



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-116-125>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.335.3

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

А. В. ГУСИНСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлен новый метод анализа высокочастотного тракта измерительных и радиотехнических систем на основе матричного анализа. Предложена и обоснована замена матрицы рассеяния погрешностей на матрицу передачи в виде клеточных матриц, в матричном виде получены уравнения калибровки и восстановления действительных (исправленных) значений измеряемых параметров, в общем виде приведены пути решения этих уравнений. Определены основные паразитные параметры тракта передачи полезного сигнала, связанные с неоднородностями, утечками и недостаточностью развязок. Использование разработанных методов позволило оптимизировать структуры приборов, алгоритмы калибровки и измерений. Рассмотрена большая гамма созданных приборов общего и специального назначения в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Ключевые слова: S -параметры, матрица рассеяния, многополюсник, анализатор цепей, генератор, ваттметр, высотометр.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гусинский, А. В. Перспективные результаты исследований и разработки в области СВЧ-технологий / А. В. Гусинский // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 116–125. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-116-125>.

PROMISING RESEARCH RESULTS AND DEVELOPMENT IN THE FIELD OF MICROWAVE TECHNOLOGY

ALEXANDER V. GUSINSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27.02.2024

Abstract. A new method for analyzing the high-frequency path of measuring and radio engineering systems based on matrix analysis is proposed. The replacement of the error scattering matrix with a transmission matrix in the form of cellular matrices is proposed and justified, the equations of calibration and restoration of the actual (corrected) values of the measured parameters are obtained in matrix form, and the ways of solving these equations are given in general form. The main parasitic parameters of the useful signal transmission path associated with inhomogeneities, leaks and insufficiency of interchanges are determined. The use of the developed methods made it possible to optimize the structures of devices, calibration and measurement algorithms. A large range of general and special purpose devices has been created in the decimeter, centimeter and millimeter wavelength ranges.

Keywords: S -parameters, scattering matrix, multiport network, network analyzer, generator, wattmeter, altimeter.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Gusinsky A. V. (2024) Promising Research Results and Development in the Field of Microwave Technology. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 116–125. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-116-125> (in Russian).

Введение

Особое место в области радиоэлектроники занимают вопросы создания и применения радиоэлектронных сверхвысокочастотных средств и систем, в том числе миллиметрового диапазона длин волн (МДДВ). При этом можно выделить следующие направления развития:

- разработка и создание новой элементной базы в уже освоенных частотных диапазонах;
- освоение новых частотных диапазонов, а также элементной базы и средств метрологического контроля для них;
- широкое использование средств цифровой обработки сигналов и современных средств вычислительной техники;
- разработка новых научных и технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции и дальнейшее совершенствование средств метрологического контроля.

Интерес к МДДВ обусловлен рядом особых свойств миллиметровых волн, отличающих их от других диапазонов:

- лучшее проникновение через пыль и туман, чем в оптическом диапазоне и при излучении более длинноволновых колебаний; меньшее затухание при прохождении через ионизированную среду по сравнению с волнами сантиметрового и дециметрового диапазонов;
- расширение полосы частот и возможность увеличения информативной емкости каналов связи, увеличение помехозащищенности линий связи, минимальные возможности несанкционированного съема информации;
- уменьшение массогабаритных характеристик устройств и систем, в частности, размеров антенн радиолокационных станций; возможность размещения на космических и быстро движущихся в атмосфере подвижных средствах; улучшение диаграмм направленности антенн, большая разрешающая способность, возможность обнаружения малых объектов;
- возможность исследования новых свойств сред и различных материалов.

Следует особо отметить, что интерес к МДДВ в значительной мере обусловлен сложностями, с которыми пришлось столкнуться при использовании оптических волн. Инфракрасные системы, способные работать как в дневных, так и в ночных условиях, часто оказываются неэффективными при наличии на трассе распространения волн облачности, тумана или дыма. В то же время излучение миллиметрового диапазона может проникать через такие непрозрачные области и обеспечивать достаточное разрешение по дальности и углам. Основные направления разработок в МДДВ связаны с созданием разнообразных систем и аппаратуры, прежде всего военного, а также научного и промышленного назначения – зондирование атмосферы в метеорологии, радиоастрономии, навигации, медицине и других областях. Данные области применения радиоэлектронных средств МДДВ предполагают наличие и использование достаточно однотипных элементов и узлов, таких как: источники или генераторы сигналов, гетеродины, приемные устройства на основе широко- и узкополосных смесителей; СВЧ-тракты распространения сигнала, адаптеры или согласующие переходы, направленные ответвители, делители мощности и/или антенные системы; устройства контроля и определения уровня мощности (ваттметры), преобразователи СВЧ-мощности в электрические сигналы постоянного тока; вторичные устройства преобразования сигналов промежуточной частоты от СВЧ-смесителей в цифровую форму. Перечисленные элементы и узлы в большинстве своем характеризуются потерями прохождения сигнала, согласованием входов и фланцевых соединений, коэффициентами преобразования. Эти параметры относятся к широкому спектру радиоэлектронных устройств МДДВ. Однако самые высокие требования предъявляются к средствам измерений (СИ), осуществляющим метрологическое обеспечение в радиолокации, телекоммуникации, навигации, телеметрии и радиоастрономии.

Один из главных параметров – динамический или широкий диапазон измерений. Для обеспечения требуемых пределов измерений необходимо уменьшить ослабление, вносимое СВЧ-трактом, что может быть осуществлено путем лучшего согласования составляющих элементов тракта и/или его существенного конструктивного упрощения. Конструктивное упрощение СВЧ-тракта в миллиметровом диапазоне важно также из-за высокой стоимости узлов и элементов, входящих в его состав. Все это накладывает определенные условия и ограничения на выбор структур-

ной схемы и соответствующего метода измерения, который должен обеспечивать конструктивную простоту СИ с возможностью получения высоких технических и метрологических характеристик.

Наряду с амплитудными параметрами, в любой системе МДДВ, начиная от СИ и до радиолокации, присутствуют фазовые параметры, во многом определяющие точность работы алгоритмов цифровой обработки сигналов, когерентного накопления и возможности работы в присутствии помеховых сигналов. Количественная оценка абсолютной погрешности измерения фазового сдвига показывает, что при относительной погрешности установки частоты не более $\delta f = \pm 0,002$, характерной для большинства систем, при длине отрезков волновода 10 мм значение этой погрешности на частоте 100 ГГц достигает $\pm 3,0^\circ$. С увеличением длины отрезка волновода погрешность линейно возрастает.

Также в МДДВ возникает проблема, связанная с точностью изготовления каналов волноводных элементов СВЧ измерительного тракта (ИТ) и рабочих эталонов в процессе их производства. При этом, чем выше частотный диапазон, тем жестче должны быть требования, предъявляемые к допускам на геометрические размеры волноводных каналов: например, для диапазона длин волн 8 мм допуск составляет 10–20 мкм, для диапазона 3 мм – 5–10 мкм. При стыковке волноводных фланцев из-за возможности различия при изготовлении их волноводных каналов и присоединительных размеров всегда возникает некоторое рассогласование (нарушается идеальность тракта).

Математические модели процессов калибровки и непосредственного измерения

Широкий круг существующих и потенциальных потребителей устройств, систем и СИ МДДВ определяет необходимость использования методов стандартизации, и в случае со СИ МДДВ это выражается:

- в разработке базовых структур построения по отдельным видам измерений для разных частотных поддиапазонов;
- во введении в структуры построения унифицированных функциональных частей, которые являются одинаковыми для разных частотных диапазонов.

Анализируя большое количество структурных схем различных устройств МДДВ, можно выделить и предложить для анализа и математического моделирования обобщающую структуру. Она может быть описана как многополюсник, состоящий из двух пар входных и двух пар выходных цепей. Математический анализ такого многополюсника позволяет выявить полезные и паразитные связи, искажающие прохождение сигнала, и обнаружить все места рассогласования в волноводном тракте любой системы.

Математическим аппаратом теоретического анализа СВЧ-цепей являются матричные и топологические методы, причем для матричного описания СВЧ-устройства могут использоваться различные системы параметров, между которыми существует однозначная связь. При теоретическом анализе и расчетах разнообразных СВЧ-устройств (СИ и ИТ) и их сочетаниях целесообразно введение понятия «измерительная система» (ИС), обобщающего эти сочетания. Для анализа и моделирования наиболее предпочтительным оказалось применение системы S -параметров, являющихся элементами матрицы рассеяния, описывающей анализируемое устройство или соединение. В некоторых случаях, например, при анализе каскадных соединений СВЧ-устройств, удобно использовать T - (или R -) параметры, выражаемые через S -параметры. При анализе СВЧ-устройств топологическими методами (методом ориентированных графов) для описания графов также преимущественно используются S -параметры. В идеальном случае СВЧ ИС должны быть абсолютно точными и полностью обеспечивать достоверные измерения. Если бы было возможно существование идеальной СВЧ ИС, она должна была бы иметь бесконечный динамический диапазон, бесконечные развязки и характеристики направленности, отсутствие рассогласований импедансов в любой части СВЧ ИТ, отсутствие помех, утечек и постоянные частотные характеристики каналов отражений и передачи тракта. Однако даже в самых точных СВЧ ИС существуют некоторые несовершенства, служащие причиной неидеальных результатов измерений. При любых СВЧ-измерениях имеются погрешности, связанные с СВЧ ИС, способствующие неидеальности получаемых результатов. Указанные погрешности характеризуются параметрами, приведенными в табл. 1, которые используются для математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения.

Таблица 1. Параметры, используемые для математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения
Table 1. Parameters used for mathematical modeling of calibration and direct measurement processes

Обозначение / Designation	Наименование / Name	Краткое описание / Short description
E_D, E_{DR}	Параметр, характеризующий направленность	Определяет относительный уровень паразитного сигнала при подключении идеальной согласованной нагрузки к измерительному порту в режиме измерения коэффициента отражения. Обусловлен неидеальностью ответвляющих устройств СВЧ ИС (направленных ответвителей, мостов). Ограничивает нижний предел измерений комплексного коэффициента отражения
E_S, E_{SR}	Параметр, характеризующий рассогласование со стороны источника СВЧ-сигнала	Определяет относительный уровень отраженного сигнала, вызванного неидеальным согласованием источника СВЧ-сигнала с СВЧ ИТ. Обусловлен отличием выходного импеданса источника СВЧ-сигнала и волнового сопротивления СВЧ ИТ. Ограничивает верхний предел измерений комплексного коэффициента отражения
E_L, E_{LR}	Параметр, характеризующий рассогласование со стороны нагрузки	Определяет относительный уровень отраженного сигнала, вызванного неидеальным согласованием объекта измерения (ОИ) и нагрузки в режиме измерения коэффициента передачи. Обусловлен отличием входного импеданса нагрузки и волнового сопротивления ОИ
E_M, E_{MR}	Параметр, характеризующий изоляцию	Определяет относительный уровень паразитного сигнала, поступающего на измерительный порт в режиме измерения коэффициента передачи. Обусловлен некоторой частью измерительных сигналов и помех, попадающих на измерительный вход напрямую без прохождения ОИ из-за неидеальности качества экранировки внутренних блоков, используемых переходов и сборок. Ограничивает нижний предел измерений комплексного коэффициента передачи
E_R, E_{RR}	Трекинг отражения	Показывает отличие коэффициентов передачи опорного и измерительных каналов в тракте отражения. Определяет плоскость отсчета модуля и фазы коэффициента отражения
E_T, E_{TR}	Трекинг передачи	Показывает отличие коэффициентов передачи опорного и измерительных каналов в тракте передачи. Определяет плоскость отсчета модуля и фазы коэффициента передачи

В общем случае любой восьмиполосник погрешностей характеризуется матрицей рассеяния 4-го порядка ($n = 4$), т. е. 16-тью параметрами (16-тью комплексными величинами) [1, 2]. Идеальная ИС, т. е. ИС без систематических погрешностей, как бы «воспринимает» ОИ через гипотетический восьмиполосник погрешностей, который характеризует систематические погрешности реальной ИС. Такая математическая модель измерения является полной для ОИ в виде четырехполосника (рис. 1). Данный подход предложен впервые и отличен от известных способов анализа многополосных цепей.

Транспортированная матрица $[E]^T$ имеет вид

$$[E]^T = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & e_{44} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} E_D E_{TR} & E_M & 1 & E_Q \\ E_{MR} & E_{DR} E_T & E_{QR} & 1 \\ E_R E_{TR} & E_{LR} E_M E_R & E_S + E_{LR} E_R & E_{VR} \\ E_L E_{MR} E_{RR} & E_{RR} E_T & E_V & E_{SR} + E_L E_{RR} \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

Согласно (1), 16-параметрическая математическая модель восьмиполосника погрешностей будет иметь вид, представленный на рис. 2.

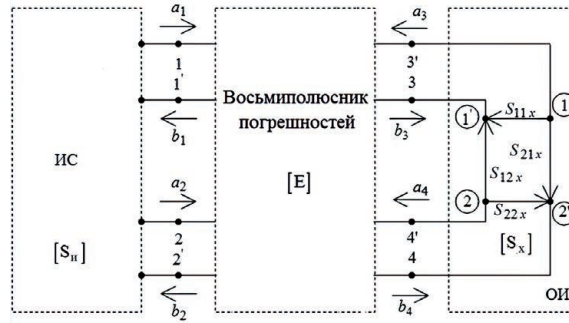


Рис. 1. Схема, поясняющая процедуру моделирования погрешностей измерения для объекта измерения в виде четырехполюсника: a_i, b_i – падающие и отраженные волны на входах восьмиполюсника погрешностей ($i = 1, \dots, 4$); $[E]$ – матрица рассеяния восьмиполюсника погрешностей; $[S_{\text{н}}]$ – матрица рассеяния измерительной системы; $[S_{\text{х}}]$ – матрица рассеяния объекта измерения; S_{11x}, S_{22x} – комплексный коэффициент отражения входа и выхода многополюсника; S_{12x}, S_{21x} – комплексный коэффициент передачи в прямом и обратном направлениях

Fig. 1. Diagram explaining the procedure for modeling measurement errors for a measurement object in the form of a quadripole: a_i, b_i – incident and reflected waves at the inputs of the eight-port error network ($i = 1, \dots, 4$); $[E]$ – eight-port error scattering matrix; $[S_{\text{н}}]$ – scattering matrix of the measuring system; $[S_{\text{х}}]$ – scattering matrix of the measured object; S_{11x}, S_{22x} – complex reflection coefficient of the input and output of the multipole network; S_{12x}, S_{21x} – complex transmission coefficient in forward and reverse directions

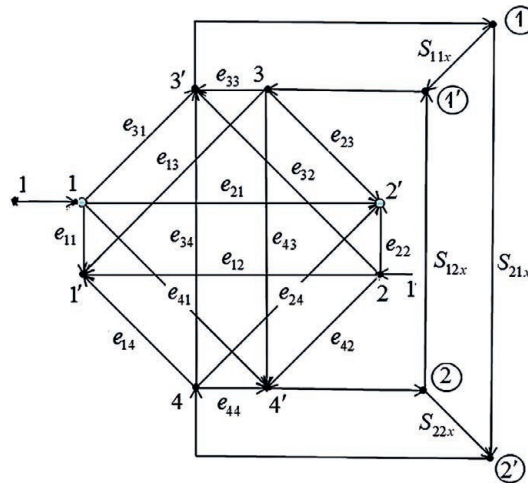


Рис. 2. Схема 16-параметрической математической модели восьмиполюсника погрешностей
Fig. 2. Diagram depicting a 16-parameter mathematical model of an eight-port error network

В результате проведенных преобразований получены следующие выражения для восстанавливаемых действительных (исправленных) значений параметров матрицы рассеяния $[S_{\text{х}}]$, выраженные через миноры матрицы передачи $[T]$ восьмиполюсника погрешностей и измеренные параметры матрицы $[S_{\text{н}}]$, найденные при калибровке:

$$\begin{aligned}
 S_{11x} &= -\frac{1}{Z_3} \{M_{12,23}(T) - S_{11\text{н}}M_{23,23}(T) - S_{12\text{н}}M_{13,23}(T) + S_{21\text{н}}M_{24,23}(T) + S_{22\text{н}}M_{14,23}(T) + \Delta S_{\text{н}}M_{34,23}(T)\}; \\
 S_{12x} &= -\frac{1}{Z_3} \{M_{12,13}(T) - S_{11\text{н}}M_{23,13}(T) - S_{12\text{н}}M_{13,13}(T) + S_{21\text{н}}M_{24,13}(T) + S_{22\text{н}}M_{14,13}(T) + \Delta S_{\text{н}}M_{34,13}(T)\}; \\
 S_{21x} &= \frac{1}{Z_3} \{M_{12,24}(T) - S_{11\text{н}}M_{23,24}(T) - S_{12\text{н}}M_{13,24}(T) + S_{21\text{н}}M_{24,24}(T) + S_{22\text{н}}M_{14,24}(T) + \Delta S_{\text{н}}M_{34,24}(T)\}; \\
 S_{22x} &= \frac{1}{Z_3} \{M_{12,14}(T) - S_{11\text{н}}M_{23,14}(T) + S_{12\text{н}}M_{13,14}(T) + S_{21\text{н}}M_{24,14}(T) + S_{22\text{н}}M_{14,14}(T) + \Delta S_{\text{н}}M_{34,14}(T)\}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $Z_3 = M_{12,23}(T) - S_{11\text{н}}M_{23,23}(T) - S_{12\text{н}}M_{13,23}(T) + S_{21\text{н}}M_{24,23}(T) + S_{22\text{н}}M_{14,23}(T) + \Delta S_{\text{н}}M_{34,23}(T)$.

Как видно из матрицы (1), в случае 12-параметрической модели предполагаются отсутствующими связи (утечки, паразитные передачи) между зажимами 2–3', 1–4', 3–4' и 4–3' (рис. 2), которые могут быть учтены 16-параметрической моделью восьмиполюсника погрешностей. Необходимость в учете таких утечек возникает, например, при использовании двунаправленных векторных анализаторов цепей (ВАЦ) и исследовании СВЧ-модулей (СВЧ-микросборок), когда к входным зажимам ОИ приходится подключать дополнительные переходные устройства (зонды, пробники и т. п.), связывающие входы устройства (например, выполненные на микрополосковых линиях и т. п.) с измерительными входами [2, 3].

Найдем выражения уравнений калибровки и восстановления по результатам измерений $[S_{и}]$ действительных исправленных параметров матрицы $[S_x]$ ОИ, используя матричные методы анализа схемы рис. 1. При этом относительно входов ОИ падающими будут волны b_3 и b_4 , а отраженными – a_3 и a_4 [1]. Связь падающих и отраженных волн на портах многополюсников может быть выражена через параметры волновой матрицы передачи $[T]$. Эту связь можно записать в виде уравнения, входящего в систему, что позволяет на основании набора комбинаций известных значений аттестованных эталонов $[S_x^k]$ и результатов измерений $[S_{и}^k]$ найти миноры матрицы передачи $[T]$, необходимые для определения параметров передачи матрицы $[T]$.

На основании использования эталонных калибровочных мер (короткое замыкание, согласованная нагрузка, отрезок волновода на проход, меры фазового сдвига и их комбинации) можно определить любой из параметров 16-полюсной модели, которая является самой полной. На практике, чтобы не усложнять процесс калибровки, можно пренебречь определением каких-либо параметров, учитывая их малое влияние при заданной точности измерений. В этом случае 16-параметрическая модель может быть преобразована в 12-, 8-, 6- и т. д. полюсные модели. Разработанную модель возможно использовать для анализа согласования потерь при передаче сигнала от источников (задающий генератор, передатчик) до потребителей сигнала (объект исследования, антенная система, приемник сигнала), что делает ее универсальной для любых радиотехнических устройств и систем.

Результаты исследований и их практическая реализация

Опираясь на теоретические расчеты, моделирование и лабораторные исследования, в Центре 1.9 НИЧ БГУИР в течение последних 20 лет были выполнены разработки большой номенклатуры устройств и систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. В вузе осуществляется серийное производство ряда измерительных приборов: векторных анализаторов цепей, синтезированных генераторов сигналов, измерителей мощности (годы выпуска 2021–2023) специального (высотомер, система сбора телеметрической информации) и общего (автоматическая система тестирования радиолокационных устройств) назначений, которые представлены на рис. 3–8 [4–6].

Для ВАЦ типа P4-MBM (рис. 3) рабочие диапазоны частот, ГГц: 0,01–17,44, 17,44–25,95, 25,95–37,50, 37,50–53,57, 53,57–78,33, 78,33–118,10, 118,10–178,40. Типовые значения погрешностей измерения этого прибора: погрешность измерения коэффициента стоячей волны по напряжению $\pm(0,2 + 0,03K)$ дБ, погрешность измерения ослабления $\pm(0,2 + 0,03K)$ дБ, погрешность измерения фазы $\pm 6^\circ$.



Рис. 3. Векторный анализатор цепей типа P4-MBM
Fig. 3. Vector network analyzer type P4-MBM

Для генераторов СВЧ типа Г4-MBM (рис. 4) рабочие диапазоны частот, ГГц: 0,01–17,44, 17,44–25,95, 25,95–37,50, 37,50–53,57, 53,57–78,33, 78,33–118,10, 118,10–178,40; погрешность установки частоты $\pm(2 \cdot 10^{-5} f_{\max})$.



Рис. 4. Генератор СВЧ типа Г4-MBM
Fig. 4. Microwave generator type Г4-MBM

Для ваттметров (измерителей мощности) типа М2-MBM (рис. 5) рабочие диапазоны частот, ГГц: 0,01–17,44, 17,44–25,95, 25,95–37,50, 37,50–53,57, 53,57–78,33, 78,33–118,10, 118,10–178,40; погрешность измерения мощности 6–10 %.



Рис. 5. Ваттметр типа М2-MBM
Fig. 5. Wattmeter type М2-MBM

Для высотомера, работающего в диапазоне частот от 31,80 до 33,40 ГГц (рис. 6), диапазон измерения высоты – от 0,3 до 300,0 м; среднеквадратическое отклонение измерения высоты в диапазоне высот от 0,3 до 10,0 м – не более $\pm 0,02$ м, от 10 до 300 м – ± 3 %.

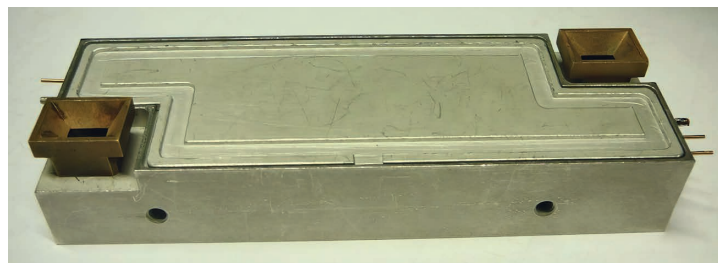


Рис. 6. Высотомер, работающий в диапазоне частот от 31,80 до 33,40 ГГц
Fig. 6. Altimeter operating in the frequency range from 31.80 to 33.40 GHz

Для автоматической системы тестирования радиолокационных устройств и систем (рис. 7) рабочий диапазон частот – 0,10–140 ГГц, количество приемных каналов – 8, две 2х- и 3х- координатные подвижные платформы.

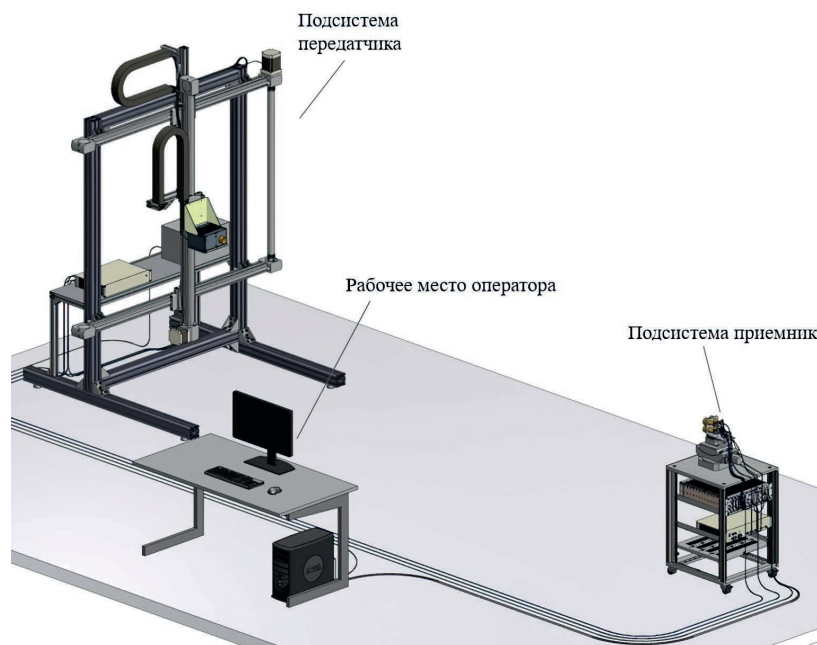


Рис. 7. Автоматическая система тестирования радиолокационных устройств и систем
Fig. 7. Automated testing system for radar devices and systems

Для комплекта телеметрического оборудования (рис. 8) диапазон частот – дециметровый, количество каналов – 4, поток информации – 1 Мв/с, жесткие условия эксплуатации.



Рис. 8. Комплект телеметрического оборудования
Fig. 8. Telemetry equipment set

Начиная с 1977 г., под руководством профессора Альберта Степановича Елизарова началась разработка измерителей комплексных S -параметров, которые успешно поставлялись в качестве единичных лабораторных приборов в различные НИИ СССР. Внешний вид одного из таких приборов показан на рис. 9. В 1996-м ученики А. С. Елизарова создали сначала НИЛ 1.9, а потом Центр 1.9 БГУИР, где продолжили исследования, разработку и производство широкой гаммы современных измерительных приборов МДДВ. В Центре 1.9 созданы и аккредитованы испытательная и калибровочная лаборатории в диапазонах частот 37,50–178,40 ГГц – единственные в Беларуси. Разработаны и метрологически аттестованы calorиметрические измерители мощности (ваттметры) в диапазонах частот 37,50–178,40 ГГц с погрешностью измерения 0,5–1,0 % (5 %) (рис. 10). Данные измерители позволят создать отечественную эталонную базу единицы мощности и ослабления [7, 8].

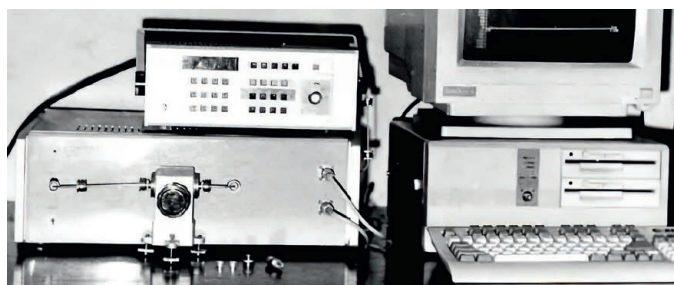


Рис. 9. Векторный анализатор цепей выпуска 1980 г.
Fig. 9. Vector network analyzer produced in 1980



Рис. 10. Калориметрический измеритель мощности типа МК-МВМ
Fig. 10. Calorimetric power meter type МК-MBM

Заклучение

1. Разработана и создана новая элементная база миллиметрового диапазона длин волн, которая уже внедряется на опытном производстве и применяется при сборке приборов миллиметрового диапазона длин волн. Во всей номенклатуре производимой продукции широко используются оригинальные модули цифровой обработки сигналов и синтеза зондирующих сигналов.

2. Выведены оригинальные алгоритмы обработки сигналов и представления результатов, позволившие расширить пределы измерений, повысить их точность и получить новые качественные приборы общего, специального и двойного назначения, что подтверждается широкой номенклатурой выполненных контрактов, отечественных и зарубежных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

3. Полученные результаты успешно внедряются в учебный процесс. Ряд измерительных приборов – панорамный измеритель коэффициента стоячей волны по напряжению и ослабления, измеритель мощности – используются при выполнении лабораторных работ на кафедре информационно-измерительных систем БГУИР, векторный анализатор цепей – на кафедре электроники. Готовится к открытию новая специальность 7-07-0713-03 «Сверхвысокочастотные техника, технологии и измерительные системы».

4. Освоены новые частотные диапазоны 118,10–178,40 ГГц, не имеющие аналогов и соответственно метрологического обеспечения. Разработаны и метрологически аттестованы калориметрические измерители мощности в диапазонах частот 37,50–178,40 ГГц с погрешностью измерения 0,5–1,0 % (5 %). Перспективным направлением дальнейших исследований и создания технологического задела является освоение частотных диапазонов до 500 ГГц.

5. Прикладные и фундаментальные исследования требуют привлечения и использования микроэлектронного оборудования, уже имеющегося в БГУИР. Это участки вакуумного напыления, химии и фотолитографии, химии и электрохимии, что позволит создать малозумящие

усилители и усилители мощности миллиметрового диапазона длин волн. Также перспективным является создание новой специальности «СВЧ микроэлектроника» для подготовки специалистов по разработке и производству конкурентноспособных импортозамещающих изделий и систем миллиметрового диапазона длин волн.

Список литературы

1. Векторные анализаторы цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / В. А. Богуш [и др.]. М.: Горячая линия – Телеком, 2019.
2. Гусинский, А. В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и электр., 2008.
3. Гусинский, А. В. Введение в статистическую метрологию / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. Минск: Бестпринт, 2010.
4. Гусинский, А. В. Анализ и преобразования сигналов / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. Минск: Бестпринт, 2012.
5. Измеритель комплексных параметров СВЧ-устройств: пат. Респ. Беларусь 6193 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. Опубл. 30.06.2004.
6. Способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S-параметров СВЧ-устройств: пат. BY 22074 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Д. А. Кондрашов, А. В. Сайков, В. П. Липатников, Н. А. Певнева. Опубл. 30.08.2018.
7. Широкодиапазонный генератор сигналов: пат. 036472 EA / А. В. Гусинский, А. В. Ворошень, С. М. Лапшин, Д. А. Кондрашов, А. С. Волынец, А. М. Кострикин. Опубл. 30.09.2019.
8. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / И. Ф. Бурак [и др.]. М.: Горячая линия – Телеком, 2018.

References

1. Bogush V. A., Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2019) *Millimeter and Centimeter Wave Length Vector Network Analyzers*. Moscow, Hote Line – Telecom (in Russian).
2. Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2008) *Millimeter Wave Vector Network Analyzers*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
3. Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2010) *Introduction to Statistical Metrology*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2012) *Analysis and Transformation of Signals*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
5. Gusinsky A. V., Kostrikin A. M. (2004) *Meter of Complex Parameters of Microwave Devices*. Pat. Rep. Belarus 6193. Publ. 30.06.2004 (in Russian).
6. Gusinsky A. V., Kostrikin A. M., Kondrashov D. A., Saikov A. V., Lipatnikov V. P., Pevneva N. A. (2018) *A Method for Generating Voltages that Carry Information about the Quadrature Components of the S-Parameters of Microwave Devices*. Pat. BY 22074. Publ. 30.08.2018 (in Russian).
7. Gusinsky A. V., Voroshen A. V., Lapshin S. M., Kondrashov D. A., Volynets A. S., Kostrikin A. M. (2019) *Wide-Range Signal Generator*. Pat. 036472 EA. Publ. 30.09.2019 (in Russian).
8. Burak I. F., Gusinsky A. V., Sharov G. A., Voroshen A. V., Lufarov A. N. (2018) *Measurement of Microwave Power in the Range of Centimeter and Millimeter Waves*. Moscow, Hotline – Telecom (in Russian).

Сведения об авторе

Гусинский А. В., д-р техн. наук, доц., зав. каф. информационно-измерительных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-53
E-mail: gusinski@bsuir.by
Гусинский Александр Владимирович

Information about the author

Gusinsky A. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Information and Measuring Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-53
E-mail: gusinski@bsuir.by
Gusinsky Alexander Vladimirovich