

GaAs МИС управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот: пример из практики АО «Микроволновые системы»

П.С. Сорвачев, А.В. Кондратенко

Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы» в г. Нижний Новгород

Аннотация: в докладе представлены результаты разработки монолитной интегральной схемы управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот. Проект выполнен на основе технологического процесса, в основе которого лежат нормально открытые GaAs транзисторы с высокой подвижностью электронов, имеющие длину затвора 0,15 мкм. При этом микросхема содержит в своем составе последовательно-параллельный драйвер управления, реализованный на основе опциональных E/D-транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм. По уровню достигнутых параметров микросхема не уступает зарубежным продуктам и может быть предложена широкому кругу потребителей.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, управление амплитудой и фазой сигнала, транзистор с высокой подвижностью электронов, последовательно-параллельный интерфейс управления, параметры рассеяния, GaAs технологический процесс.

1. Введение

В настоящее время использование электронной компонентной базы высокой степени интеграции является трендом при построении приемо-передающих модулей (ППМ). Интеграция нескольких функциональных узлов на один кристалл позволяет уменьшить габаритные размеры и увеличить технологичность сборки ППМ, что, в конечном счете, приводит к снижению себестоимости производства. Кроме того, исключение большого числа сварных межсоединений за счет повышения степени интеграции позволяет добиться качественного улучшения параметров ППМ и минимизировать их разброс от модуля к модулю.

В докладе представлены результаты разработки GaAs монолитной интегральной схемы (МИС) управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот MSP010D как пример из практики АО «Микроволновые системы» в интересах собственных подразделений, занимающихся разработкой и производством радиоэлектронных узлов, модулей и систем, а также для отечественных предприятий, готовых сотрудничать с АО «Микроволновые системы» как с поставщиком ЭКБ СВЧ.

2. Описание разработанной микросхемы и результаты проектирования

MSP010D представляет собой 3х-портовую МИС, содержащую в своем составе систему коммутаторов, обеспечивающих переключение режимов приема и передачи; малошумящий усилитель (МШУ) на входе приемного канала; 6-разрядный аттенюатор, 6-разрядный фазовращатель, а также два буферных усилителя в общем плече; предварительный усилитель мощности (ПУМ) на выходе передающего канала; цепи стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей и последовательно-параллельный драйвер управления.

Разработанный функциональный узел аттенюатора содержит в своем составе шесть секций с номинальным вносимым ослаблением 0,5 дБ; 1 дБ; 2 дБ; 4 дБ; 8 дБ и 16 дБ. Для минимизации паразитной фазовой конверсии секция «8 дБ» была реализована в виде каскадного включения двух секций «4 дБ», а в старшей секции

«16 дБ» были использованы двухпозиционные коммутаторы на входе/выходе для подключения опорного плеча и плеча, содержащего П-звено резистивного аттенуатора. Во все секции были включены дополнительные элементы (отрезки линий или катушки индуктивности), компенсирующие фазовые набеги при переключении состояний [1].

Функциональный узел фазовращателя содержит в своем составе шесть секций с номинальным вносимым фазовым сдвигом 5,625°; 11,25°; 22,5°; 45°; 90° и 180°. Секции «90°» и «180°» выполнены на основе коммутируемых звеньев ФВЧ и ФНЧ третьего порядка. Основным достоинством данного схемного решения является малая неравномерность вносимого фазового сдвига в рабочей полосе частот, а также низкая чувствительность ключевых параметров (вносимого фазового сдвига и паразитной амплитудной конверсии) к технологическим вариациям параметров коммутационных элементов. Основным недостатком схемного решения – высокие начальные потери, обусловленные коммутаторами на входе/выходе секций, в сравнении с другими реализациями. В секции «5,625°» коммутация производится между «вырожденными» ФВЧ и ФНЧ – конденсатором и катушкой индуктивности соответственно. Благодаря такому схемному решению удалось снизить вносимые потери. Подобная схемотехническая реализация применяется и в секции «11,25°» за исключением, что плечо ФНЧ дополнено подключаемым реактивным элементом (в виде радиального шлейфа), тем самым на уровне отдельно взятой секции получается достичь уровня возвратных потерь не менее 20 дБ. В секциях «22,5°» и «45°» коммутационные элементы являются составными частями фазосдвигающих цепей [2]. Данное решение является компромиссным по таким показателям как чувствительность электрических характеристик к технологическому разбросу параметров активных элементов, уровень начальных потерь и габаритные размеры секции. Порядок включения секций – компромиссный выбор между динамикой функционального узла фазовращателя, ошибкой установки фазовых состояний за счет взаимного влияния секций и удобством топологической упаковки узла на общий кристалл.

Все усилители в составе МИС выполнены по однокаскадной схеме. Однако вместо одиночного транзистора, включенного по схеме с общим истоком, применены два транзистора, включенных в стек. Подобное решение позволило получить от одного каскада коэффициент усиления более 10 дБ, а также за счет удвоенного напряжения питания (а не за счет роста периферии затвора активного элемента и, как следствие, тока потребления) реализовать выходную мощность при 1 дБ компрессии коэффициента усиления порядка 20 дБм. Кроме того, все каскады усиления в составе МИС реализованы с применением отрицательной параллельной обратной связи, что позволило добиться минимальной неравномерности коэффициента усиления в рабочей полосе частот и низкого КСВн входа/выхода.

Схемотехника последовательно-параллельного драйвера управления ограничена рядом логических элементов: инвертор; 2Или-Не; 3Или-Не и 2И-Не. На основе данных элементов реализованы D-триггеры, из которых, в свою очередь, формируются регистры сдвига и хранения, выполняющие главную функцию – преобразование кода из последовательного в параллельный. Все необходимые логические элементы реализованы на основе семейства DCFL-логики на полевых транзисторах (логические схемы с непосредственными связями). Основные преимущества его использования по сравнению с другими логическими семействами, это простота реализации и низкое потребление тока [3, 4].

На рисунках 1 и 2 для режимов работы на прием и передачу, соответственно, приведены расчетные частотные зависимости коэффициентов усиления, коэффициентов отражения от входа и выхода, управляющих амплитудных и фазовых характеристик, выходной мощности при 1 дБ компрессии в опорном состоянии, а

также среднеквадратических значений ошибок управления амплитудой и фазой при возможных состояниях фазовращателя и аттенюатора.

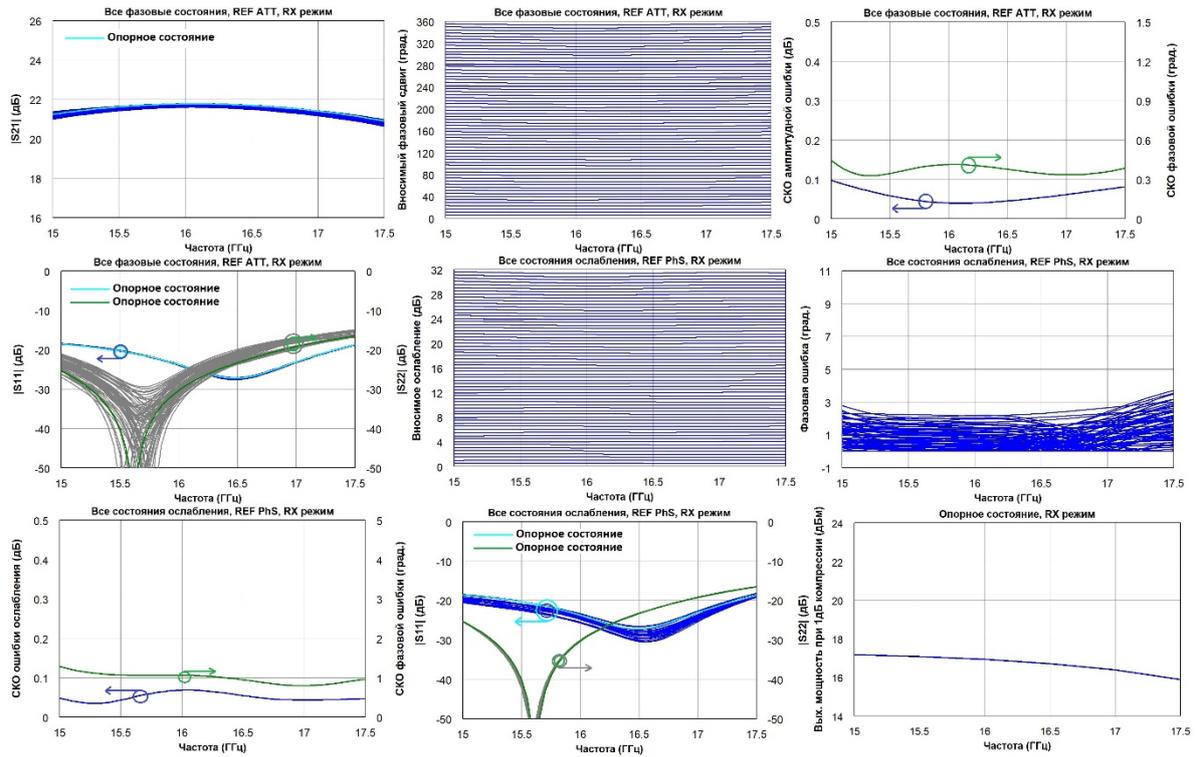


Рисунок 1. Расчетные частотные зависимости основных параметров MSP010D в режиме приема

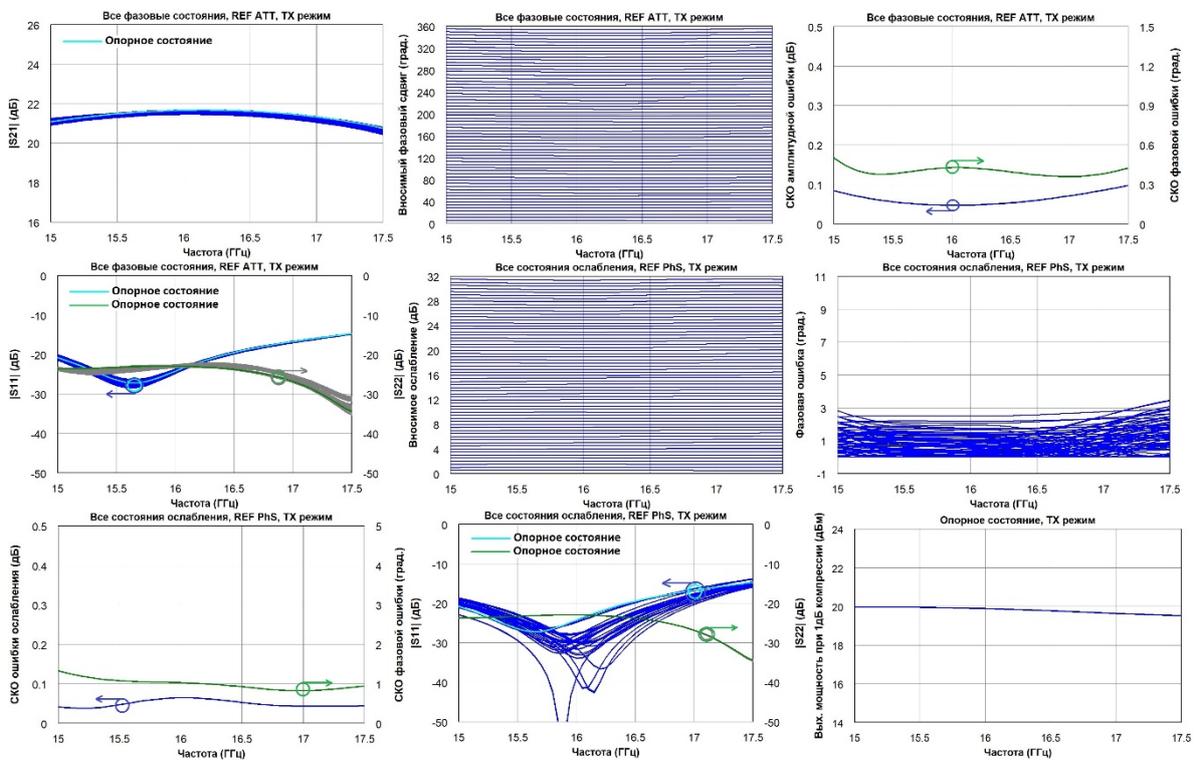


Рисунок 2. Расчетные частотные зависимости основных параметров MSP010D в режиме передачи

На рисунке 3 представлена топология МИС управления амплитудой и фазой Ку-диапазона частот.

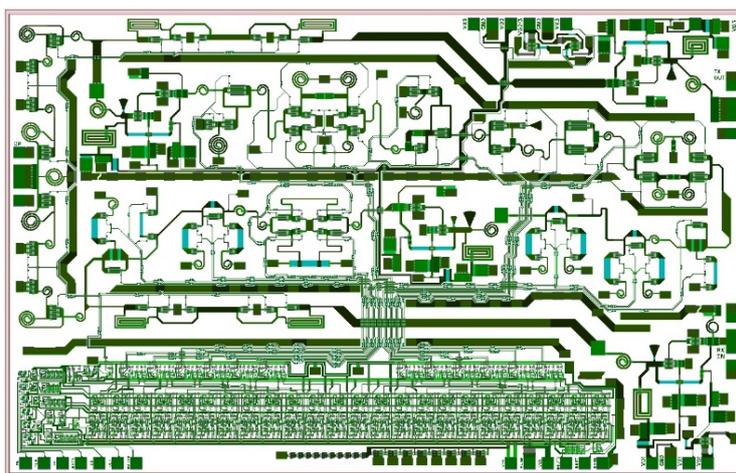


Рисунок 3. Топология МИС MSP010D

Основные параметры МИС MSP010D в сравнении с аналогами приведены в таблице 1. По уровню достигнутых параметров микросхема АО «Микроволновые системы» не уступает зарубежным продуктам и после выхода на серийное производство может быть предложена широкому кругу потребителей.

Таблица 1. Сравнение параметров разработанной МИС с аналогами

Наименование параметра, единица измерения	Значение					MSP010D
	[5]	[6]	[7]	[8]		
Диапазон рабочих частот, ГГц	6-18	12-18	15-17	14-18	15-17,5	
Режимы работы	RX/TX	RX TX	RX/TX	RX/TX	RX/TX	
Коэффициент передачи в режиме RX, дБ	18	17,3	–	>5	16	20
Коэффициент передачи в режиме TX, дБ	18	–	16,5	–	16,5	20
Выходная мощность P1dB в режиме RX, дБм	5	–	–	–	10	16
Выходная мощность P1dB в режиме TX, дБм	17	–	19,2	–	20,5	19,5
Коэффициент шума в режиме RX, дБ	8	4,3	–	–	–	5
Диапазон/шаг вносимого фазового сдвига, град	337,5/22,5	337,5/22,5	360/5,6	360/5,6	360/5,6	360/5,6
Диапазон/шаг вносимого ослабления, дБ	80/2,5	15,5/0,5	31,5/0,5	31,5/0,5	31,5/0,5	31,5/0,5
Напряжения питания, В	нет инф.	2 5	3,3	5/-5	8/-3,3	
Потребление, Вт	1,25 (TX)	0,09 0,38	0,5	0,8	1,49	
Интерфейс управления	SPI	SPI	SPI	SPI	SPI	
Технологический процесс	GaAs pHEMT	GaAs pHEMT	Si CMOS	GaAs pHEMT	GaAs pHEMT	
Количество каналов	1	1	1	1	1	
Тип корпуса / Габаритные размеры, мм	6,0×4,3	4,2×2,8	QFN/5×5	5×3,4	6×3,8	

3. Заключение

В докладе представлены результаты проектирования МИС управления амплитудой и фазой Ku-диапазона частот. По уровню достигнутых параметров микросхема не уступает зарубежным аналогам и после выхода на серийное производство может быть предложена широкому кругу потребителей, готовых сотрудничать с АО «Микроволновые системы» как с поставщиком ЭКБ СВЧ.

Список литературы

1. Ku B. H., Hong S. 6-bit CMOS digital attenuators with low phase variations for X-band phased-array systems //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2010. – Т. 58. – №. 7. – С. 1651-1663.
2. Moye C., Sakamoto G., Brand M. A compact broadband, six-bit MMIC phasor with integrated digital drivers //IEEE International Digest on Microwave Symposium. – IEEE, 1990. – С. 457-460.
3. Bentini A. et al. Design and realization of GaAs digital circuit for mixed signal MMIC implementation in AESA applications //International Journal of Microwave Science and Technology. – 2011. – Т. 2011.
4. Wang K. et al. Design of a low-insertion-phase-shift MMIC attenuator integrated with a serial-to-parallel converter //IEICE Electronics Express. – 2017. – Т. 14. – №. 20. – С. 20170924-20170924.
5. Bentini A. et al. A 6–18 GHz GaAs multifunctional chip for transmit/receive modules //2014 11th European Radar Conference. – IEEE, 2014. – С. 605-608.
6. Lee H. et al. A Ku-band GaAs multifunction transmitter and receiver chipset //Electronics. – 2020. – Т. 9. – №. 8. – С. 1327.
7. RMF150170PA, Ku-band CMOS Core Chip (Preliminary Datasheet, Rev. 30-Mar-18).
8. NC15334C-1418SD, Ku-Band Core Chip (METDA Semiconductor Datasheet).