sup>1</sup>, К.Б. Микитчук<sup>1</sup>,  
А.П. Миляев<sup>2</sup>, М.В. Попиков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси

<sup>2</sup>НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы»

## **Широкополосная волоконно-оптическая линия передачи СВЧ-сигналов для комплекса измерения антенн в ближнем поле**

*В статье представлен метод измерения антенн в ближнем поле с использованием широкополосной волоконно-оптической линии передачи СВЧ-сигналов с двумя опорными каналами. Показано, что использование волоконно-оптической линии с двумя опорными каналами позволяет значительно снизить ошибки измерения фазы и увеличить динамический диапазон стандартных комплексов измерения антенн в ближнем поле.*

**Ключевые слова:** измерение антенн в ближнем поле; волоконно-оптическая линия передачи

Антенные измерения в ближнем поле широко используются при разработке направленных антенн и антенных решеток [1]. В силу механической простоты перемещений и позиционирования на плоскости наиболее широко используется метод измерения ближнего поля на плоскости [2]. В данном методе измеряемая антенна остается неподвижной, а сканирование апертуры антенны проводится с помощью антенного зонда малого размера, установленного на планарном сканере, при этом требуется большая точность позиционирования зонда и измерения амплитуды и фазы напряженности ближнего поля. Измерение обычно проводится в течение достаточно длительного времени (для антенных решеток с большой апертурой время измерения может достигать 10 часов и более), поэтому требуется обеспечение постоянства фазы измерительного СВЧ-сигнала, подаваемого на зонд, на всем протяжении измерения, что, в свою очередь, приводит к необходимости поддержания постоянной температуры в безэховой камере. При измерении ближнего поля на плоскости основными источниками погрешностей являются фазовые ошибки, возникающие в приемнике, в подвижных соединениях и коаксиальных кабелях [3]. В частотном диапазоне свыше 18 ГГц измерения параметров антенн в ближнем поле зачастую проводятся на промежуточной частоте с помощью СВЧ-смесителя, находящегося непосредственно на сканере, и векторного анализатора цепей. Однако, в данном случае устройства преобразования частоты обычно ограничивают полосу и динамический диапазон комплекса измерения антенн. В данной работе предлагается альтернативное решение проблемы широкополосного измерения параметров антенн в ближнем поле, в котором зонд соединен с векторным анализатором цепей посредством широкополосной волоконно-оптической линии, содержащей два опорных канала. Предлагаемая система позволяет исключить ошибки измерения, связанные с изгибами коаксиальных кабелей и влиянием температуры на время передачи СВЧ-сигнала, а также повысить точность измерения по сравнению с методами измерения на промежуточной частоте.

На рис. 1 приведена структурная схема комплекса измерения антенн в ближнем поле, в котором антенный зонд соединен с векторным анализатором цепей посредством широкопо-

DFB – лазерный диод с распределенной обратной связью  
 MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера  
 EDFA – оптический усилитель на волокне легированном эрбием  
 HPD – мощный фотодиод СВЧ диапазона  
 ВОЛМ – волоконно-оптический лазерный модуль с внешней модуляцией и оптическим усилением  
 ВОК – одномодовый волоконно-оптический кабель,  
 ВОФМ – волоконно-оптический фотодиодный модуль с обратным оптическим отражателем

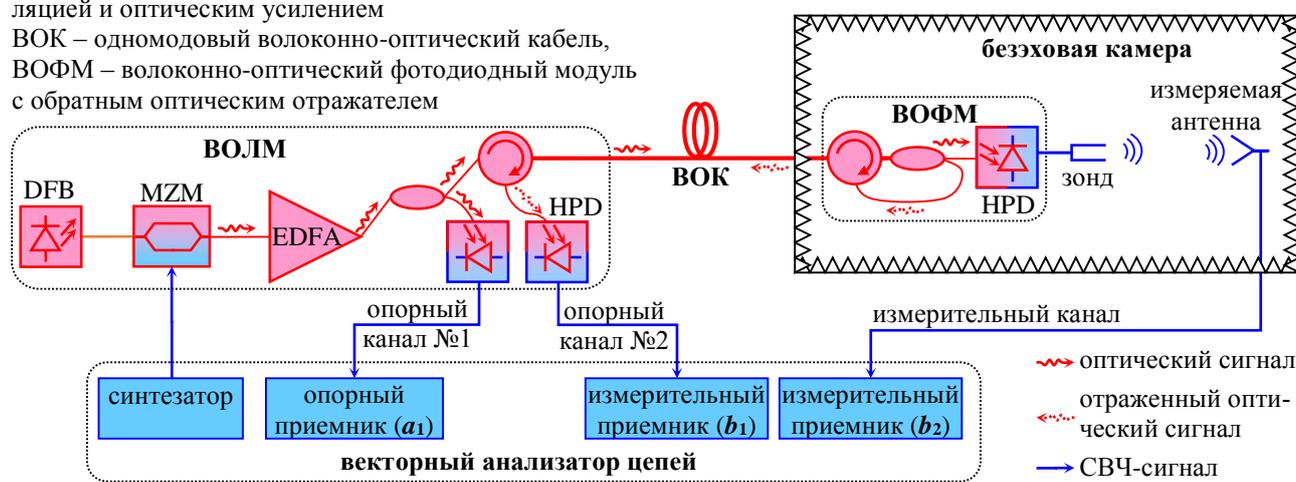


Рисунок 1. – Структурная схема комплекса измерения параметров антенн в ближнем поле

лосной аналоговой волоконно-оптической линии, состоящей из волоконно-оптического лазерного модуля с внешней модуляцией и оптическим усилением (ВОЛМ), одномодового волоконно-оптического кабеля и волоконно-оптического фотодиодного модуля с отражением оптического сигнала (ВОФМ). Излучение InGaAsP/InP лазерного диода с распределенной обратной связью с длиной волны 1530 нм и относительной интенсивностью шума –160 дБн/Гц модулируется по интенсивности при помощи LiNbO<sub>3</sub> модулятора с рабочей полосой частот до 40 ГГц, на СВЧ-вход которого подается сигнал от генератора двухпортового векторного анализатора цепей [4]. Модулированный по интенсивности оптический сигнал на выходе модулятора Маха-Цендера усиливается с помощью оптического усилителя с мощностью насыщения 16 дБм. После этого усиленный оптический сигнал с помощью оптического разветвителя разделяется на два волоконно-оптических плеча в соотношении 1:9. Оптический сигнал из волоконно-оптического плеча с меньшей интенсивностью детектируется с помощью высокоскоростного СВЧ-фотодиода и направляется в приемник опорного канала  $a_1$  векторного анализатора, образуя тем самым опорный канал №1.

Оптический сигнал из волоконно-оптического плеча с большей интенсивностью поступает на ВОФМ через оптический циркулятор и одномодовый волоконно-оптический кабель. Модулированный по интенсивности оптический сигнал в ВОФМ с помощью оптического разветвителя разделяется на два волоконно-оптических плеча в соотношении 2:8. Оптический сигнал из волоконно-оптического плеча с большей интенсивностью детектируется с помощью высокоскоростного СВЧ-фотодиода и возбуждает антенный зонд. Сигнал из волоконно-оптического плеча с меньшей интенсивностью через оптический циркулятор в составе ВОФМ и волоконно-оптический кабель направляется обратно в ВОЛМ. С помощью оптических циркуляторов обеспечивается развязка оптических сигналов, распространяющихся в противоположных направлениях. Сигнал с оптического циркулятора в составе ВОЛМ в свою очередь детектируется с помощью высокоскоростного СВЧ-фотодиода и направляется в приемник опорного

канала  $b_1$  векторного анализатора, образуя тем самым опорный канал №2.

Таким образом, что длительность задержки в опорном канале №2 в два раза превосходит длительность задержки в волоконно-оптической линии передачи, что используется для корректировки фазы в измерительном канале. Для обеспечения идентичности частотных характеристик измерительного и опорных каналов необходимо использовать одинаковые СВЧ-фотодиоды, работающие в линейном режиме. Для обеспечения линейного режима работы, когда оптическая мощность в измерительном канале может достигать 15 дБм, необходимо использовать мощные СВЧ-фотодиоды. Для этих целей был разработан мощный InAlAs/InGaAs/InP СВЧ-фотодиод Шоттки, освещаемый со стороны удаленной подложки, в котором  $n$ -контакт и контакт к барьеру Шоттки изготовлены в виде металлических балок. Изготовленный фотодиод Шоттки с диаметром контакта 15 мкм обладает чувствительностью 0.4 А/Вт на длине волны 1530 нм и шириной полосы по уровню 3 дБ, равной 40 ГГц, а также максимальной выходной мощностью СВЧ-сигнала, равной 10 дБм [6]. ВОЛМ подключен к векторному анализатору цепей с помощью коротких коаксиальных фазостабильных СВЧ-кабелей. ВОФМ размещен на сканере и соединен с ВОЛМ посредством одномодового гибкого волоконно-оптического кабеля стандарта G.657 длиной 70 м. Антенный зонд подключен непосредственно к ВОФМ с помощью короткого коаксиального фазостабильного СВЧ-кабеля. При измерении ближнего поля на плоскости амплитуда и фаза СВЧ-сигнала в измерительном канале корректируется с помощью следующих формул

$$Amplitude = |b_2/a_1|, \quad Phase = \text{Arg}\left(\sqrt{b_2^2/(a_1 b_1)}\right), \quad (1)$$

где  $a_1$  – комплексное напряжение СВЧ-сигнала, поступающего на вход опорного приемника первого порта векторного анализатора цепей,  $b_1$  – комплексное напряжение СВЧ-сигнала, поступающего на вход измерительного приемника первого порта векторного анализатора цепей,  $b_2$  – комплексное напряжение СВЧ-сигнала, поступающего на вход измерительного приемника второго порта векторного анализатора цепей,  $\text{Arg}$  – аргумент комплексной величины в смысле главного значения.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента передачи волоконно-оптической линии передачи СВЧ-сигналов с двумя опорными каналами от частоты. Из рисунка видно, что полоса по уровню  $-3$  дБ для разработанной волоконно-оптической линии составляет 40 ГГц, а коэффициент передачи составляет  $-6$  дБ в частотном диапазоне до 35 ГГц, что позволяет проводить широкополосные измерения без внешнего преобразования частоты и необходимости менять СВЧ-смесители для перекрытия нескольких частотных диапазонов. Следует отметить, что коэффициент передачи волоконно-оптической линии передачи может быть повышен путем увеличения мощности насыщения оптического усилителя. Однако, возможность увеличения коэффициента передачи ограничивается как максимальной допустимой падающей мощностью используемых СВЧ-фотодиодов, так и нелинейными оптическими эффектами в волоконно-оптическом кабеле. Так как потери, вносимые волоконно-оптической линией передачи, практически не зависят от длины волоконно-оптического кабеля из-за крайне малого ослабления в оптическом волокне (менее 0.4 дБ/км), поэтому комплекс измерения антенн в ближнем поле на основе векторного анализатора цепей с полосой анализа 100 Гц и мощностью СВЧ-синтезатора 0 дБм, обеспечивает динамический диапазон свыше 60 дБ во всем диапазоне частот от

0.1 до 50 ГГц даже для больших сканеров, для которых необходимая длина кабеля подключения антенного зонда составляет порядка 100 м.

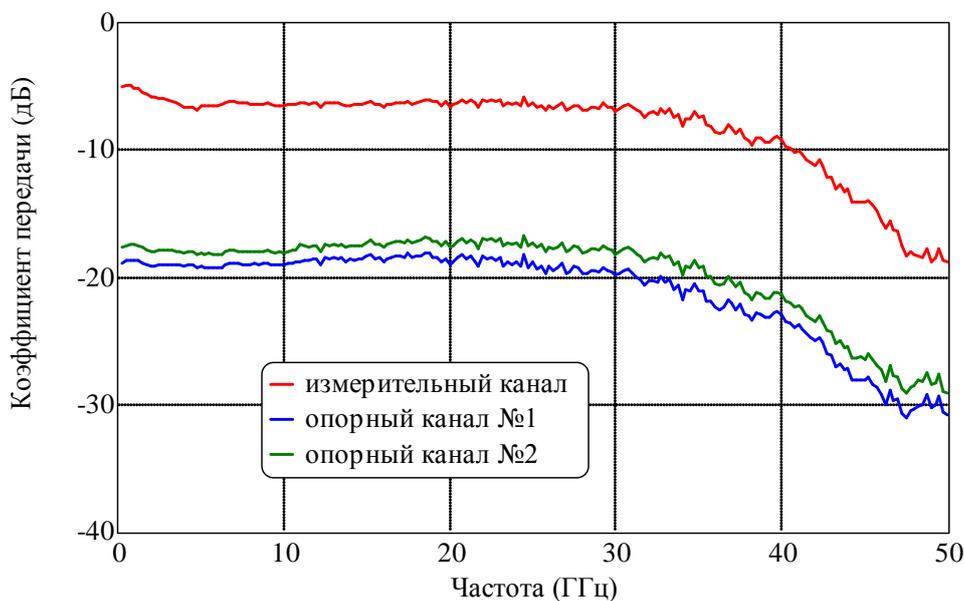


Рисунок 2. – Коэффициент передачи разработанной волоконно-оптической линии передачи СВЧ-сигналов с двумя опорными каналами

Дрейф фазы измерительного сигнала является одним из главных источников ошибок при измерении антенн в ближнем поле, так как время измерения зависит от размеров плоскости сканирования и может составлять десятки часов. Дрейф фазы из-за температурных флуктуаций может быть рассчитан из коэффициента расширения оптического волокна и температурной зависимости показателя преломления сердцевинны оптического волокна. Для сигналов, которые передаются через кварцевое одномодовое оптическое волокно, температурный коэффициент длительности задержки составляет  $0.055 \text{ пс/м/}^\circ\text{C}$ , что соответствует величине дрейфа фазы  $0.4^\circ/\text{C/м}$  на частоте 20 ГГц. Таким образом, для волоконно-оптической линии дрейф фазы передаваемого СВЧ-сигнала составляет  $28^\circ$  при изменении температуры в безэховой камере на  $1^\circ\text{C}$ . На рис. 3 приведен дрейф фазы СВЧ-сигнала с частотой 20 ГГц в измерительном канале и опорном канале №2 разработанной широкополосной волоконно-оптической линии передачи в течении 16 часов. Из рисунка видно, что фаза в измерительном канале изменяется на  $40^\circ$ , а в опорном канале – на величину в 2 раза большую, что соответствует изменению температуры в безэховой камере более, чем на  $2^\circ\text{C}$  за время измерения. Однако, после коррекции фазы с помощью формулы (1) дрейф фазы оказался практически полностью скомпенсированным и составил  $\pm 0.1^\circ$ , что сравнимо с погрешностью измерения фазы векторного анализатора цепей. Следует отметить, что изгибы волоконно-оптического кабеля, возникающие при движении сканера, практически не оказывают влияния на коэффициент передачи волоконно-оптической линии, так как минимальный радиус изгиба для одномодового гибкого волоконно-оптического кабеля стандарта G.657 составляет величину менее 15 мм (это как минимум на порядок меньше радиусов изгибов кабеля, возникающих при движении сканера).

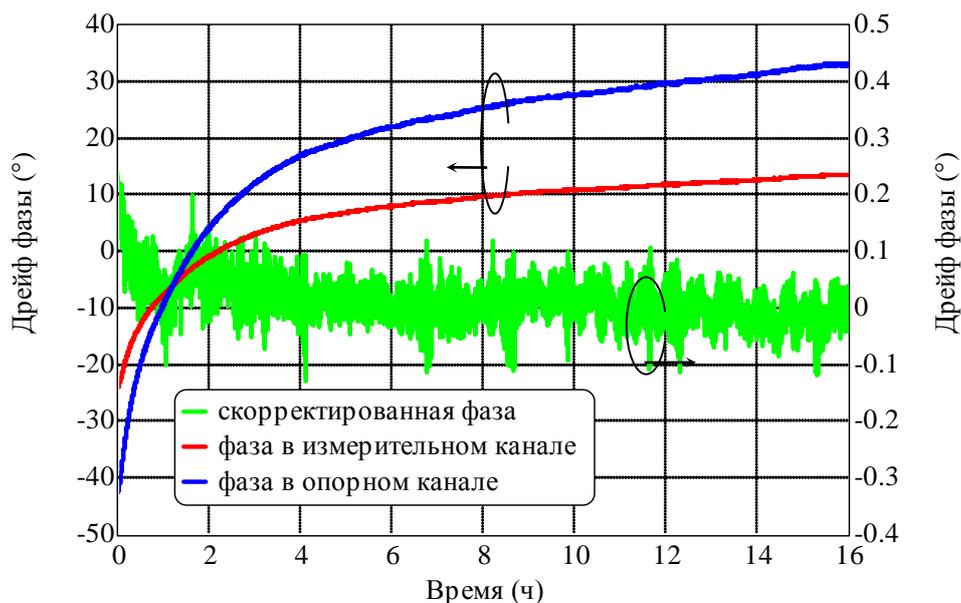


Рисунок 3. – Дрейф фазы СВЧ-сигнала с частотой 20 ГГц в измерительном канале и опорном канале №2 разработанной широкополосной волоконно-оптической линии передачи

В работе показано, что использование аналоговой волоконно-оптической линии передачи СВЧ-сигналов в составе комплекса измерения антенн в ближнем поле обеспечивает широкополосные измерения в частотном диапазоне от 0.1 до 50 ГГц без внешних СВЧ-смесителей. Потери, вносимые волоконно-оптической линией передачи, составляют менее 6 дБ в частотном диапазоне до 35 ГГц и достигают 19 дБ на частоте 50 ГГц. Это обеспечивает динамический диапазон свыше 60 дБ во всем диапазоне частот от 0.1 до 50 ГГц даже для больших сканеров, для которых необходимая длина кабеля подключения к антенному зонду составляет величину порядка 100 м. Использование двух опорных каналов волоконно-оптической линией передачи позволяет скорректировать дрейф фазы измерительного СВЧ-сигнала до  $\pm 0.1^\circ$ , что сравнимо с погрешностью измерения фазы векторного анализатора цепей.

#### Библиографический список

1. A. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, pp. 30-45, Jan. 1986.
2. S. Gregson, J. McCormick and C. Parini, *Principles of planar near-field antenna measurements*, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2007.
3. A. Newell, "Error analysis techniques for planar near-field measurements," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, n. 6, pp. 754-768, Jun. 1988.
4. K. Mikitchuk, A. Chizh, and S. Malyshev, "Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier", *Proc. of 44<sup>th</sup> European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 679-683, October 2014.
5. Малышев, С.А. Мощный InAlAs/InGaAs/InP СВЧ-фотодиод Шоттки / С.А. Малышев, А.Л. Чиж, А.А. Тептеев, А.С. Шуленков // *Материалы 3-ей Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. – Санкт-Петербург, Россия. – 2014. – С. 76-80.