

Разработка и исследование коммутатора приходящих сигналов для приемо-передающих устройств систем связи

В.А. Маклашов, Д.И. Шашков, М.Н. Пиганов 

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34

Аннотация – Выполнен анализ типов коммутаторов приходящих сигналов. Сделан выбор конструктивной реализации коммутатора. Предложена методика его проектирования и моделирования. Для реализации методики было использовано программное обеспечение NI AWR Design Environment. Построена модель СВЧ-фильтра на основе микрополосковых элементов. Проведено сравнение коэффициентов рассеяния и стоячей волны по напряжению полученной модели и топологии фильтра. Установлено, что коммутатор обеспечивает работоспособность как с непрерывными, так и с импульсными радиосигналами с любыми видами модуляции. Он имеет коэффициент передачи радиосигналов в рабочем диапазоне частот в открытом состоянии входов без ослабления аттенюатором от 0 до +10 дБ при максимальном ослаблении от –28 до –4 дБ, а в закрытом состоянии входов при максимальном ослаблении аттенюатора – от –80 до –100 дБ. Уровень развязки между входами составляет не менее –50...–55 дБ. Коэффициент передачи радиосигналов со входов на выход регулируется с шагом 0,5 дБ, глубиной не менее минус 15 дБ, с переходом перестройки не более 100 нс. КПС обеспечивает линейный режим функционирования с уровнем шумов и паразитных составляющих на выходах не более –90 дБ/Вт и отношение сигнал/шум не менее 10 дБ в линейном режиме функционирования. Неравномерность коэффициентов передач радиосигналов на каждом из выходов в рабочем диапазоне частот при открытом состоянии входов без ослабления аттенюаторами и линейном режиме функционирования составляет не более $\pm 1,0$ дБ. Коэффициент интермодуляционных искажений второго и третьего порядков при подаче на входы двух наносекунд радиосигналов не превышает –60 дБс.

Ключевые слова – моделирование, проектирование, методика, коммутатор, приходящий сигнал, приемо-передающее устройство, система связи, фильтр, модуль, параметры.

Введение

В настоящее время одной из основных задач СВЧ-техники является расширение областей ее использования, в том числе разработка и развитие новых технологий на основе беспроводных систем связи и телекоммуникаций. При этом идет процесс освоения все новых полос частот [1]. Одним из узких мест в данном случае являются коммутирующие устройства, которые в ряде случаев не обеспечивают требуемого уровня электромагнитной совместимости радиоканалов [2].

Эта проблема особенно актуальна при разработке и производстве малогабаритных комплексов нового поколения для защиты летательных аппаратов различного назначения с функциями радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления [3–8], выполненных по модульной технологии VPX [9].

Целью данной работы стали разработка методики проектирования, моделирование и исследование коммутатора приходящих сигналов (КПС) с функциями усиления, переключения и предварительной селекции радиосигналов в частотном диапазоне 1...12 ГГц.

1. Анализ типов КПС

Для построения КПС могут использоваться газоразрядные, электромеханические, ферритовые и полупроводниковые устройства. Однако первые три типа устройств на данном этапе оказались малогабаритными. У механических устройств низкое быстродействие (время коммутации составляет 10^{-2} ... 10^{-3} с), большие массогабаритные показатели, низкая надежность. Газоразрядные устройства имеют высокую шумовую температуру, а в низкоомном состоянии – большое время восстановления.

Наиболее перспективными являются полупроводниковые коммутирующие устройства. Они характеризуются высокими быстродействием (10^{-5} ... 10^{-9} с), относительно малой мощностью по цепи управления, высокой надежностью, низкими массогабаритными показателями. Высокую эффективность показали коммутаторы на основе р-и-п диодов, обладающих способностью изменять импеданс в широких пределах при поглощении минимальной СВЧ-мощности.

2. Выбор конструктивной реализации коммутатора

VPX-технология базируется на модульном принципе конструирования. Был выбран наиболее на-

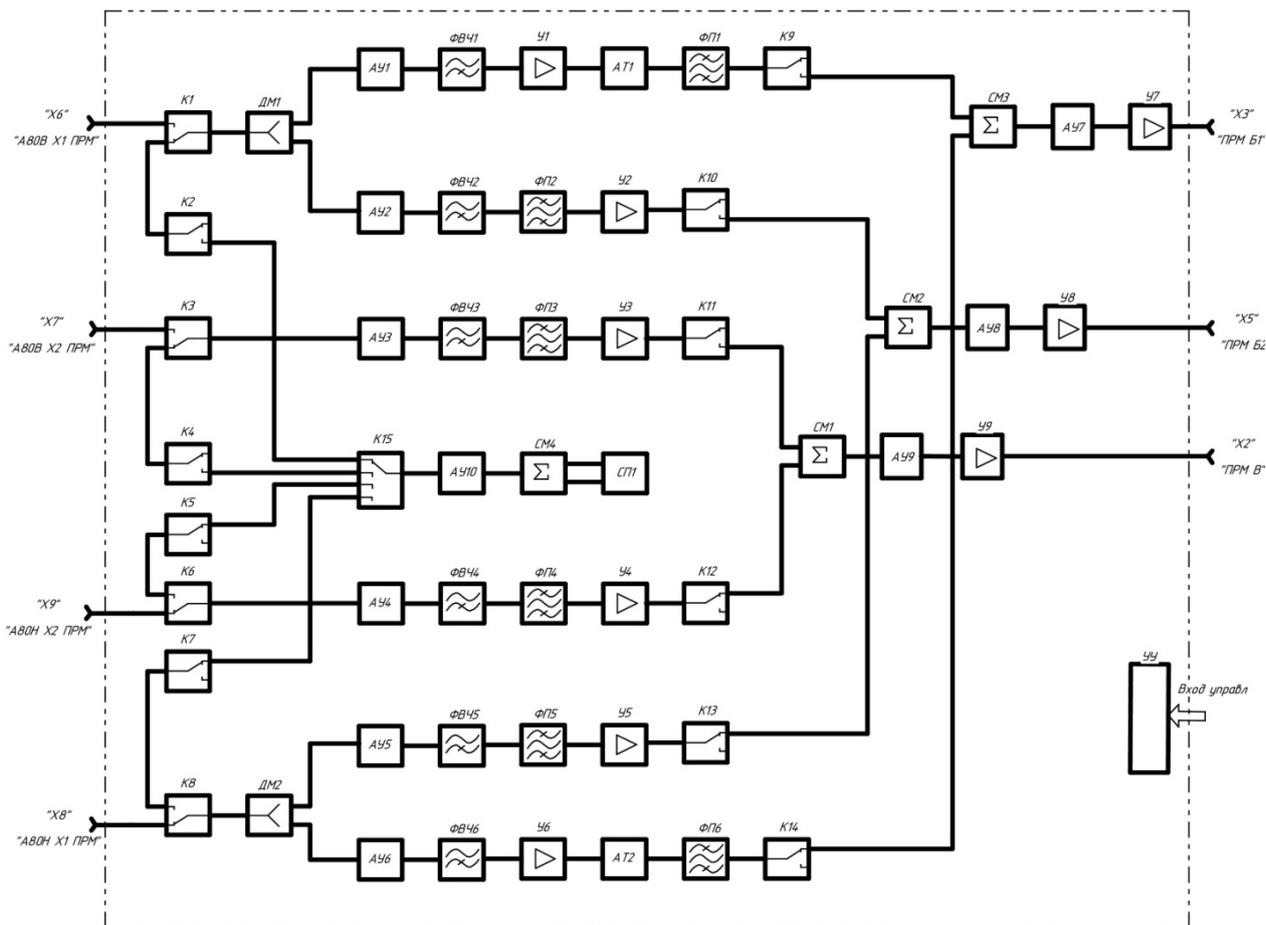


Рис. 1. Функциональная схема
 Fig. 1. Functional diagram

дежный вариант реализации модуля КПС в виде герметичной микросборки. Такой вариант, кроме того, имеет минимальное число узлов и элементов, является высокотехнологичным, ремонтно-пригодным. Большинство элементов унифицированы и многофункциональны.

Для реализации данного варианта модуля КПС была разработана новая функциональная схема (рис. 1).

Модуль содержит пять ВЧ-входов и три ВЧ-выхода, обеспечивающих функционирование в рабочем диапазоне частот. Они выполнены с помощью герметичных коаксиально-полосковых переходов. В состав КПС входят 15 коммутаторов (К1...К15), 2 фиксированных аттенюатора (АТ1, АТ2), 6 полосовых фильтров (ФП1...ФП6), 4 сумматора функциональной мощности (СМ1...СМ4), 9 усилителей (У1...У9), 2 делителя мощности (ДМ1, ДМ2), устройство управления (У), синтезатор перестраиваемый (СП1).

На входах модуля установлены фильтры верхних частот (ФВЧ1...ФВЧ6) с КСВН не более 1,4. ФВЧ имеют коэффициент передачи в рабочем ди-

апазоне не менее -2 дБ, а в полосе заграждения – не более минус 25 дБ.

Модуль обеспечивает возможность контроля температуры наиболее тепловыделяющего электро-радиоизделия и внешней воздействующей температуры, а также текущего состояния цепей управления с передачей данных по интерфейсу RS-485.

Конструктивно модуль КПС выполнен в виде герметичной микросборки.

3. Методика проектирования и моделирования

Предлагаемая методика включает в себя следующие основные этапы.

1. Создание системы связи. Определяется состав элементов и электромагнитных структур в виде электрических моделей.
2. Выбор структурных элементов, в частности фильтров, определение числа каскадов.
3. Разработка (выбор) модели первого каскада фильтра.
4. Разработка (синтез) топологии элементов фильтра первого каскада.

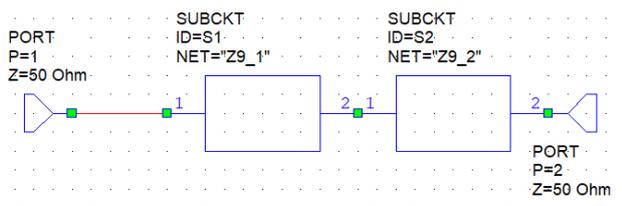


Рис. 2. Структура фильтра Z9
Fig. 2. Filter structure Z9

5. Разработка (выбор) модели второго каскада фильтра.

6. Синтез топологии элементов (фильтра) второго каскада.

7. Моделирование и анализ элементов и схем с помощью симуляторов NI AWRC: используются линейный, продвинутый гармонический, 3D методы конечных элементов.

8. Настройка и оптимизация схем, коррекция топологии элементов и схем.

9. Статистический анализ результатов, исследование отклика системы на основе статистически варьируемых параметров элементов схемы.

10. Верификация результатов проектирования на системном и схемном уровне.

11. Интегрированная проверка проектных норм (DRC).

12. Экстракция паразитных компонент на основе 3D расчетного алгоритма по высокоскоростной технологии OKA Int.

Для реализации данной методики было использовано программное обеспечение NI AWR Design Environment. Этот пакет объединяет три инструмента: Visual System Simulator (VSS), Microwave Office (MWO) и Analog Office (AO).

Главной особенностью среды проектирования AWR Design Environment является единая объектно-ориентированная модель данных, которая позволяет синхронизировать работу над проектом без использования промежуточных трансляторов. Доступ ко всем данным проекта обеспечивается в рамках единой платформы. На системном уровне моделирование узлов и обработки радиосигналов выполняется в пакете VSS, а на физико-топологическом уровне – в MWO. Пакет MWO имеет современную библиотеку СВЧ-элементов.

Пакет Analog Office позволяет использовать единую среду для полного взаимодействия с комплексным и мощным набором встроенных инструментов для разработки аналоговых и радиочастотных микросхем и микросборок методами «сверху – вниз» и «front – toent».

Программный продукт NI AWR Design Environment был удачно интегрирован в традицион-

ный маршрут проектирования радиоэлектронных устройств СВЧ-диапазона на основе EDA и CAD систем.

4. Моделирование и проектирование фильтров

Многие параметры приемного тракта определяются характеристиками фильтров, в первую очередь полосовых фильтров [10]. Поэтому конструкции фильтров уделяется высокое внимание. В связи с этим рассмотрим процедуру моделирования и проектирования на примере фильтров. Возьмем фильтр Z9. Структура данного фильтра приведена на рис. 2.

Разобьем его на два каскада. Для каждого каскада построим модель с заданными параметрами подложки и топологию.

Микрополосковые элементы представляют собой проводники на слое диэлектрика, расположенные с одной его стороны, а другая сторона имеет сплошную металлизацию. Толщина диэлектрика и диэлектрическая проницаемость определяют информацию, необходимую для расчета волнового сопротивления линий. Схема, содержащая микрополосковые элементы, должна включать специальный элемент, не присоединенный электрически к другим элементам схемы, т. е. подложку с заданными параметрами. Разработанная модель 1-го каскада приведена на рис. 3. На рис. 4 показана синтезированная топология этого каскада.

На рис. 5 представлены коэффициенты рассеяния (DB) и коэффициент стоячей волны по напряжению (VSWR), где Z9_1 – первый каскад, Z9 – фильтр, Z9_1tp – топология первого каскада.

Как видно из рис. 5, коэффициенты рассеивания модели и топологии несколько отличаются. Для второго каскада последовательность действий аналогичная.

На рис. 6 приведена разработанная модель 2-го каскада, а на рис. 7 – синтезированная топология этого каскада.

На рис. 8 представлены коэффициенты рассеяния (DB) и коэффициент стоячей волны по напряжению (VSWR) для второго каскада, где Z9_2 – модель второго каскада, Z9_2tp – топология второго каскада.

Теперь объединим топологические рисунки первого и второго каскадов фильтра, расположим контактные площадки. Топология фильтра приведена на рис. 9. На рис. 10 показаны коэффициенты рассеяния и стоячей волны для фильтра Z9.

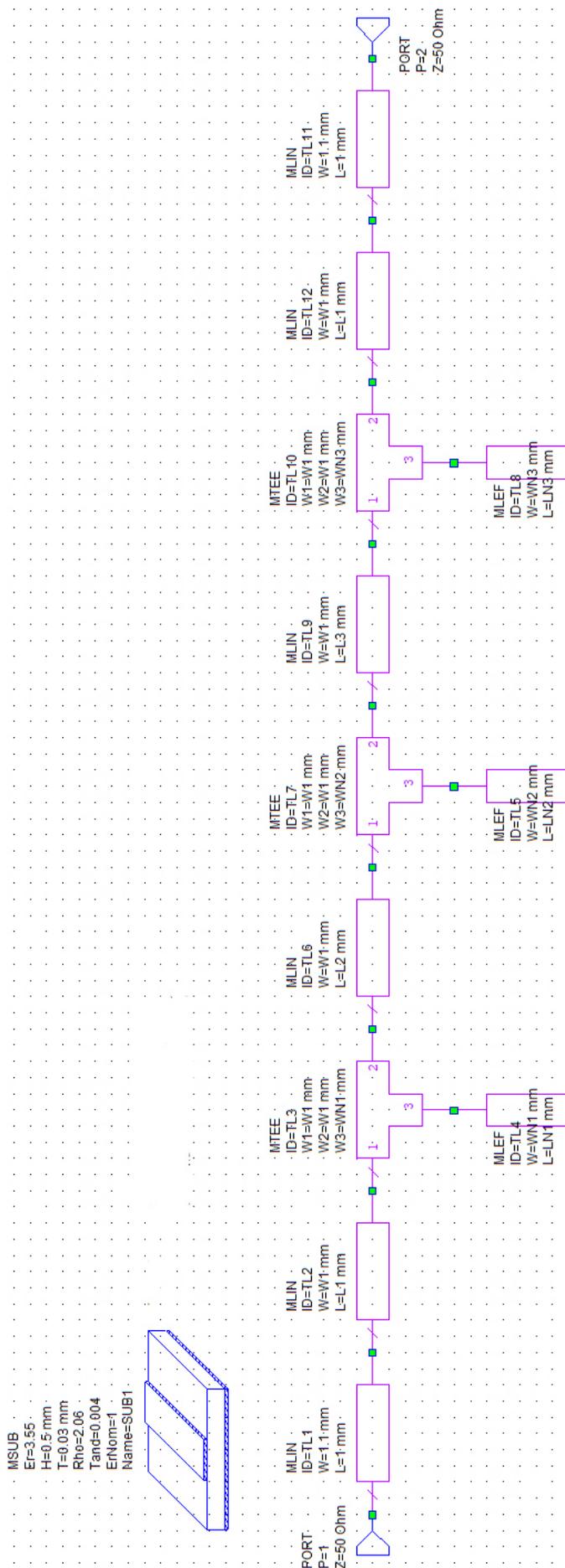


Рис. 3. Модель первого каскада
 Fig. 3. The model of the first cascade

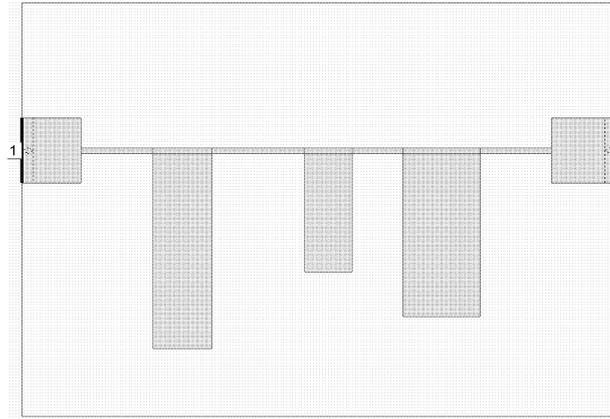


Рис. 4. Топология первого каскада
 Fig. 4. Topology of the first cascade

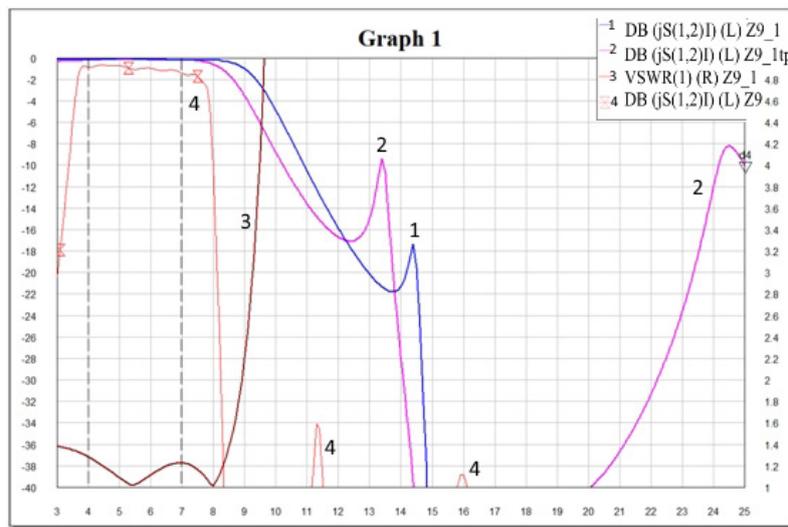


Рис. 5. Коэффициенты рассеяния (DB) и коэффициент стоячей волны по напряжению (VSWR) для первого каскада
 Fig. 5. The scattering coefficients (DB) and the standing wave voltage coefficient (VSWR) for the first cascade

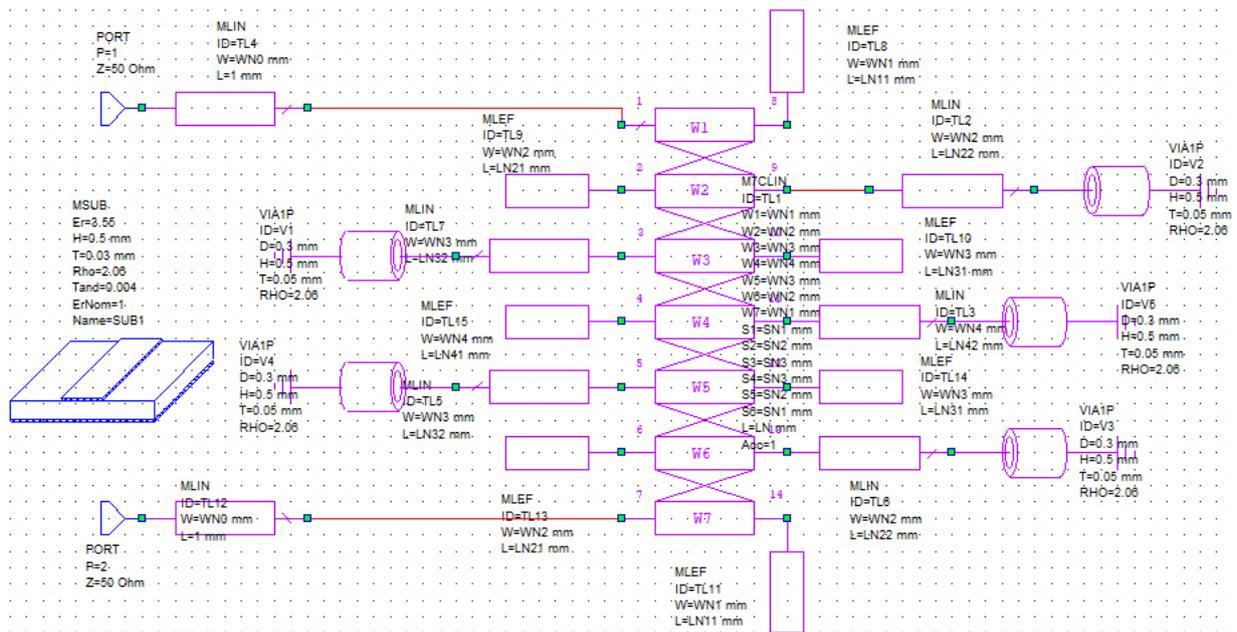


Рис. 6. Модель второго каскада
 Fig. 6. The model of the second cascade

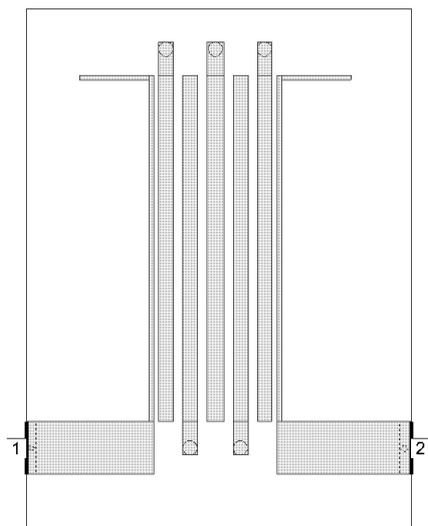


Рис. 7. Топология второго каскада
Fig. 7. The topology of the second cascade

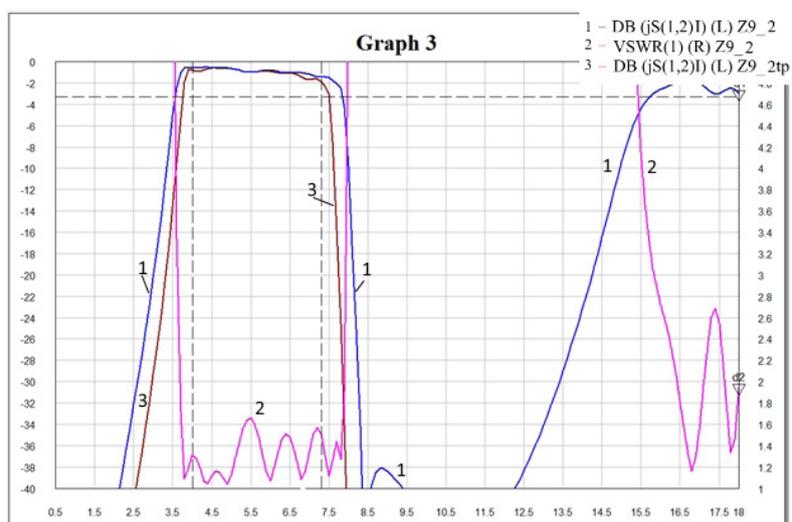


Рис. 8. Коэффициенты рассеяния (DB) и коэффициент стоячей волны по напряжению (VSWR) для второго каскада
Fig. 8. The scattering coefficients (DB) and the standing wave voltage coefficient (VSWR) for the second cascade

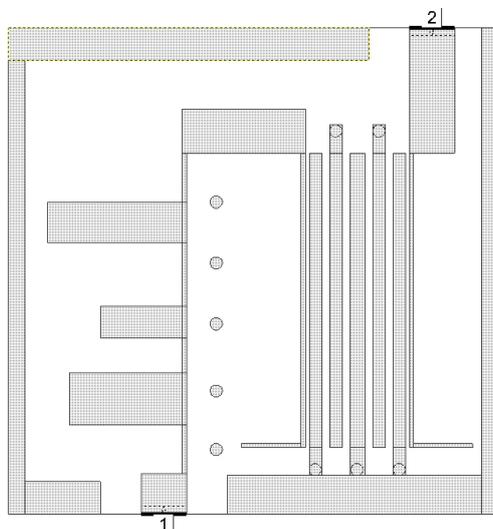


Рис. 9. Топология фильтра Z9
Fig. 9. Filter topology Z9

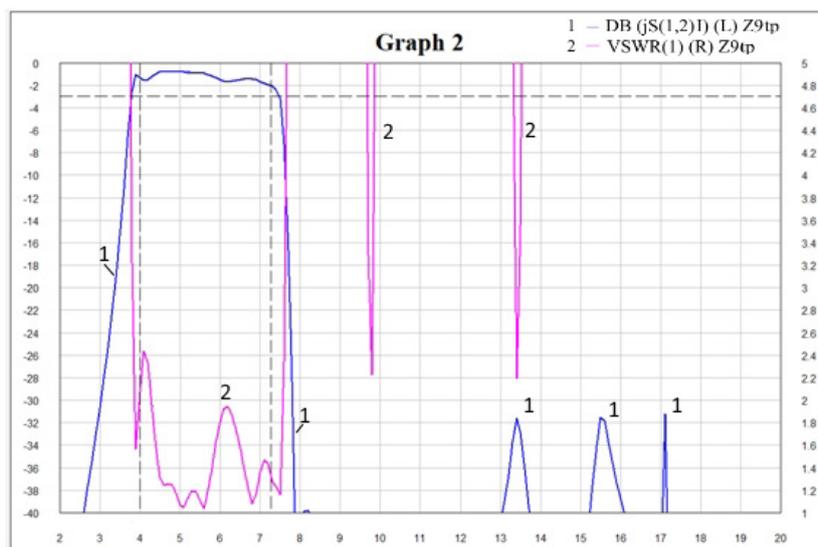


Рис. 10. Коэффициент рассеяния (DB) и коэффициент стоячей волны по напряжению (VSWR) для фильтра Z9
Fig. 10. The scattering coefficient (DB) and the standing wave voltage coefficient (VSWR) for filter Z9

5. Исследование параметров КПС

КПС обеспечивает работоспособность как с непрерывными, так и с импульсивными радиосигналами с любимыми видами модуляции. Он имеет коэффициент передачи радиосигналов в рабочем диапазоне частот в открытом состоянии входов без ослабления аттенюатором от 0 до +10 дБ, при максимальном ослаблении – от –28 до –4 дБ, а в закрытом состоянии входов при максимальном ослаблении аттенюатора – от –80 до –100 дБ. Уровень развязки между входами составляет не менее – 50...55 дБ. Коэффициент передачи радиосигналов со входов на выход регулируется с шагом 0,5 дБ, глубиной не менее минус 15 дБ, с переходом перестройки не более 100 нс. КПС обеспечивает линейный режим функционирования с уровнем шумов и паразитных составляющих на выходах не более –90 дБ/Вт и отношение сигнал/шум не менее 10 дБ в линейном режиме функционирования.

Неравномерность коэффициентов передач радиосигналов на каждом из выходов в рабочем диапазоне частот при открытом состоянии входов без ослабления аттенюаторами и линейном режиме функционирования составляет не более $\pm 1,0$ дБ.

Коэффициент интермодуляционных искажений второго и третьего порядков при подаче на входы двух наносекунд радиосигналов не превышает минус 60 дБс.

Заключение

Предложенная методика проектирования, моделирования и исследования коммутатора входящих сигналов позволила на 42–45 % сократить время разработки, на 20–28 % повысить точность расчетов данного класса устройств. Использованный программный продукт NI AWR Design Environment был интегрирован в имеющийся на предприятии маршрут проектирования СВЧ-устройств на основе известных EDA- и CAD-систем.

Список литературы

1. Баскакова А.Э., Тургалиев В.М., Холодняк Д.В. Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры с постоянной шириной полосы пропускания на элементах с сосредоточенными параметрами // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 4. С. 36–43.
2. Насенков И.А. Радиоэлектронные технологии России. Альманах. М.: Издательство НО «Ассоциация “Лига содействия оборонным предприятиям”», 2012. 480 с.
3. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов / Д.В. Шерстнев [и др.] // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. 2017. № 1. С. 172–173.
4. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин [и др.]. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.
5. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Радиоразведка и радиопротиводействие. Т. 2. М.: МАИ, 1998. 248 с.
6. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. М.: Вузовская книга, 2007. С. 59–64.
7. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: уч. пособ. для вузов. М.: Радио и связь, 1986. С. 36–37.

8. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. Томск: Изд-во ТУСУР, 2002. 251 с.
9. Маклашов В.А. Модульная технология VPX в технике РЭБ // Радиотехника. 2016. № 1. С. 28–31.
10. Маклашов В.А., Пиганов М.Н. Моделирование сверхширокополосных полосковых СВЧ-фильтров, встроенных в печатную плату // Информационные технологии и нанотехнологии: IV Международная конференция и молодежная школа. 2018. С. 1689–1697.

References

1. Baskakova A.E., Turgaliev V.M., Holodnjak D.V. Tunable bandpass filter with constant bandwidth on lumped element. *Izvestija vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2015, no. 4, pp. 36–43. (In Russ.)
2. Nasenkov I.A. *Russian Radio-Electronic Technology. Almanac*. Moscow: Izdatel'stvo NO «Assotsiatsija "Liga sodejstvija oboronnyim predpriyatijam"», 2012, 480 p. (In Russ.)
3. Sherstnev D.V. et al. Compact modular complex RTR and REB Individual protection of aircraft. *Radioelektronnaja bor'ba v Vooruzhen-nyh silah Rossijskoj Federatsii*, 2017, no. 1, pp. 172–173. (In Russ.)
4. Dobykin V.D. et al. *Electronic Warfare. Power Damage to Electronic Systems*. Moscow: Vuzovskaja kniga, 2007, 468 p. (In Russ.)
5. Tsvetnov V.V., Demin V.P., Kuprijanov A.I. *Electronic Warfare. Radio Reconnaissance and Countermeasure*. Vol. 2. Moscow: MAI, 1998, 248 p. (In Russ.)
6. Kuprijanov A.I., Saharov A.V. *Theoretical Foundations of Electronic Warfare*. Moscow: Vuzovskaja kniga, 2007, pp. 59–64. (In Russ.)
7. Gutkin L.S. *Design of Radio Systems and Radio*: educ. book for high schools. Moscow: Radio i svjaz', 1986, pp. 36–37. (In Russ.)
8. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Phase Finders*. Tomsk: Izd-vo TUSUR, 2002, 251 p. (In Russ.)
9. Maklashov V.A. Modular VPX EW technology in electronic warfare. *Radiotekhnika*, 2016, no. 1, pp. 28–31. (In Russ.)
10. Maklashov V.A., Piganov M.N. Simulation of ultra-wideband microwave stripline filters built into the printed circuit board. *Informacionnye tehnologii i nanotekhnologii: IV Mezhdunarodnaja konferentsija i molodezhnaja shkola*, 2018, pp. 1689–1697. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 1, pp. 106–114

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.1.106-114

Received 27 December 2019
Accepted 17 January 2020

Development and research of incoming signal switch for transceiver communication systems

V.A. Maklashov, D.I. Shashkov, M.N. Piganov 

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086, Russia

Abstract – The analysis of the types of incoming signal switches was performed. The choice of constructive realization of the switch was made. It was offered the method of its designing and simulation. NI AWR Design Environment software was used to implement the method. The model of microwave filter based on microstrip elements was constructed. The scattering and standing wave factors were compared in the voltage of the obtained model and the filter topology. It was determined that the switch provides working capacity both with continuous and impulse radio signals with any kind of modulation. It has a transmission coefficient of radio signals in the operating frequency range in the open state of the inputs without attenuation from 0 to +10 dB, at maximum attenuation – from –28 to –4 dB, and in the closed state of the inputs with the maximum attenuation – from –80 to –100 dB. The level of isolation between the inputs is not less than –50...–55 dB. The transmission coefficient of radio signals from the inputs to the output is regulated in increments of 0,5 dB, with depth of at least minus 15 dB, with the transition tuning less than 100 ns. Switch of coming signals provides a linear operation with the noise level and spurious component at the outputs no more than –90 dB/W and the signal/noise ratio of at least 10 dB in linear mode of operation. The irregularity of the transmission coefficients of radio signals on each of the outputs in the operating frequency range when the inputs are open without attenuation and the linear mode of operation is not more than ±1,0 dB. The second and third order intermodulation distortion coefficient does not exceed –60 dBs when two nanoseconds of radio signals are applied to the inputs.

Keywords – simulation, designing, methods, switch, incoming signal, transceiver, communication systems, filter, module, parameters.

Информация об авторах

Маклашов Владимир Анатольевич, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; начальник отделения, главный конструктор изделия АО «НИИ «Экран». Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева по специальности «Радиотехника».

Область научных интересов: проектирование и моделирование систем радиоэлектронной борьбы.

E-mail: mg37@rambler.ru

Шашков Дмитрий Ильич, инженер второй категории Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Окончил магистратуру Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева по направлению «Конструирование и технология электронных средств».

Область научных интересов: моделирование и конструирование СВЧ-устройств.

E-mail: kipres@ssau.ru

Пиганов Михаил Николаевич, 1951 г. р., доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Окончил радиотехнический факультет Куйбышевского авиационного института имени С.П. Королева по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Кандидат технических наук с 1981 г. Диссертацию защитил в специализированном совете Московского авиационного института имени Серго Орджоникидзе по специальности 05.12.18 – Твердотельная электроника и интегральная схемотехника, включая материалы, технологию и оборудование. Докторскую диссертацию защитил в Таганрогском радиотехническом институте по специальности «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах». С 1986 по 2002 гг. – заведующий кафедрой микроэлектроники и технологии радиоэлектронной аппаратуры Самарского государственного аэрокосмического университета (Куйбышевского авиационного института). С 2004 по 2013 г. – заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Самарского государственного аэрокосмического университета. Член Федерального УМО по направлению «Электроника, радиотехника и системы связи». Член редколлегии журнала «Надежность и качество сложных систем».

Область научных интересов: надежность и качество бортовых радиоэлектронных средств.

E-mail: piganov@ssau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1830-4507>

Information about the Authors

Vladimir A. Maklashov, postgraduate student of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia; Head of a Department, Chief Designer of a Product JSC «Research Institute «Ekran», Samara, Russia. He graduated from the Samara National Research University with a degree in Radio Engineering.

Research interests: design and simulation of electronic warfare systems.

E-mail: mg37@rambler.ru

Dmitrii I. Shashkov, Engineer of the Samara National Research University, Samara, Russia. He received the master's degree from the Samara National Research University in Design and Engineering of Electronic Equipment.

Research interests: modeling and design of UHF devices.

E-mail: kipres@ssau.ru

Mikhail N. Piganov was born in 1951, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia. He graduated from the Radio Engineering Faculty of the Kuibyshev Aviation Institute with a Design and Production Technology of Radioelectronic Equipment degree. He got a Ph.D. degree in engineering in 1981. He defended his dissertation at the Moscow Aviation Institute named after Sergo Ordzhonikidze on «Solid-State Electronics Including Materials, Technology and Equipment». He defended his doctoral dissertation at the Southern Federal University on «Solid-State Electronics Electronic Components, Micro and Nano Electronics, Quantum Effect Equipment». He headed the Department of Microelectronics and Design of Radioelectronic Equipment of the Kuibyshev Aviation Institute from 1986 to 2002. He headed the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices of Samara State Aerospace University from 2004 to 2013.

Research interests: reliability and quality of board electrical equipment.

E-mail: piganov@ssau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1830-4507>