

ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ AELIUS SEMICONDUCTORS ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ АФАР

Активные фазированные антенные решетки (АФАР) содержат тысячи одинаковых ячеек, управляющих амплитудой и фазой СВЧ-сигнала, именно они определяют надежность и стоимость всей антенной системы. Компания Aelius Semiconductors ведет активную работу по созданию монолитных интегральных схем, ориентированных для применения в АФАР. Высокий уровень их интеграции позволяет снизить число компонентов в ячейке, что приводит к снижению стоимости и повышению надежности системы АФАР.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие актуальность применения микроволновых монолитных интегральных схем (ММИС) в СВЧ-применениях неуклонно возрастает благодаря текущим и перспективным задачам, как телекоммуникационного, так и военного рынков. Миниатюризация, уменьшение веса, малое энергопотребление и повторяемость параметров являются очевидными преимуществами использования ММИС. Эти качества ММИС положительно влияют на надежность и отказоустойчивость работы в целом.

Арсенид галлия (GaAs) как базовый материал для производства ММИС приобрел популярность из-за своих электрических свойств, превосходящих аналогичные свойства кремния. GaAs превосходит кремний по показателю мобильности электронов и скорости насыщения, позволяя издвигать работу на более высоких частотах, чем кремниевый аналог. GaAs ММИС, как правило, работают с меньшими шумами, чем кремниевые ММИС. Также GaAs способен работать на больших мощностях за счет более высокого напряжения пробоя. Перечисленные особенности обеспечили GaAs прочное место в космической связи, радиорелейных станциях и радарных системах.

Активные фазированные антенные решетки (АФАР) и системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ) являются основными областями, где применение транзисторов и ММИС по технологии GaN-оп-SiC (нитрид галлия на карбиде кремния) стало стандартом де-факто на многие годы. Ни одна существующая или перспективная технология не может сравниться с GaN-оп-SiC по удельной плотности мощности, напряжению пробоя, компактности, минимальным входным и выходным емкостям, входному и выходному импедансу и КПД.

ТЕХНОЛОГИИ АФАР

ФАР позволяют программно управлять свойствами лучей диаграммы направленности (ДН) и перенацеливать их в разные точки пространства без физического поворота антенны. В АФАР каждый излучатель подключен к своему приемопередающему модулю (ППМ), находящемуся под индивидуаль-

ным программным контролем. Топология АФАР позволяет излучать несколько лучей на нескольких частотах. Способность рассредоточивать излучение на несколько частот затрудняет обнаружение носителя АФАР на фоне шумов, позволяя кораблям, самолетам или другим подвижным объектам излучать мощный сигнал, сохраняя заданную скрытность в электромагнитном спектре. Это свойство АФАР наряду с компактными размерами очень актуально, т.к. большинство АФАР применяются в современных видах вооружения.

Тем не менее, прогресс не стоит на месте, и актуальные задачи требуют еще меньших габаритов, большего КПД и более острых лучей ДН. Одним из методов достижения текущих требований к АФАР является использование многофункциональных ММИС. Используя данный подход, можно добиться сокращения количества интегральных схем в ВЧ-части ППМ до двух. Один из примеров использования ММИС в АФАР будет рассмотрен далее на базе ММИС от Aelius.

СТРУКТУРА ППМ

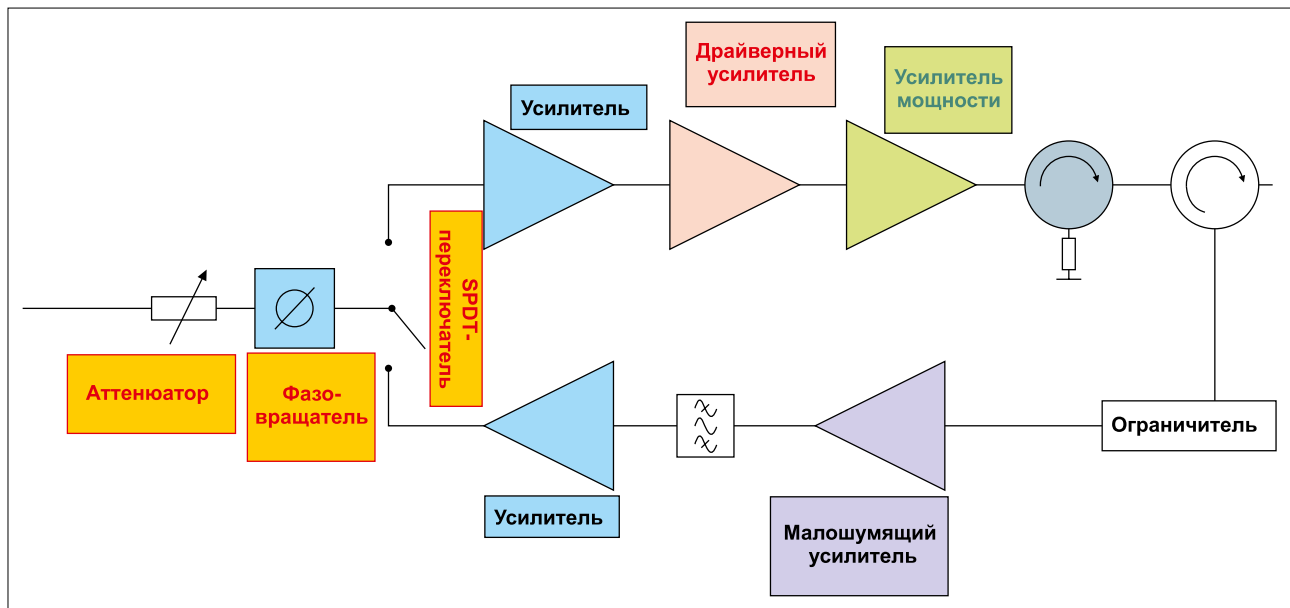
Типовая блок-схема ППМ изображена на рис. 1. В приведенной схеме количество задействованных ММИС варьируется от семи до восьми в зависимости от требуемой выходной мощности. Данная топология известна как «архитектура с общим каналом» (Common Leg Architecture), где три пассивных элемента, ответственных за фазовый сдвиг, управление амплитудой и выбор режима передачи или приема, являются общими как для передающего, так и для приемного тракта ППМ.

Рассмотрим детально каждый из блоков ППМ.

УСИЛИТЕЛЬ

Данный компонент усиливает сигнал в рабочей полосе частот и является ключевым элементом ППМ. Критическими параметрами УМ являются:

- коэффициент усиления;
- рабочая полоса частот;
- КПД;
- уровень шумов;



▲ Рис. 1. Типовая схема ППМ

- выходной динамический диапазон;
- стабильность.

Компания Aelius производит четыре основных типа усилителей, рассмотренных ниже.

МОДУЛЬНЫЙ МАЛОСИГНАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Модульный малосигнальный усилитель является универсальной разновидностью малосигнального усилителя; как правило, он согласован на 50 Ом по входу и выходу. Данный компонент подходит для множества задач общего назначения: для широкополосных цепей, цепей высоких (ВЧ) и промежуточных (ПЧ) частот, а также других применений. Модульные усилители легко масштабируются для таких маломощных применений, как измерительное оборудование и различные системы связи.

Aelius Semiconductors имеет широкий перечень модульных усилителей, включая модели с рабочим диапазоном до 40 ГГц. Их коэффициент усиления лежит в пределах 7–35 дБ в полосе частот, определенной каждым конкретным усилителем. Модульные усилители бывают как узкополосными, так и широкополосными, оправдывая свою многофункциональность.

ДРАЙВЕРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

В нашем случае это СВЧ-компонент, ответственный за управление другим компонентом или цепью, таким как усилитель мощности. Драйверный усилитель должен обеспечивать достаточное усиление для компенсации потерь на предшествующих элементах цепи, а также выдавать необходимую мощность для следующего за ним усилителя мощности для обеспечения его оптимального режима работы.

Aelius Semiconductors располагает значительной линейкой узкополосных и широкополосных усилителей, годных для работы в качестве драйверных в диапазонах частот 2–31 ГГц и мощностей 18–27 дБм (по критерию компрессии 1 дБ).

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Усилители данного типа являются наиболее сложными по конструкции и ответственными по важности выполняемых задач, поэтому основные усилия мировых производителей СВЧ-компонентов сфокусированы именно в этой области. Проектирование и производство таких усилителей являются самыми трудоемкими и затратными относительно компонентов другого типа, и поэтому занимают значительное время.

В некоторых случаях на организацию выпуска нового усилителя могут уходить годы.

За последнее десятилетие было разработано множество ВЧ- и СВЧ-транзисторов на технологиях SiC MESFET и GaN HEMT с целью добиться максимальной плотности мощности, максимального рабочего напряжения и минимальной паразитной емкости. Технология GaN, позволяющая добиться высокого коэффициента усиления и выходной мощности, заняла доминирующее положение на рынке, но все же производство мощных и в то же время широкополосных и сверхвысокочастотных усилителей до сих пор является актуальной проблемой.

Aelius Semiconductors производит широкую номенклатуру ММИС усилителей мощности для выходных каскадов ППМ. Диапазон частот усилителей лежит в пределах 2–20 ГГц, диапазон мощностей составляет 1–15 Вт. Все ММИС данного типа согласованы на 50 Ом и производятся по технологиям GaAs и GaN.

МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Маломошумящий усилитель (МШУ) играет критическую роль в приемном каскаде ППМ. Принимая с антенны очень слабый сигнал, часто соизмеримый с уровнем шумов, он должен усилить его без значительного снижения отношения сигнал/шум.

При разработке МШУ приходится идти на компромиссы между согласованием импеданса, выбором технологической основы и подбором маломошумящей цепи смещения. Хороший МШУ имеет низкий коэффициент шума, достаточное усиление, а также низкие нелинейные и интермодуляционные искажения.

Существующие в линейке Aelius Semiconductors МШУ могут быть применены в качестве первой ступени во входном каскаде ППМ. Рабочий диапазон частот МШУ составляет 0,5–40 ГГц, коэффициент шума лежит в пределах 0,7–3,5 дБ даже для сверхширокополосных МШУ. Коэффициент усиления варьируется от 11 дБ до 35 дБ. Ряд МШУ выпускается в QFN-корпусах.

Итак, Aelius Semiconductors располагает всеми основными типами усилителей: маломошумящими, широкополосными, усилителями средней мощности, усилителями мощности в диапазоне 0–40 ГГц. Большинство усилителей являются внутренне согласованными. МШУ в целом спроектированы для применения в различных радарх, в то время как широкополосные усилители могут работать в диапазоне более 5 октав, позволяя использовать их в устройствах РЭБ.

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ

СВЧ-переключатель — это компонент, предназначенный для коммутации сигнала через цепи ППМ. В передатчиках часто применяются переключатели приема/передачи для коммутации такого общего ресурса, как антенна. Переключатели используются практически в любом приемо-передающем устройстве коммерческого, военного, авиакосмического и измерительного применения. Иными словами, во всех радарх, телекоммуникационных устройствах и лабораторном оборудовании может находиться СВЧ-переключатель.

Существует несколько типов переключателей, что позволяет создавать сложные коммутационные схемы, такие как матричный СВЧ-коммутатор и автоматические тестовые комплексы для автоматизированной проверки характеристик электронных компонентов. Переключатели структуры SPDT (Single Pole, Double Throw) коммутируют сигнал с одного входа на два выхода, переключатели структуры SPST (Single Pole, Single Throw) коммутируют сигнал с единственного входа на единственный выход.

В распоряжении Aelius Semiconductors есть ряд SPDT-переключателей, покрывающих диапазон 0–40 ГГц с малыми вносимыми потерями, высокой изоляцией и скоростью переключения менее 50 нс. Практически все переключатели в линейке имеют встроенный драйвер. В дополнение к GaAs-переключателям имеются GaN SPDT-переключатели в полосе частот 0–20 ГГц. Изоляция составляет более 45 дБ.

ЦИФРОВОЙ АТТЕНУАТОР

Аттенуаторы в ППМ антенной решетки предназначены для управления уровнем сигнала, что в конечном итоге позволяет минимизировать боковые лепестки в диаграмме направленности. Это обычно необходимо только для работы на прием, при работе на передачу необходимо излучить максимальную мощность. Следующей функцией аттенуатора является персональная корректировка амплитуды конкретного ППМ в полотне решетки, т. к. каждый ППМ имеет небольшие отличия от заданных характеристик. Обычно аттенуатор используют в первую очередь именно для корректировки персональных особенностей ППМ. Цифровой аттенуатор отличается тем, что способен менять ослабление сигнала с большой скоростью, соответствующей скорости работы драйвера и управляющего сигнала. Цифровые аттенуаторы могут производиться с драйвером или без него. Тип логики управляющих сигналов зависит от типа драйвера, у Aelius это ТТЛ. С увеличением разрядности аттенуатора резко увеличивается сложность драйвера. В подобных случаях требуются дополнительные ресурсы и время на разработку драйвера. Некоторые производители для оптимизации разработки добавляют к аттенуатору драйвер как отдельный кристалл. Такой подход значительно увеличивает общую стоимость и размер всего аттенуатора, а также снижает надежность из-за появления дополнительных контактов между драйвером и аттенуатором. Aelius размещает драйвер на одном кристалле с аттенуатором, снижая стоимость и размеры конечного изделия.

Aelius Semiconductors предлагает 6-разрядные аттенуаторы в диапазоне до 20 ГГц со встроенным ТТЛ-драйвером. Ослабление достигает 31,5 дБ с шагом 0,5 дБ. Все аттенуаторы обладают низкой амплитудной ошибкой. Важной особенностью имеющихся аттенуаторов является дополнительный контроль фазы ослабления. Большинство производителей цифровых аттенуаторов не акцентируют внимания на этом параметре, однако он очень важен для применения данного компонента в АФАР.

Например, ASL3003, представляющий собой 6-разрядный аттенуатор, работающий в диапазоне 0,5–10,5 ГГц с шагом 0,5 дБ, вносимыми потерями в 4,5 дБ и точностью ослабления

$\pm 0,75$ дБ, будет иметь фазовый разброс всего 10° и среднеквадратичную ошибку ослабления 0,35 дБ.

ЦИФРОВОЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

Фазовращатель используется для изменения фазы передаваемого сигнала и имеет несколько основных характеристик. Первая из них — вносимые потери. В идеале фазовращатель должен иметь малые вносимые потери во всех фазовых состояниях. Обычно потери фазовращателя компенсируют усилительными каскадами. Следующая важная характеристика — малый разброс амплитуд на разных фазах. В большинстве систем, использующих фазовращатель, недопустимо изменение амплитуды при изменении фазы. Третья характеристика — двунаправленность работы, фазовращатель должен позволять сигналу проходить в обоих направлениях. Эта опция необходима для работы в ППМ с топологией «общий канал». Следующее свойство фазовращателя — принцип работы. Компонент может менять фазу сигнала или задерживать сигнал во времени. Замыкает перечень основных параметров рабочая полоса частот и максимальная мощность сигнала.

Области применения фазовращателя многочисленны, однако основной остается работа в составе ППМ АФАР. Путем адресного задания фазы на каждой ячейке полотна АФАР достигается поворот ее диаграммы направленности. Для выполнения такой задачи фазовращатели должны быть способны сдвигать фазу на 360° .

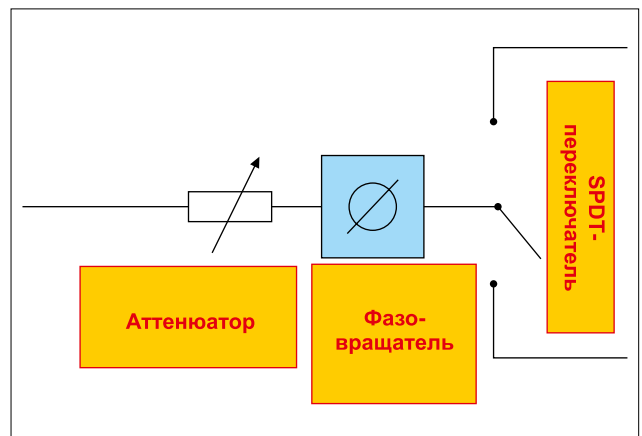
Все фазовращатели Aelius являются электронно-управляемыми с пассивной двунаправленной схемой. В линейке присутствуют 5-, 6- и 8-разрядные цифровые фазовращатели на диапазоны L, S, C, X и Ku со встроенным ТТЛ-драйвером.

ОПТИМИЗАЦИЯ ППМ

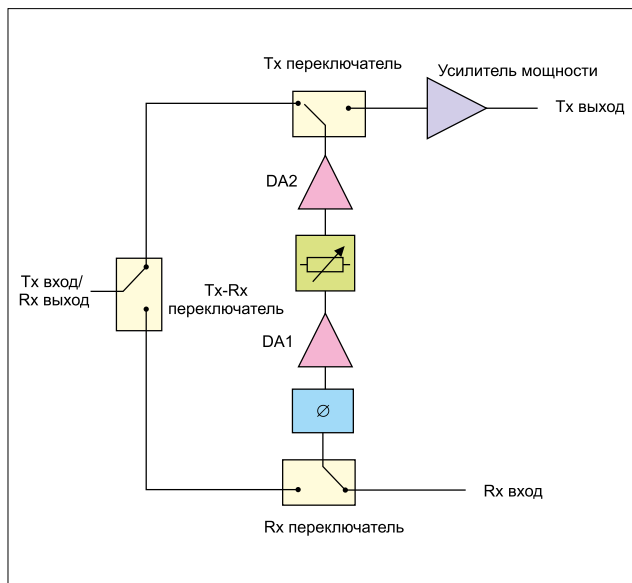
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ CORE CHIP

Благодаря современному уровню интеграции полупроводниковых изделий количество ММИС в ППМ может быть сокращено. Управление фазой (или задержкой), контроль амплитуды и переключение прием/передача могут быть выполнены одной многофункциональной ММИС, называемой ядром (Core Chip). Если ММИС включает в себя только пассивные элементы, то она считается пассивным ядром. Чтобы компенсировать потери, нам по-прежнему понадобятся усилители, как на рис. 1. Данная комбинация из фазовращателя, аттенуатора и переключателя SPDT (рис. 2) позволяет сократить количество ММИС в ППМ на две.

Можно ли еще сократить количество компонентов? Ответить помогут современные техпроцессы с нормами 0,1; 0,15 и 0,25 мкм производства GaAs ММИС и улучшенные методы моделирования.



▲ Рис. 2. Пассивные элементы в схеме общего канала



▲ Рис. 3. Ядро с пассивными элементами и усилителем

Таблица. Параметры ядра ППМ ASL6000 компании Aelius в различном исполнении

Ядро	ASL6000	ASL6000OP
Диапазон частот, ГГц	9-10	8,7–10,5
Усиление при передаче, дБ	28	25
Усиление при приеме, дБ	4	2,5
Выходная мощность P1дБ, дБм	22	21
Корпус	6/к	QFN 8×8 мм

Доступность нелинейных моделей переключателей позволяет интегрировать переключатели вместе с усилителями на общий кристалл.

Используя преимущества технологии, мы не только избавляемся от потерь на управляющих элементах, но также обеспечиваем достаточное усиление и существенно большую выходную мощность. Для маломощных радаров выходной мощности самого ядра может быть достаточно и без использования дополнительного усилителя мощности.

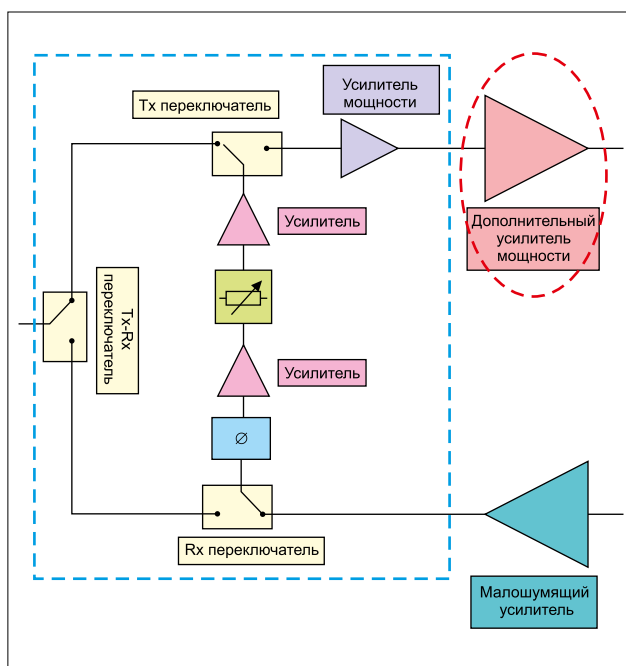
Компания Aelius разработала ядро X-диапазона в корпусном и бескорпусном исполнениях, включающее как элементы управления, так и усилитель мощности. Выходная мощность данного усилителя по критерию P1дБ составляет 22 дБм, что позволяет отнести данную ММИС к категории активных ядер (рис. 3). В ядре используются 6-разрядные аттенуатор и фазовращатель. Основные параметры ядра приведены в таблице.

Из рис. 4 видно, что теперь количество ММИС в ППМ может быть сокращено до двух или трех, если требуется дополнительная выходная мощность. Из указанного примера следует, что на базе данного ядра (ASL6000 или ASL6000OP) возможно построение ППМ только из двух ММИС, при этом для решетки с 2000 ячеек достижима мощность 200 Вт. Очевидно, что такой подход может существенно уменьшить стоимость конечного изделия, потребляемую энергию и массогабаритные характеристики.

Описанное выше ядро реализует концепцию «ВЧ-система на кристалле». В будущем возможно появление законченного ППМ на одном кристалле — полноценной «системы на кристалле».

ИТОГИ

Свойства современных радаров с АФАР в основном определяются свойствами ППМ и их ВЧ-цепями. Вся АФАР базируется на компонентах, которые смогут обеспечить ми-



▲ Рис. 4. ППМ из двух или трех ММИС

нимальный вес, малое потребление и высокую надежность. Применяя в конструкции X-диапазонного ППМ активное ядро ASL6000/ASL6000OP, возможно добиться вышеперечисленных требований, а также существенно упростить конструкцию ВЧ-части ППМ и его стоимость, сокращая количество ММИС в изделии. ■

