

Применение кремний-германиевой технологии для создания активных СВЧ-блоков АФАР

В.П. Тимошенко¹, А.Г. Ефимов²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²Филиал ДООО «Ижевский радиозавод» (г. Москва)

Application of Silicon-Germanium Technology for Creation of Active Microwave-Units

V. Timoshenkov, A. Efimov

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Рассмотрена возможность использования новых технологий для реализации активных СВЧ-блоков приемно-передающих модулей. Дан сравнительный анализ технологических процессов для реализации управляющих устройств. Проведена оценка возможных достижимых параметров универсального управляющего кристалла X-диапазона, реализованного по кремний-германиевой технологии.

Ключевые слова: приемно-передающий модуль; активные фазированные антенные решетки; гетеробиполярный транзистор; фазовращатель, аттенуатор.

The possibility of using the new SiGe technology for realization of active microwave-units of receiving-transmitting modules has been considered. A comparison analysis of the technological processes for realization of the control devices has been presented. The estimation of possible attainable parameters of the X – band core chip realized according to SiGe technology has been made.

Keywords: Modul PhAR; active PhAR HBT; phase rotator; attenuator.

Введение. В современных системах спутниковой связи и радиолокации используются активные фазированные антенные решетки (АФАР), выполненные по модульному принципу для снижения массогабаритных характеристик и возможности выполнения сложных тактико-технических системных требований. В этой связи актуальной становится задача повышения интеграции и многофункциональности узлов АФАР.

В настоящей работе рассмотрены варианты выбора активных СВЧ-компонентов на примере приемно-передающего модуля (ППМ) АФАР X-диапазона.

Структура приемно-передающего модуля. Типовая схема ППМ приведена на рис.1. Устройство состоит из канала передачи и канала приема. Для управления амплитудой в приемном и передающем каналах используются аттенуаторы (АТТ), а для управления фазой – 6-разрядные фазовращатели (ФВ). Перевод последовательного кода управления в параллельный код осуществляется с помощью 8-разрядного преобразователя кодов (ПК).

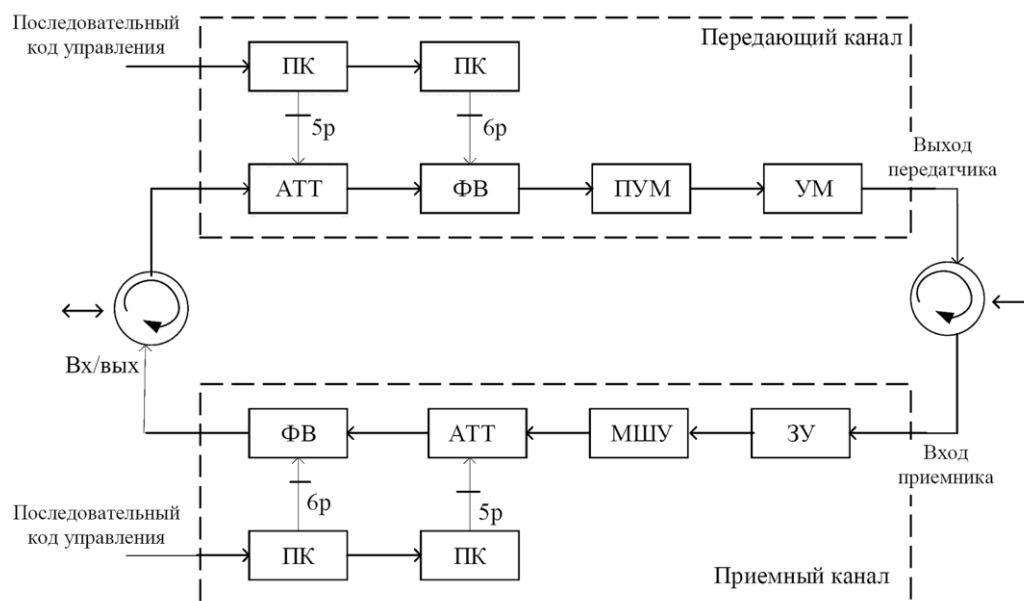


Рис.1. Типовая схема приемо-передающего модуля АФАР

Усилитель мощности (УМ) определяет уровень выходной мощности на выходе модуля в режиме передачи. Для компенсации потерь в управляющих устройствах и обеспечения требуемого уровня входной мощности для УМ используется предварительный усилитель мощности (ПУМ). Чувствительность приемного тракта АФАР определяется параметрами малошумящего усилителя (МШУ) с учетом потерь в защитном устройстве (ЗУ), которое ограничивает уровень мощности на входе МШУ.

Необходимость ЗУ на входе приемного тракта определяется назначением системы. Так, при отсутствии мощного отраженного сигнала и развязки выходного циркулятора более 30 дБ ЗУ может не применяться. В остальных случаях для защиты МШУ от перегрузки по входу желательна установка такого устройства. Уровень просачиваемой мощности на выходе ЗУ (при входной мощности более 5 Вт) не превышает 100 мВт при потерях в штатном режиме не более 0,5–1,0 дБ.

Выбор схемы МШУ определяется требованиями по коэффициенту шума и динамическому диапазону входного сигнала. Так, арсенид-галлиевые усилители в монолитном исполнении, построенные по схеме с автосмещением, обеспечивают коэффициент шума 1,5–2,0 дБ и гарантированно выдерживают непрерывную входную мощность 10 мВт или не менее 100 мВт в импульсном режиме. Традиционная схема с двумя питаниями на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (РНЕМТ) позволяет получать коэффициент шума порядка 1,0 дБ, но менее устойчива к перегрузкам по входу, что требует установки защитного устройства.

Современные арсенид-галлиевые усилители обеспечивают импульсную выходную мощность 10–12 Вт с кристалла при напряжении питания 8–9 В. Данные параметры реализуются при длительности импульса не более 100 мкс и скважности не менее 5, что определяет тепловой режим активной зоны транзистора. Увеличение выходной мощности достигается суммированием мощности нескольких кристаллов.

Существуют УМ с уровнем выходной мощности до 50 Вт, выполненные на нитриде галлия (GaN). КПД таких устройств превышает КПД арсенид-галлиевых усилителей, а напряжение питания составляет не менее 24 В. Следует отметить низкую технологичность изготовления кристаллов на основе GaN и высокую стоимость исходных структур.

Управляющие устройства, как правило, реализуются на арсениде галлия в монолитном исполнении с полевым транзистором в пассивном включении в качестве переключающего элемента, что позволяет минимизировать потребление по цепям управления. Начальные потери аттенюатора и фазовращателя могут достигать 8 дБ и компенсируются промежуточными усилителями. Это позволяет выполнять управляющие устройства в широком частотном диапазоне 8–12 ГГц. Необходимо учитывать, что типовое время переключения одиночного разряда фазовращателя или аттенюатора составляет 50 нс, а длительность кодовой посылки не менее 550 нс. Для получения более высокого быстродействия необходимо осуществлять управление в параллельном коде.

Структура универсального управляющего кристалла. Учитывая поочередную работу ППМ в приемном или передающем режимах, возможно управлять амплитудой и фазой с помощью универсального управляющего кристалла (УУК), вариант блок-схемы которого приведен на рис.2. В состав кристалла входят компенсирующие усилители и переключатели прием-передача.

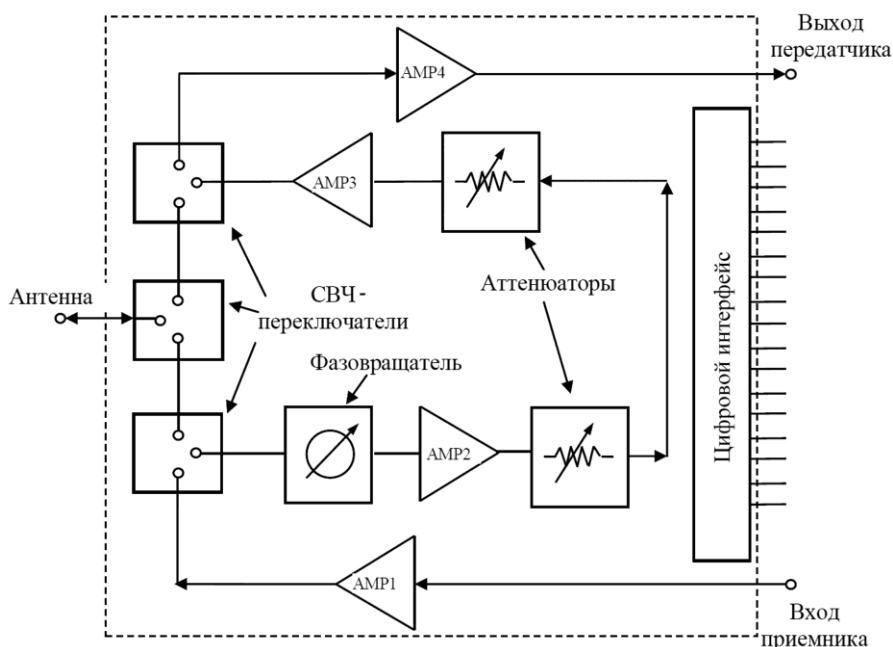


Рис.2. Блок-схема универсального управляющего кристалла

Компанией ЗАО НПФ «Микран» (г. Томск) разработан ППМ АФАР X-диапазона [1–3]. Он содержит набор основных арсенид-галлиевых микросхем, выполненных по технологии с длиной затвора $L_3 = 0,5$ мкм и собранных в едином конструктивном оформлении. На СВЧ-подложке смонтированы СВЧ-коммутатор, малошумящий усилитель, усилитель мощности, модулятор, а также блоки управления и блоки обеспечения номинальных режимов работы перечисленными устройствами. Параметры блоков ППМ:

Выходная мощность	10–15 Вт
Коэффициент шума приемника, не более.....	4,5 дБ
Диапазон регулировки фазы	0–360 град.
Точность установки фазы.....	8 град.
Диапазон регулировки амплитуды.....	23,5 дБ
Длительность зондирующего импульса	1–100 мкс
Сквозность, не менее	5

ППМ АФАР X-диапазона для бортовых РЛС компании НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (г. Саратов) [4] изготовлен на базе экранированных копланарных линий передачи, расположенных в теле корпуса модуля. Приемно-передающая часть каждого СВЧ-канала выполнена в виде отдельной микросборки на керамической подложке ТММ-10, напаянной на медное основание. Габариты микросборки 14×45×5,5 мм, масса 7 г.

В работах [5, 6] рассмотрен приемный модуль АФАР X-диапазона, выполненный на основе низкотемпературной керамики (LTCC). Структурная схема модуля включает схему диодного ограничителя, МШУ, 6-разрядного фазовращателя, 5-разрядного аттенюатора, схему цифрового интерфейса. Электрические характеристики модуля на основе LTCC-керамики следующие:

Коэффициент передачи приемника.....	10 дБ
Неравномерность коэффициента передачи.....	1 дБ
Коэффициент шума приемника, не более	2 дБ
Диапазон регулировки фазы	0–360 град.
Точность установки фазы	5,6 град.

В результате системного анализа блоков приемно-передающих трактов модуля АФАР выработаны следующие требования:

- выходная линейная мощность усилителя универсального управляющего устройства может составлять 13 дБм, что соответствует 1 В выходного сигнала;
- мощность выходного усилителя мощности более 42 дБм налагает ограничения на выбор элементной базы. Наиболее вероятно использование GaN. Ограничения связаны с большой пиковой амплитудой выходного сигнала, а также со значительной рассеиваемой мощностью в рамках модуля ~45 Вт;
- применение МШУ с коэффициентом шума 1,8 дБ позволяет обеспечить интегральный коэффициент шума системы не более 3,3 дБ при условии, что входной циркулятор или переключатель прием-передача имеют суммарные потери 1 дБ.

Разработка универсального управляющего кристалла на основе кремний-германиевой технологии. Цель настоящей работы – исследование возможностей по проектированию УУК с использованием SiGe-БиКМОП-технологии. Требуемые значения параметров УУК в диапазоне температур от –40 до +85 °С:

Диапазон рабочих частот	9–11 ГГц
Коэффициент усиления на прием, не менее.....	10 дБ
Коэффициент усиления на передачу, не менее.....	20 дБ
Фазовый сдвиг.....	0–360 град.
Дискрет фазы.....	11,25 град.
Диапазон ослабления.....	0–25 дБ
Шаг ослабления	1,0 дБ
Выходная мощность в режиме передачи.....	50 мВт
Линейная выходная мощность в режиме приема	10 мВт
Коэффициент шума	10 дБ
Время переключения	20 нс
Мощность потребления, не более	3 Вт
Номиналы питания	–5 В; +5 В

Кристалл должен включать в себя следующие блоки: аттенюатор, фазовращатель, переключатели прием-передача, компенсирующие усилители, схему управления с параллельным интерфейсом с ТТЛ-уровнями. Учитывая высокую верхнюю граничную частоту гетеробиполярных транзисторов (ГБТ), проектирование кристалла целесообразно выполнить в рамках SiGe-БиКМОП-технологии [7, 8]. В качестве схемотехнической базы для высокочастотных блоков обработки сигнала данных выбраны дифферен-

циальные переключатели тока со стабилизированным опорным напряжением, для низкочастотных управляющих блоков – КМОП логические вентили.

При таком подходе реализация переключателей и усилителей с требуемыми параметрами на частотах до 11 ГГц не представляет технических трудностей, за исключением выходных драйверов, которые имеют принципиальные ограничения по амплитуде сигнала. Наиболее критичными можно считать два блока: фазовращатель и аттенюатор.

Существует несколько вариантов SiGe-технологии, пригодных для разработки УУК. Краткая характеристика доступных технологических процессов, аттестованных для коммерческого применения, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Параметры активных компонентов для кремний-германиевых технологических процессов

Параметр	Фабрика				
	IBM		Tower/Jazz		
	Код процесса				
	7HP	8HP	sbc18hx	sbc18h2	sbc18h3
Высокочастотные ГБТ					
Верхняя граничная частота f_T , ГГц	120	210	150	200	240
Максимальная частота при передаче мощности f_{max} , ГГц	100	185	190	200	280
Напряжение пробоя V_{CEO} , В	2,0	1,8	2,2	2,0	1,63
Коэффициент усиления β_{min}	25	100	60	80	400
Высоковольтные ГБТ					
Верхняя граничная частота f_T , ГГц	20	57	78/38	78/38	48/62
Максимальная частота при передаче мощности f_{max} , ГГц	–	–	284/183	284/183	117
Напряжение пробоя V_{CEO} , В	4,7	3,6	3,5/6,0	3,5/6,0	3,3
Коэффициент усиления β_{min}	25	94	60	60	400
МОП-транзисторы (<i>n</i> -МОП и <i>p</i> -МОП)					
Длина затвора L_G , мкм	0,18	0,12	0,18	0,18/0,12	0,18/0,12
Другие компоненты					
Резисторы, Ом/□	8,1; 72; 260; 1600	8,8; 58; 340; 1700	5,5; 21; 205; 1000	6; 24; 235; 890	6; 24; 235; 890
Емкость МДМ, фФ/мкм ²	1	1	1	2	2
Емкость МОП, фФ/мкм ²	2,5	11,3	8	–	–
Индуктивность	Spiral/Line	Spiral/Line	Spiral	Spiral	Spiral
Варакторы	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Диод Шоттки	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Металлизация					
Типы металлов	Cu / Al	Cu / Al	Al	Al	Al
Количество слоев	7	7	6	6	6

Из приведенных данных видно, что технологический процесс sbc18hx наиболее полно удовлетворяет требованиям по разработке УУК.

Для демонстрации возможностей технологии проведен анализ 4-разрядного фазовращателя с ГБТ в качестве активных компонентов. Предложенная схема устройства приведена на рис. 3.

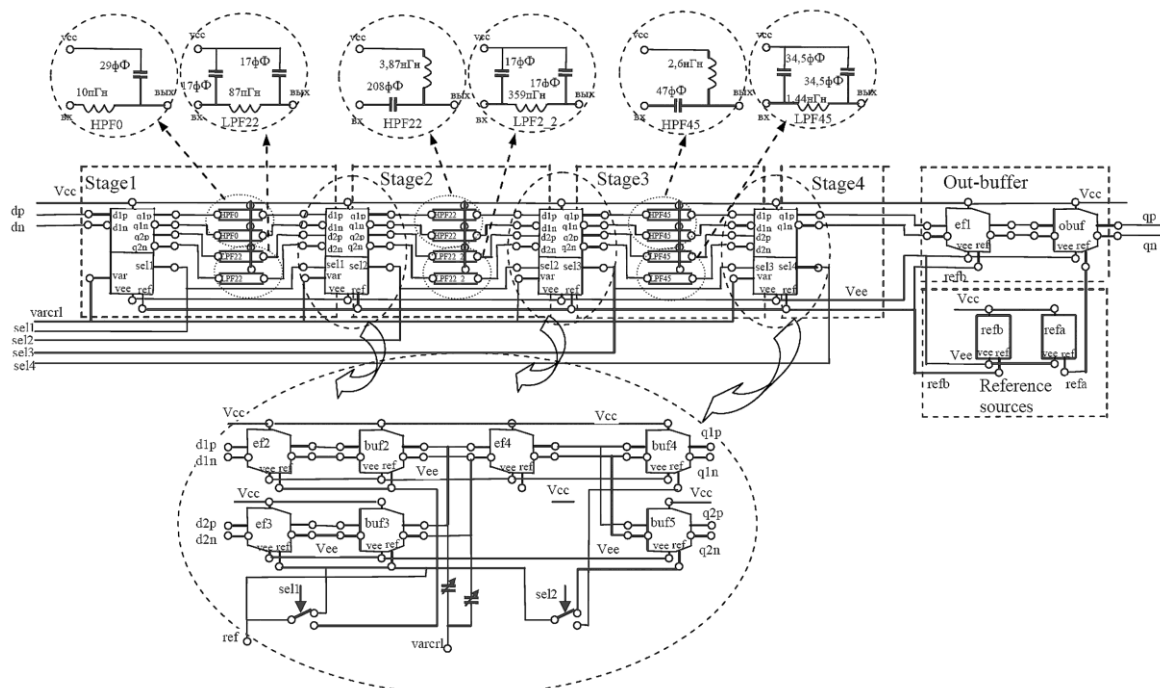


Рис. 3. Схема фазовращателя

Блок содержит три ступени SPDT (SPDT – Single Pole, Double Throw) усилительных ключей (Stage 1, 2, 3) с LC-фильтрами, обеспечивающими относительный сдвиг фазы от 0 до 180° с шагом 22,25°. Четвертая ступень (Stage4) представляет собой переключаемый инвертор. Последующий выходной усилитель состоит из предварительного усилителя и выходного драйвера (Out buffer), каждый из которых содержит линейные дифференциальные каскады.

В опорной системе блока использованы стабилизированные источники опорного напряжения и специальные КМОП-ключи.

SPDT-ключ – двухкаскадный линейный усилитель с потребляемым током 15,4 мА, второй каскад которого выполняет функцию аналогового демультиплексора 1:2. Один из выходов мультиплексора активируется цифровым сигналом sel2, который переключает опорные напряжения при помощи КМОП-ключа sw2rfb25m_2v5. Принципиальной особенностью данной схемы является возможность плавной подстройки фазы в пределах 2° путем изменения аналогового напряжения (varctrl) на варакторах.

К выходам первого усилительного ключа подключены две пары фазосдвигающих фильтров. В схеме на рис.3 ячейки HPF0 представляют собой эквивалентные схемы линии передачи, ячейки LPF22 являются LC-фильтрами нижних частот.

Второй и третий усилительные ключи (selector2to2_14m3) идентичны, потребляют ток 14,3 мА и выполняют функцию переключателей 2-в-2. Как и первый ключ, эти ключи имеют плавную подстройку фазы путем изменения напряжения varctrl.

Входы второго ключа подключены к выходам двух каналов первого ключа, а его выходы нагружены на пары фильтров HPF22 и LPF2_2. Аналогично входы третьего ключа подключены к выходам двух каналов второго ключа, а его выходы нагружены на пары фильтров HPF45 и LPF45.

Четвертый усилительный ключ (selector2to1_14m3) потребляет 14,3 мА тока и выполняет функцию аналогового мультиплексора 2:1 с активируемой или отключаемой инверсией выходного сигнала.

Разработанный фазовращатель моделировался с использованием системы Cadence в различных условиях работы в диапазоне частот 9,1–10,3 ГГц. Абсолютные и относительные сдвиги фаз в трех первых ступенях фазовращателя на частоте 10 ГГц и при двух предельных температурах 0 и +125 °С приведены в табл.2.

Таблица 2

Сдвиги фаз в усилительных ключах, град.

Путь прохождения сигнала	Ключ 1		Ключ 2		Ключ 3	
	0°С	125°С	0°С	125°С	0°С	125°С
Верхний (HPF)	-40,8	-48,9	-15,5	-24,2	5,4	-4,0
Нижний (LPF)	-63,2	-71,3	-59,3	-67,8	-85,5	-94,2
Разностный	22,4	22,4	43,8	43,6	90,9	90,2

Приведенные данные демонстрируют приемлемую стабильность работы всех ступеней. Дополнительную подстройку фаз можно осуществлять с помощью контрольного напряжения varctrl, которое обеспечивает дополнительный диапазон регулировки около 8°.

Относительный сдвиг фаз по ступеням при 125°С в диапазоне частот 10,0–10,3 ГГц приведен на рис.4. Получена точность установки фазы не хуже ±0,7°.

Фазовращатель без четвертой ступени и выходного усилителя обеспечивает коэффициент передачи около 1,5 дБ при 125°С (рис.5).

Выходной каскад в данной схеме обеспечивает дифференциальную линейную мощность 1 дБм. При этом четыре ступени фазовращателя потребляют ток около 58 мА, а полная схема – около 123 мА. Возможно увеличение выходной мощности в 2 раза (до +4 дБм) за счет увеличения потребляемого тока.

Фазовращатель является наиболее значительным по площади блоком УУК. Основную площадь в топологии фазовращателя занимают катушки индуктивности, конденсаторы и варакторы. Ориентировочная площадь блока составляет 1,0 x 1,0 мм.

Основной задачей проектирования управляемого аттенюатора является сохранение линейности входного буфера при существенно различных амплитудах входного сигнала.

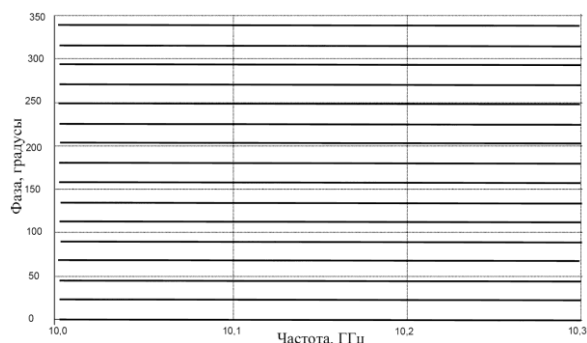


Рис. 4. Относительный сдвиг фаз по ступеням

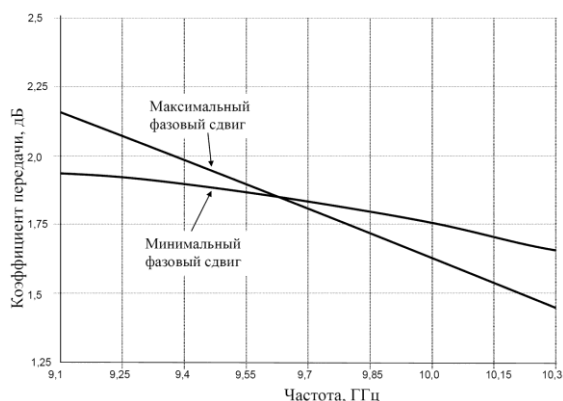


Рис. 5. Коэффициент передачи фазовращателя

ла. Для этого необходимо осуществлять ослабление сигнала до подачи его на первый усилительный каскад. Эта задача решается путем использования резистивной лестницы R-2R. Комбинируя сигналы, можно получить суммарный сигнал с коэффициентом передачи от +5,5 до –18 дБ, что соответствует диапазону регулировки 0–24 дБ.

Разработанный аттенюатор моделировался с использованием системы Cadence в различных условиях работы в диапазоне частот 0–12 ГГц. Спад коэффициента передачи на 3 дБ наступает на частоте 11,8 ГГц при токе потребления около 35 мА.

Полученный дифференциальный выходной сигнал для случая постоянной амплитуды входного сигнала на частоте 10 ГГц приведен на рис.6.

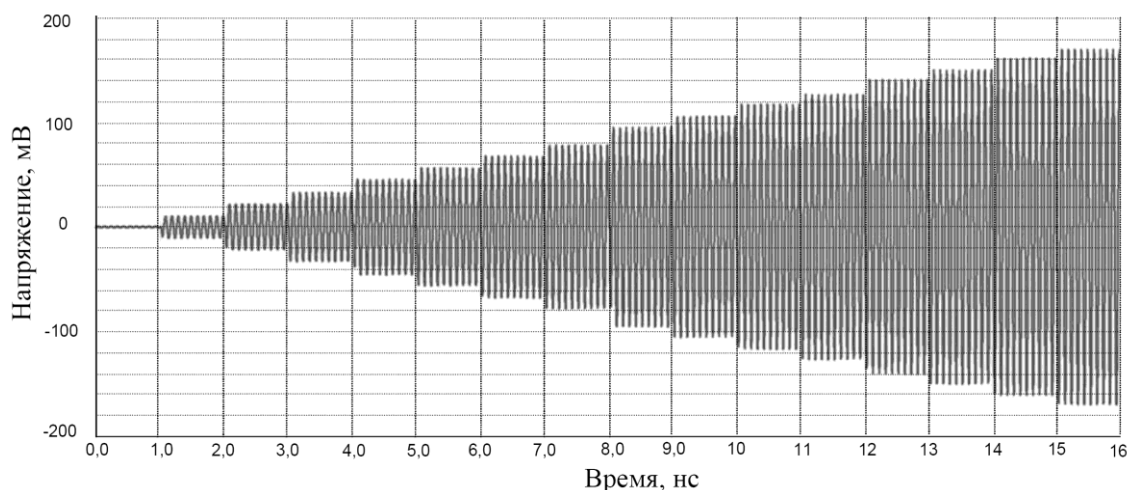


Рис.6. Выходной сигнал аттенюатора

Линейность аттенюатора определялась по величине ослабления второй и третьей гармоник по отношению к величине сигнала на основной частоте при трех значениях амплитуды входного сигнала. Результаты расчетов приведены в табл.3.

Таблица 3

Линейность аттенюатора

Входная амплитуда, мВ	2-я гармоника, дБс	3-я гармоника, дБс
50	–61	–71
100	–55	–59
200	–50	–45

Заключение. Проведенный анализ позволяет говорить о возможности реализации универсального управляющего кристалла для управления амплитудой и фазой СВЧ-сигнала на основе кремний-германиевой технологии. При этом уровень линейной выходной мощности для усилителей, изготовленных по данной технологии, не превышает +5 дБм.

Использование элементной базы, изготовленной по различным технологиям, позволяет реализовать ППМ с оптимальными характеристиками для любой радиолокационной системы.

Литература

1. Приемно-передающие модули АФАР. Сайт компании Микран. – URL: <http://oldmicran.tomnet.ru/productions/svch/aesa/> (дата обращения: 28.01.2016).

2. **Баров А.А.** GaAs СВЧ монолитные интегральные схемы для ППМ АФАР. – URL: http://www.micran.ru/sites/micran_ru/data/UserFile/File/Media/Barov_present.pdf (дата обращения: 28.01.2016).
3. Приемно-передающие модули мм-диапазона для датчиков и систем ближней радиолокации / **Е.А.Монастырев, П.Е.Денисов, С.Л.Кеврух и др.** // Материалы IX науч.-техн. конф. «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА» (1–3 декабря 2010 г., Звенигород). – 2010. – С. 110–113.
4. **Семёнов Э.А., Бутерин А.В., Иванов А.В., Езопов А.В.** Групповой приемно-передающий модуль АФАР X-диапазона для бортовых РЛС НПЦ «Алмаз-Фазотрон» // Материалы IX науч.-техн. конф. «Твердотельная электроника. сложные функциональные блоки РЭА» (1–3 декабря 2010 г., Звенигород). – 2010. –
5. **Monastyrev E.A., Kevruh S.L., Moloshnikov V.A.** LTCC based planar modules for X-band aesa microwave and telecommunication technology (CriMiCo) // 21th International Crimean Conference (12–16 Sept. 2011, Sevastopol). –2011. – P. 195–197.
6. **White D.** GaN and GaAs MMIC and module technology supporting the needs of phased array radars // European Microwave Week. Defense and Security Forum (Oct.12, 2011). – 2011. – URL: <http://www.microwavejournal.com/ext/resources/pdf-downloads/defsec-tqs.pdf> (дата обращения 19.05.2016).
7. **Тимошенко В.П.** Состояние и перспективы развития технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ-применений // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – № 5. – С. 16–19.
8. **Тимошенко В.П.** Сверхширокополосный трансивер гигагерцового диапазона на SiGe-транзисторах // Изв. вузов. Электроника. – 2010. – № 3(83). – С. 20–26.

Статья поступила
29 января 2016 г.

Тимошенко Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование СВЧ интегральных ИМС, телекоммуникация, СВЧ-радиосвязь. **E-mail: valeri04@hotmail.com**

Ефимов Андрей Геннадиевич – доктор технических наук, начальник отдела филиала ДООО «Ижевский радиозавод» (г. Москва). *Область научных интересов:* проектирование СВЧ интегральных ИМС, телекоммуникация, СВЧ-радиосвязь.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2015 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru>