

Разработка монолитной интегральной схемы приемника с фазовращателем в цепи гетеродина

И.И. Мухин¹, М.С. Бычков², В.В. Репин²

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», igor_muhin@mail.ru

²ФГУП «НИИМА «Прогресс»

Аннотация — В статье приводятся данные о разработанной SiGe МИС преобразователя частоты X-диапазона с фазовращателем в цепи гетеродина, как части приемо-передающего тракта АФАР. Разработанная МИС имеет 24 вывода, рассеиваемую мощность 0,51 Вт и линейность по входу +7 дБм. Приведены результаты моделирования, измерения и сравнительной оценки с зарубежными аналогами.

Ключевые слова — супергетеродинный приемник, дискретный фазовращатель, активная фазированная антенная решетка, смеситель, СВЧ полупроводниковая интегральная схема.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более широкое распространение в радиолокации, навигации и связи получают активные фазированные антенные решетки (АФАР). Они позволяют осуществлять быстрый обзор пространства, предварительную обработку сверхвысокочастотных сигналов и т.д.

На рисунке 1 представлен принцип работы антенны с одномерным сканированием. Антенная решетка состоит из идентичных элементов, расположенных на одинаковом расстоянии (d) друг от друга. Если фронт принимаемой волны расположен под углом θ к плоскости решетки, то сигнал будет получен каждой антенной в различное время, что связано с разницей в расстояниях, пройденных сигналом.

Чтобы получить максимальную мощность на выходе, а также выделить полезную составляющую сигнала на фоне шумов, необходимо сложить сигналы от каждого элемента антенны в фазе. Для этого требуется компенсировать разницу в пути, которую проходит сигнал до разных элементов антенны с помощью элемента задержки, расположенного в каждом приемо-передающем модуле антенны.

При работе в узкой полосе частот в качестве элемента задержки используются фазовращатели (ФВ). Реализация ФВ на базе интегральной технологии является особенно привлекательной за счет увеличения надежности, снижения габаритов и стоимости тракта.

Широкое распространение получила структура, в которой применяются проходные ФВ, расположенные в блоке первичной обработки сигнала (цепи ВЧ сигнала). Такое расположение является наиболее выгодным с точки зрения конструктивной реализации, при этом накладывает ряд значительных ограничений на параметры динамического диапазона ФВ, также при работе на высоких частотах существенно затрудняется реализация схемы с хорошими точностными параметрами фазы и амплитуды.

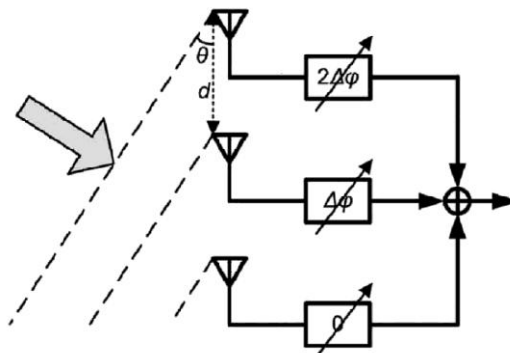


Рис. 1. Принцип работы АФАР

Существует несколько способов построения проходных ФВ в рамках SiGe БиКМОП технологии [1], наиболее перспективными с точки зрения частотного диапазона и получаемой точности установки амплитуды и фазы выглядят векторные ФВ. Однако помимо перечисленных достоинств они обладают очень существенным недостатком: высоким коэффициентом шума (10дБ) и относительно низкой линейностью (-10дБм), т.е. низким динамическим диапазоном. Последнее обстоятельство затрудняет их применение в приемных трактах АФАР, где требование к входной точке компрессии начинается от 0дБм.

Одним из способов, позволяющих снизить требования к характеристикам ФВ, является использование архитектуры приемника, в которой ФВ располагается в канале гетеродина преобразователя частоты [2].

Требования к ФВ в канале гетеродина существенно отличаются от требований к проходным ФВ. Нет необходимости работать с большими сигналами, поскольку требуемая для работы смесителя амплитуда гетеродина получается применением после ФВ усилителя-ограничителя. Другая особенность в том, что в предлагаемой архитектуре собственные шумы ФВ не оказывают существенного влияния на результирующий коэффициент шума смесителя. Существует достаточное количество работ, в которых исследуются шумовые свойства активных смесителей на основе ячейки Джилберта и показано, что шумы блоков в канале гетеродина передаются на выход смесителя в момент переключения сигнала гетеродина, т.е. вклад цепей гетеродина в общий шум смесителя определяется величиной фронта сигнала гетеродина.

Наиболее существенным недостатком предлагаемой архитектуры приемного тракта АФАР можно считать необходимость подключения сигнала гетеродина к каждому смесителю приемно-передающего модуля, как следствие – сложность разводки. Потери сигнала гетеродина компенсируются увеличенным коэффициентом усиления усилителя-ограничителя.

II. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ПРИЕМНОГО ТРАКТА С ФВ В ЦЕПИ ГЕТЕРОДИНА

При перемножении в смесителе полезного сигнала и сигнала гетеродина, выходной сигнал имеет суммарную и разностную частоту и фазу, полученную в результате сложения или вычитания фаз входных сигналов. Таким образом, фаза выходного сигнала смесителя является линейной комбинацией фаз входных сигналов, т. е.:

$$V_{OUT}(t) = V_0(t) \cdot \cos(\omega_{RF} \cdot t + \varphi_{RF}) \times \cos(\omega_{LO} \cdot t + \varphi_{LO}) = \\ = V_0(t) \cdot \frac{1}{2} \cos[(\omega_{RF} \pm \omega_{LO})t + (\varphi_{RF} \pm \varphi_{LO})] + \dots$$

где ω_{RF} – частота полезного сигнала, ω_{LO} – частота сигнала гетеродина, φ_{RF} – фаза полезного сигнала, φ_{LO} – фаза сигнала гетеродина.

На рисунке 2 представлена структурная схема преобразователя частоты с ФВ в канале гетеродина. В ее состав входят: смеситель (СМ), усилитель-ограничитель сигнала гетеродина (УМ), векторный фазовращатель (ФВ), полифазный фильтр (ПФ). Переключение фазы осуществляется с помощью цифровой схемы управления. Предполагается, что частоты гетеродина располагаются ниже, чем частота полезного сигнала: 7 – 11 ГГц.

Дифференциальный входной сигнал гетеродина расщепляется на I и Q квадратурные сигналы с помощью широкополосного ПФ. ПФ реализован на основе пассивных RC цепей. Ортогональные сигналы с выхода ПФ поступают на вход ФВ.

При построении ФВ был выбран метод векторного сложения ортогональных сигналов, который хорошо зарекомендовал себя для реализации интегральных ФВ [1]. Суть метода векторного сложения заключается в суммировании двух сдвинутых на 90° по фазе сигналов (I, Q сигналов). Различные амплитудные весовые составляющие сигналов формируют различные значения фазы.

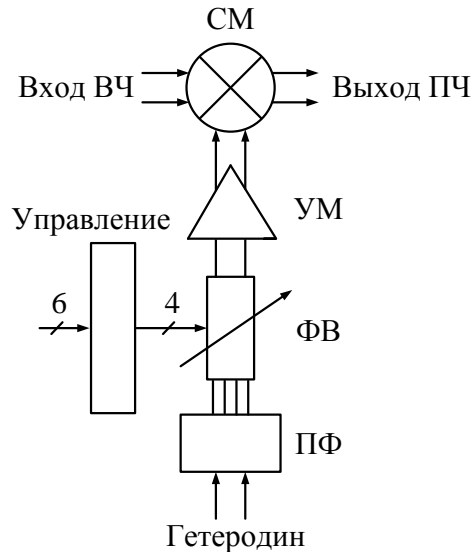


Рис. 2. Структурная схема приемника с фазовращателем в цепи сигнала гетеродина

ФВ был реализован на основе схемы четырехквadrантного умножителя (ячейки Джилберта), где изменение весовых коэффициентов основано на зависимости крутизны транзистора от тока эмиттера. Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), который входит в состав схемы управления, формирует токи каждой пары транзисторов ячейки Джилберта в зависимости от входного управляющего кода. В схеме ФВ дифференциальные I и Q сигналы преобразуются по амплитуде с соответствующими весовыми коэффициентами, а затем полученные таким образом два вектора складываются, образуя выходной сигнал с необходимой амплитудой и фазой. Суммарный выходной ток остается постоянным.

УМ состоит из трех каскадов. Каждый каскад построен на основе схемы умножителя тока, во втором и третьем каскадах применен принцип параллельного суммирования мощности. К особенностям схемных реализаций каскадов можно отнести использование разных типов согласования между каскадами: между первым и вторым применяется согласование по току, между вторым и третьим – согласование по мощности. Это вызвано тем, что в рабочем диапазоне частот (X-диапазон) входное сопротивление каждого каскада составляет около 40 – 120 Ом (в зависимости от каскада). Мощность выходного сигнала УМ составляет порядка +10дБм на дифференциальном сопротивлении 80 Ом (коллекторные сопротивления в выходном каскаде по 40 Ом).

Основной задачей при проектировании смесителя было достижение требуемого динамического диапазона (коэффициент шума не больше 10 дБ, точка компрессии по сигнальному входу не менее 0 дБм, согласование в 50-ти омном тракте) на частотах X-диапазона. Обзор литературы показал, что требуемые характеристики достижимы при применении пассивного смесителя, т.к. в смесителях активного типа при требуемых линейности и полосе входных частот коэффициент шума получается не ниже 20 дБ. Линейность пассивного смесителя определяется мощностью сигнала гетеродина, согласно спецификациям на выпускаемые изделия разница между мощностью гетеродина и достижимой линейностью по сигнальному входу составляет около 5 — 7 дБм. Очевидно, что некоторая мощность гетеродина требуется для открытия диодов, но связь мощности гетеродина и линейности схемы сохраняется. Особенностью схемотехники пассивного смесителя также является исполнение выхода в виде «открытого коллектора» - этим достигается уменьшение потерь передачи мощности в нагрузку. Питание осуществляется через дроссели. Основным препятствием непосредственного использования схемы пассивного смесителя (диодного моста) является необходимость применения трансформаторов для суммирования входного сигнала и сигнала гетеродина. Разработанная схема смесителя является модификацией схемы [3] и обладает признаками как активного смесителя на основе ячейки Джилберта, так и пассивного (достижимая линейность определяется величиной сигнала гетеродина, на нелинейный элемент поступает сумма сигналов входного и гетеродина).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С использованием SiGe БиКМОП технологии с проектными нормами 0,25 мкм фирмы IHP (Германия) и программной среды фирмы Cadence, была разработана микросхема преобразователя частоты, как части приемного тракта АФАР, в котором изменение фазы выходного сигнала производится с помощью перестройки дискретного 6-ти битного векторного ФВ, расположенного в канале гетеродина. Входные и выходные сигналы микросхемы — парафазные. Это вынужденная мера, поскольку низкое сопротивление подложки не позволяет разработать трансформаторы с приемлемыми характеристиками в рабочем диапазоне частот.

Топология кристалла представлена на рисунке 3. Размер кристалла составил 1380×2770 мкм². Микросхема имеет 24 вывода. При напряжении питания 5 В ток потребления микросхемы составляет 102 мА.

Для исследования МИС разработана специализированная СВЧ печатная плата. Внешний вид кристалла, установленного на измерительную плату, представлен на рисунке 4. Измерительная плата

с кристаллом и необходимыми пассивными компонентами устанавливалась на специальное основание и помещалась в универсальную скалярную измерительную оснастку.

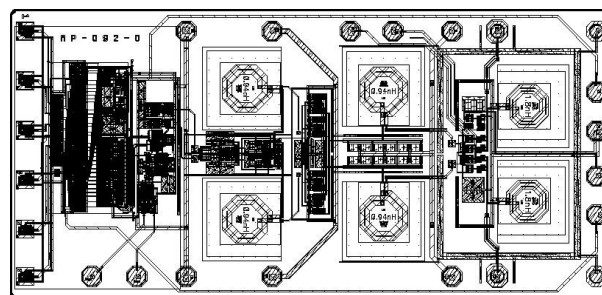


Рис. 3. Внешний вид топологии кристалла ФВ

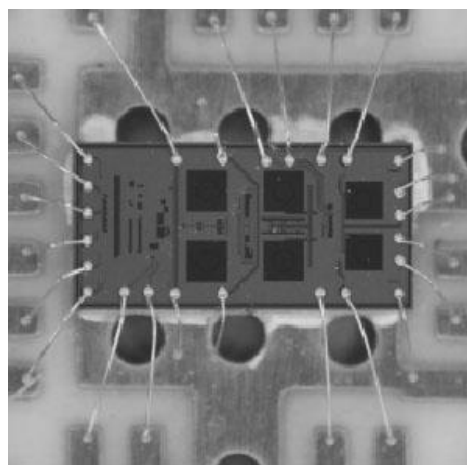


Рис. 4. Фотография кристалла, разваренного в измерительную оснастку

Таблица 1

Характеристики МИС приемника на разных частотах

Параметр	Значение			
	6/8	7/9	8/10	9/11
Частота гетеродина/входная частота, ГГц	6/8	7/9	8/10	9/11
Минимальный дискрет фазового сдвига, град	5,8	4,1	4,6	4,1
Максимальное значение фазового сдвига, град	355	357	365	365
Коэффициент преобразования, дБ	-11,8	-12,3	-12,6	-12,8
Точка однодеци-белльной компрессии по входу, дБм	+7	+7	+8	+6
СКО амплитудной ошибки, дБ	0,8	0,8	0,3	0,6
СКО фазовой ошибки, град.	6,0	5,5	3,9	3,7

Минимальный дискрет фазового сдвига, максимальное значение фазового сдвига, средние квадратичные отклонения фазовой и амплитудной ошибок определялись расчетным путем на основе S-

параметров во всех состояниях. Исследование коэффициента преобразования и верхней границы линейности амплитудной характеристики проводилось с помощью анализатора спектра. Сводные результаты измерений МИС приемника для разных значений входных частот и частот сигнала гетеродина представлены в таблице 1.

На рисунке 5 представлены фазовые характеристики приемника в зависимости от частоты для всех 64 состояний ФВ. Фазовые характеристики нормированы к кривой с минимальным значением фазы.

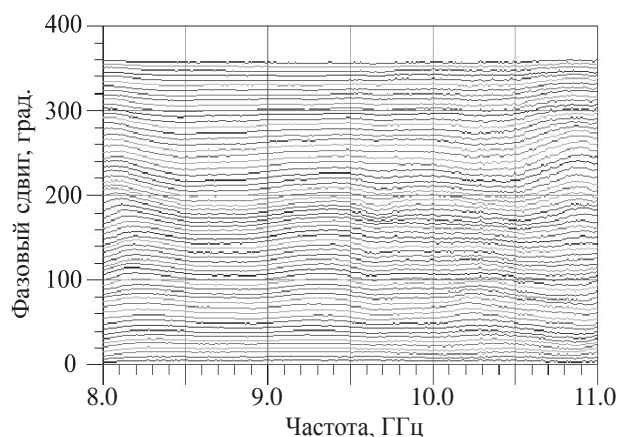


Рис. 5. Изменение величины фазового сдвига для всех состояний фазовращателя

В результате проделанной работы установлено, что измеренные параметры микросхемы приемника соответствуют расчетным значениям. Микросхема обладает большим динамическим диапазоном по сравнению с архитектурой, в которой ФВ располагается в ВЧ тракте. Это достигается в основном за счет значительного увеличения линейности по входу, которая определяется линейностью смесителя. Также расширен частотный диапазон до 11 ГГц. СКО фазовой ошибки сопоставимо с величиной минимального дискрета изменения фазы, но может быть уменьшено за счет более точной настройки токов ЦАП или применения ЦАП с избыточным числом состояний.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и экспериментально исследована микросхема преобразователя частоты, предназначенного для использования в приемо-передающих трактах АФАР. Используемый при разработке SiGe БикМОП технологический процесс позволяет значительно увеличить степень интеграции микросхемы и размещать на одном кристалле цифровые и аналоговые блоки, одновременно сохраняя при этом высокий процент выхода годных изделий, а также низкую стоимость изготовления. Благодаря использованию SiGe технологии устройство характеризуется компактностью и широким диапазоном рабочих частот.

В таблице 2 представлены сводные характеристики разработанной микросхемы и зарубежных аналогов, использующих тот же принцип реализации приемных модулей. Анализируя полученные данные, можно сказать, что характеристики интегральной схемы – точность задания фазы, постоянство амплитуды, динамический диапазон, занимаемая площадь – сопоставимы с параметрами зарубежных аналогов, а по некоторым критериям превосходят их. В частности, по величине линейности по входу, которая определяется характеристиками смесителя.

Таблица 2

Характеристики МИС приемника и зарубежных аналогов

	Данная работа	[4]	[5]
Технология	SiGe 0,25мкм	SiGe 0,18 мкм	Si 0,13 мкм
Частота, ГГц	8-11	23-24	8-11
Коэффициент преобразования, дБ	-12,5	20	20
Коэфф. шума, дБ	13*	8	9
Точка однодеци-белльной компрессии по входу, дБм	+7	-27	-24
СКО амплитудной ошибки, дБ	0,7	-	0,4
СКО фазовой ошибки, град.	4,8	-	0,5
Размер кристалла, мм ²	1,4×2,8	3,5×3,3	3,0×5,2

* - расчетное значение

Параметры микросхемы позволяют говорить о принципиальной возможности применения данной микросхемы в ППМ АФАР X диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ионов П.Л., Малышев И.В., Мухин И.И., Репин В.В. Методы построения МИС векторных фазовращателей // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов / Под ред. В.Я. Стенина. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 117-122.
- [2] Hashemi H., Guan X., Komijani A., Hajimiri A. A 24-GHz SiGe Phased-Array Receiver—LO Phase-Shifting Approach // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - 2005. - V. 53. - № 2. - P. 614 – 626.
- [3] Lim, S., Long, J. A low-voltage broadband feedforward-linearized BJT mixer // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - 2006. - V. 41. - № 9. - P. 2177 – 2187.
- [4] Guan X., Hashemi H., Hajimiri A. A Fully Integrated 24-GHz Eight-Element Phased-Array Receiver in Silicon // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - 2004. - V. 39. - № 12. - P. 2311 – 2320.
- [5] Jeon S., Wang Y., Wang H., Bohn F., Natarajan A., Babakhani A., Hajimiri A. A Scalable 6-to-18 GHz Concurrent Dual-Band Quad-Beam Phased-Array Receiver in CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - 2008. - V. 43. - № 12. - P. 2660 – 2673.