

УДК 621.382.323

МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ С ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

А.М.Осипов, Э.Ю.Козловский, Б.И.Селезнев*

SWITCHED GAIN LNA

A.M.Osipov, E.Iu.Kozlovskii, B.I.Seleznev*

ЗАО НПП "Планета-Аргалл", argall@novgorod.net

*Институт электронных и информационных систем НовГУ, Boris.Seleznev@novsu.ru

Представлены результаты разработки и изготовления СВЧ-модуля, выполняющего функции малошумящего усилителя с отключением усиления для диапазона частот 1,0-4,0 ГГц. В состав модуля входят монолитные интегральные схемы дискретно-управляемого переключателя, драйвера управления и малошумящего усилителя. Полученные СВЧ-характеристики и параметры изделия свидетельствуют о возможности использования подобных модулей при разработке и изготовлении элементов приемно-передающих модулей АФАР.

Ключевые слова: модуль СВЧ, малошумящий усилитель, дискретно-управляемый переключатель, драйвер управления, pHEMT, АФАР

The results of design and manufacture of RF module functioning as a switched gain LNA for the 1.0-4.0 GHz frequency range are presented. The module consists of a set of monolithic integrated circuits: digital switch, level converter and LNA. The obtained RF characteristics and parameters of the device indicate the possibility of its application in transmit/receiver modules for active phased array antenna.

Keywords: RF module, LNA, digital switch, level converter, pHEMT, active phased array antenna

Современная радиолокация в силу широкой востребованности решаемых ею задач как в части военного, так и гражданского применения, привлекает в настоящее время к себе интерес широкого круга специалистов. Развитие данной области радиоэлектроники неразрывно связано с совершенствованием радиотехнических средств, в первую очередь радиолокационных станций (РЛС) и методов учета и обработки радиолокационной информации.

Одна из основных тенденций современной радиолокации — стремительный рост применения активных фазированных антенных решеток (АФАР). Ожидается, что в ближайшие годы АФАР будут доминировать во всех РЛС наземных, морских, авиационных и космических систем [1]. Наряду с использованием электронного сканирования вместо механического обзора пространства к ключевым преимуществам данных систем следует отнести высокую надежность и возможность работать на нескольких частотах сразу (вследствие наличия большого количества независимых приемо-передатчиков), а также высокую чувствительность (вследствие детектирования сигнала сразу приемником в базовой ячейке антенны).

В качестве базовой ячейки антенны используется приемо-передающий модуль (ППМ), выполненный на основе монокристаллических интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона. Все это стало возможным благодаря развитию технологии МИС с применением современных наногетероструктур. Наибольшее распространение до последнего времени при серийном производстве МИС для ППМ имели наногетероструктуры на основе GaAs. К области перспективных разработок относится применение полупроводниковых структур на основе GaN, как следующий шаг на пути совершенствования технических характеристик отдельных компонентов ППМ, так и увеличения надежности и сокращения массогабаритных характеристик АФАР в целом.

Типовая структура ППМ АФАР включает в себя передающий канал в составе фазовращателя и усилителя мощности, приемный канал в составе малошумящего усилителя (МШУ), фазовращателя, аттенюатора, а также переключатель, обеспечивающий работу приемного и передающего каналов ППМ на общий элемент антенного полотна.

Дополнительно в его состав могут входить устройства вторичного электропитания, управления, защиты от синхронной и несинхронной помехи, схемы контроля режима работы ППМ и др.

Существует весьма широкий выбор электронных компонентов зарубежного производства, в частности компании Hittite Microwave, для конструирования АФАР в самых популярных диапазонах частот: L — 1-2 ГГц, S — 2-4 ГГц, X — 8-12 ГГц [2].

Для реализации некоторых режимов работы АФАР малошумящие усилители на входе приемного канала необходимо отключать, при этом время включения — выключения должно составлять менее 100 нс, что не позволяет использовать простое выключение напряжения питания МШУ вследствие длительности возникающих переходных процессов.

В этих случаях необходимо использовать МШУ с выключателем.

В настоящей работе представлены результаты разработки модуля СВЧ, включающего в свой состав МИС дискретно-управляемого переключателя, драйвера управления и МШУ.

Дискретно-управляемый переключатель типа SP2T (однополюсный переключатель на два канала) с управлением параллельным кодом обеспечивает в зависимости от управляющих напряжений коммутацию СВЧ сигнала в один из двух возможных каналов. С целью обеспечения совместимости управления переключением с контроллерами управления, традиционно реализованными по кремниевой технологии на основе КМОП или ТТЛ логики, в состав модуля включен драйвер управления, обеспечивающий преобразование входного положительного напряжения 0/+5 В в два выходных управляющих напряжения, используемых переключателем.

Базовым активным элементом разработанных СВЧ МИС является полевой транзистор с барьером Шоттки, изготовленный по технологии GaAs pHEMT 0,25 мкм [3]. Переключатель реализован на ключевых транзисторах: в цепи «вход-выход» использованы транзисторы с шириной затвора 600 и 300 мкм, что является компромиссом в части достижения минимальных потерь и широкополосного согласования переключателя. Использование дополнительных каскадов транзисторов с шириной затвора 150 мкм в цепи «вход (выход)-земля» позволяет дополнительно улучшить развязку между каналами, при этом отключенный выход нагружается на сопротивление 50 Ом для обеспечения приемлемых значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН).

Типовые напряжения отсечки транзисторов pHEMT в составе переключателя составляют $(-1,6 \div -1,2)$ В, при этом достигается компромиссное соотношение между начальным током стока транзистора, а соответственно, сопротивлением открытого канала транзистора, и величиной пробивных напряжений затвор-сток и затвор-исток. Фактически выбор конструкции ключевого транзистора обеспечивает минимальные резистивные потери на проход СВЧ сигнала в области сток-исток транзистора и достаточное напряжение пробоя для гарантированного безопасного переключения выходными управляющими напряжениями драйвера. Рабочая полоса СВЧ-переключателя составляет 0,01-20 ГГц.

В состав драйвера управления входят ключевые транзисторы с шириной затвора 20 мкм, на базе которых реализуются инверторы, обеспечивающие формирование прямого и инверсного напряжений, а также транзисторы с шириной затвора 10 мкм в диодном включении, схемотехнически формирующие цепи сдвига уровня выходных напряжений инвертора. Величина уровней выходных напряжений драйвера существенным образом зависит от напряжений отсечки транзисторов, используемых в его составе. Напряжение отсечки $(-0,8 \pm 0,1)$ В является оптимальным с точки зрения получения минимального разброса величины выходных напряжений по двум каналам управления. Однако технологический разброс не позволяет обеспечить требуемую точность в достижении параметров транзистора и реальное напряжение отсечки

изменяется в более широких пределах — $(-1,2 \div -0,6)$ В. В результате драйвер управления преобразует входное напряжение уровня ТТЛ ($0/+5$) В в пару выходных напряжений двух уровней: «нуля» $(-0,2 \div +0,4)$ В и «единицы» $(-1,6 \div -3)$ В. Формируемые уровни выходных напряжений драйвера являются достаточными для управления режимами работы транзисторов переключателя. Драйвер использует двуполярное питание $+5$ и -5 В. Токи потребления по каждому из источников питания не превышают 2-3 мА и схемотехнически зависят от величины тока, обеспечиваемого стабилизаторами тока (транзистор с соединенными затвором и истоком, ширина затвора 8 мкм), используемыми в цепях питания. Аналогичный подход реализован и в схемотехнике входной цепи управления. Поскольку используемые транзисторы являются нормально открытыми и требуют для управления (закрытия) отрицательного смещения, на затворе во входной цепи используется диодная цепочка для сдвига положительного ($+5$ В) напряжения управления. Резисторы, входящие в состав драйвера, выполняют несколько функций: во-первых, используемая система резисторов предназначена для обеспечения требуемого уровня выходных напряжений драйвера и токов потребления по цепям питания и во входной цепи управления; во-вторых, схемотехника с использованием резисторов позволяет в некоторой степени минимизировать влияние технологического разброса параметров активных элементов на параметры драйвера; в-третьих, наличие резисторов в цепях питания и управления обеспечивает ограничение тока в случае превышения напряжения питания (управления), что защищает от выгорания диодные элементы вследствие превышения предельно-допустимого тока через эти элементы.

МШУ выполнен по двухкаскадной схеме на транзисторах с шириной затвора 600 мкм и с последовательным однополярным питанием $+6$ В. Рабочая полоса МШУ составляет 1,0-4,0 ГГц. С целью улучшения характеристик в нижней части рабочего диапазона, в первую очередь КСВН входа, в состав конструкции транзистора входного каскада включены две емкости металл-окисел-металл номиналом порядка 0,2 пФ, включенные параллельно внутренней емкости сток-исток транзистора, что в некоторой степени имитирует величину емкости сток-исток транзистора с большей шириной затвора и упрощает согласование на минимум КСВН входа на частоте 1,0 ГГц.

Описанные выше кристаллы переключателя, драйвера управления и малошумящего усилителя смонтированы в металлокерамическую ножку. Внешний вид модуля (без крышки) представлен на рис.1. Конструкция ножки позволяет использовать для поверхностного монтажа. Разработанный модуль может быть использован в составе ППМ для коммутации приемного канала в режим приема (подключение МШУ ко входу антенны) или передачи (переключение входа МШУ от антенны на нагрузку 50 Ом) и тем самым защиты чувствительного входа МШУ от воздействия сигнала высокого уровня во время работы ППМ на передачу. Динамический диапазон переключения не менее 50 дБ.

На рис.2-6 представлены измеренные характеристики, полученные на экспериментальных образцах.

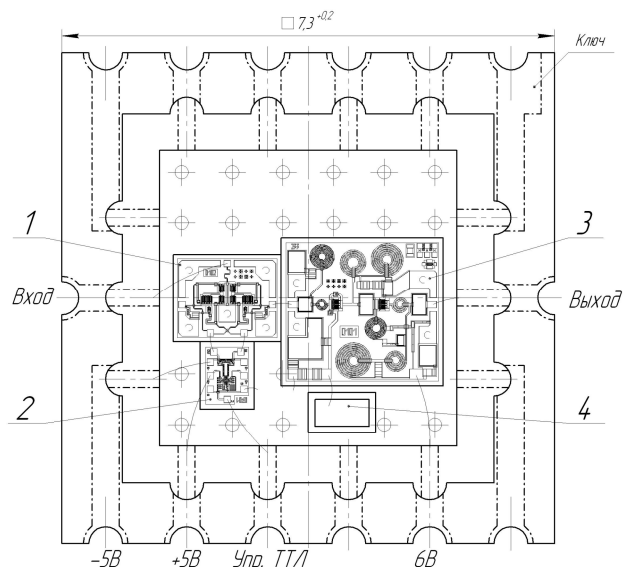


Рис.1. Внешний вид модуля СВЧ (без крышки): 1 — СВЧ-переключатель, 2 — драйвер управления, 3 — малошумящий усилитель, 4 — конденсатор (чип)

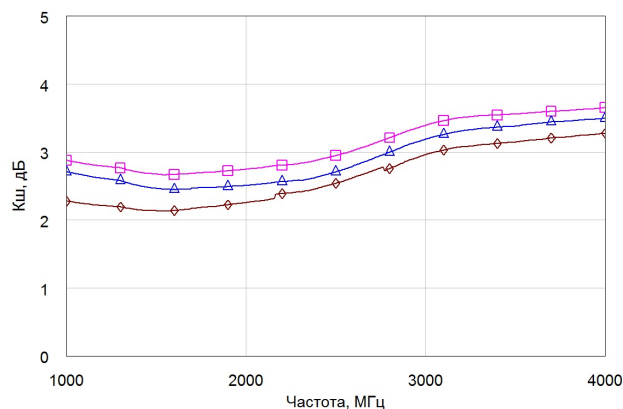


Рис.2. Зависимость коэффициента шума Кш модуля от частоты при включенном МШУ

Коэффициент шума модуля (рис.2) представляет собой сумму прямых потерь в переключателе и коэффициента шума МШУ (измеренные по отдельности в тракте с волновым сопротивлением 50 Ом). При этом характер зависимости в частотной полосе в значительной степени определяется именно коэффициентом шума МШУ, в то время как переключатель вносит суммарную добавку на уровне 0,7-1,2 дБ в зависимости от конкретного образца.

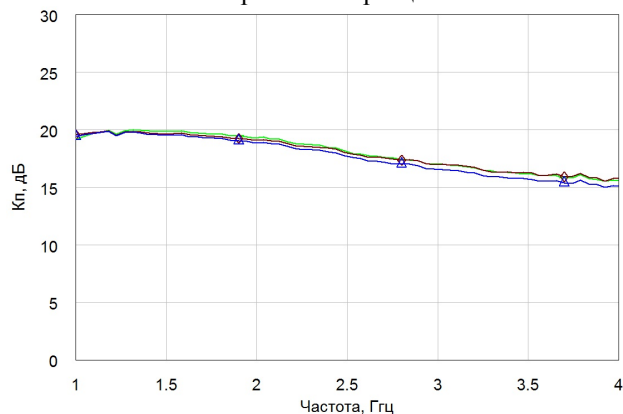


Рис.3. Зависимость коэффициента передачи Кп модуля от частоты при включенном МШУ

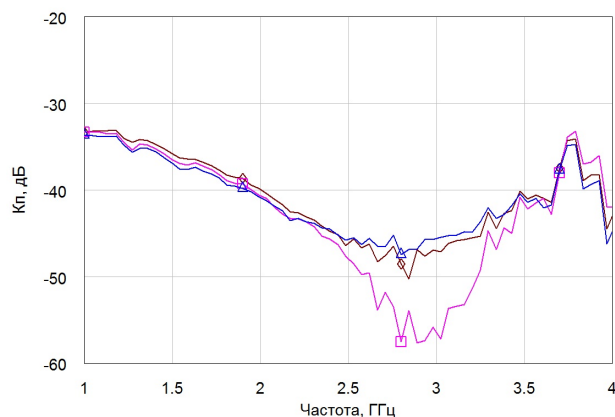


Рис.4. Зависимость коэффициента передачи K_p модуля от частоты при выключенном МШУ

Коэффициент передачи модуля K_p при выключенном МШУ (рис.4) определяется суммой коэффициента передачи МШУ (рис.3) и развязки между каналами переключателя, поскольку в таком режиме работы фактически происходит усиление сигнала прошедшего со входа переключателя на выход его закрытого канала.

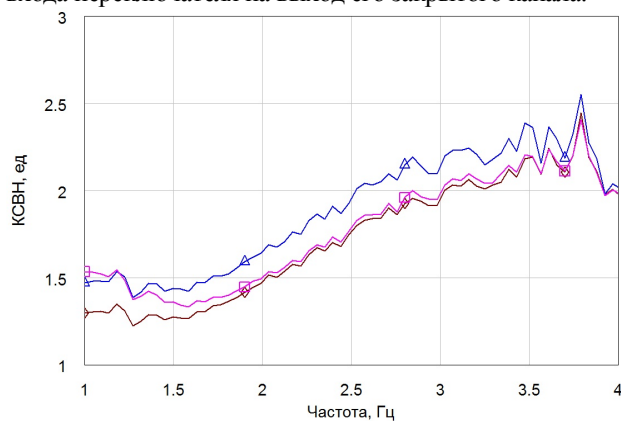


Рис.5. Зависимость КСВН входа модуля от частоты при включенном МШУ

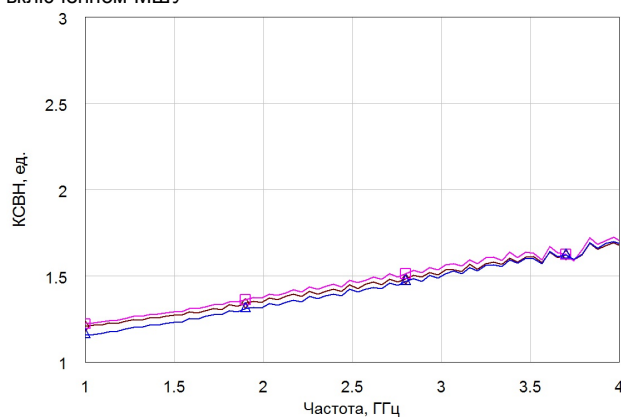


Рис.6. Зависимость КСВН входа модуля от частоты при выключенном МШУ

КСВН входа модуля при включенном МШУ (рис.5) не превышает 2,5 в полосе частот 1,0-4,0 ГГц, однако значение не более 2,0 наблюдается в полосе частот 1,0-2,5 ГГц. КСВН входа модуля при выключенном МШУ (рис.6) представляет собой КСВН переключателя, нагруженного по выходу на тонкопленочный резистор с номиналом сопротивления 50 Ом. По результатам измерений, представленным на рис.2-6, видно, что наилучшие характеристики модули демонстрируют в полосе частот 1,0-2,5 ГГц, которую следует считать предпочтительной для их использования.

Полученные параметры и характеристики модулей, разработанных на основе МИС, изготовленных по GaAs pHEMT 0,25 мкм технологии, а также их натурные испытания в рабочих режимах свидетельствуют о возможности использования модулей для создания элементов ППМ АФАР.

Все элементы разработанного модуля (кристаллы отдельных МИС и металлокерамическая ножка) изготовлены на отечественном предприятии и соответственно могут быть использованы разработчиками для решения вопросов с импортозамещением зарубежных комплектующих.

1. Викулов И. Монолитные интегральные схемы СВЧ. Технологическая основа АФАР // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. №7. С.60-73.
2. Павлов С., Филиппов А. Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей // Компоненты и технологии. 2014. №7. С.57-62.
3. Козловский Э.Ю., Осипов А.М., Селезнев Б.И. СВЧ МИС МШУ на основе наногетероструктур GaAs pHEMT // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2013. №1, 2. С.134-137.

References

1. Vikulov I. Monolitnye integral'nye skhemy SVCh. Tekhnologicheskaya osnova AFAR [Monolithic microwave ICs. The technology basis of AESA] Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes – Electronics: Science, Technology, Business, 2012, no. 7, pp. 60-73.
2. Pavlov S., Filippov A. Antennnye fazirovannye reshetki. Obzor komponentnoi bazy dlia realizatsii priemoperedaiushchikh modulei [Phased array antennas. The review of the component basis for implementation of transmit-receive modules]. Komponenty i tekhnologii – Components & Technologies, 2014, no. 7, pp. 57-62.
3. Kozlovskii E.Iu., Osipov A.M., Seleznev B.I. SVCh MIS MShU na osnove nanogeterostruktur GaAs pHEMT [MMIC based on nanoheterostructures of GaAs pHEMT]. Sistemy i sredstva svyazi, televideniia i radioveshchaniia, 2013, no. 1, 2, pp. 134-137.