

## СВЕРХМОЩНЫЕ GaN-УСИЛИТЕЛИ в приложениях Direct To Home

М.Лаврентьев, руководитель департамента технического развития ООО "Qttech"

В статье описывается эволюция радиочастотного оборудования головных станций DTH-вещания, рассматриваются различные решения и их основные недостатки. В качестве современного подхода предлагается применение твердотельных усилителей технологии GaN и систем фазового сложения, что позволяет значительно сократить капитальные и операционные расходы и повысить рентабельность бизнеса.

Технология спутникового вещания, широко известная как Direct To Home (DTH), была разработана для передачи сигналов цифрового телевидения напрямую конечным пользователям по спутниковым каналам связи. Эта технология имеет большой коммерческий успех во всем мире благодаря хорошему покрытию и недорогому абонентскому оборудованию. Европейский институт телекоммуникационных стандартов (ETSI) разработал единый стандарт Digital Video Broadcasting over Satellite (DVB-S), который изначально использовался в DTH-приложениях. Этот стандарт дал возможность создать очень недорогие абонентские устройства и занял доминирующие позиции на рынке спутникового вещания. С течением времени бизнес-модель DTH требовала все большего количества ТВ-каналов, одновременно повышались требования к качеству передаваемого видео. Это привело к тому, что функциональные возможности DVB-S достигли насыщения. В результате в 2005 году появилась вторая редакция стандарта DVB-S2, в которой были сделаны существенные функциональные улучшения. В отличие от DVB-S, в котором вещание велось на модуляции QPSK, DVB-S2 позволяли использовать модуляции более высокого порядка, вплоть до 32APSK, что дало возможность существенного увеличения

скорости передачи вещательного канала. Однако DVB-S2 предъявил более жесткие требования к оборудованию головных станций спутникового ТВ-вещания, особенно к радиочастотному тракту. Поскольку DVB-S2 поддерживает работу с модуляциями высокого порядка, возникли дополнительные требования к линейности усилителей мощности, что создало определенные трудности для операторов. Эта проблема была очень актуальной, и однозначного ее решения до последнего времени не было. Различные производители усилителей мощности предлагают свои решения для данной задачи. Ниже рассматривается текущая ситуация в отрасли и описывается инновационное решение компании Advantech Wireless.

### ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ГОЛОВНЫХ СТАНЦИЙ DTH-ВЕЩАНИЯ

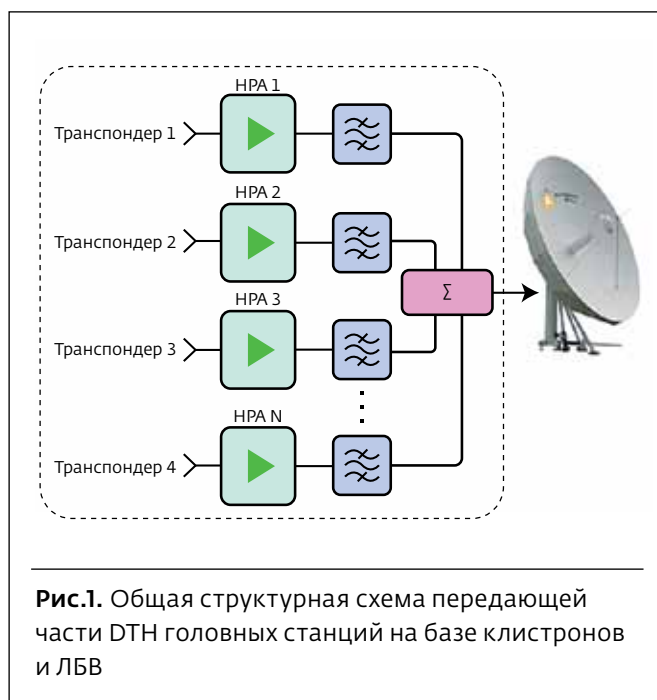
Дизайн головных станций DTH-вещания имеет особенности, которые необходимо принимать во внимание при организации передающего тракта антенной системы. Первая особенность: обычно DTH-мультиплекс передается на одной широкополосной несущей. В подавляющем большинстве случаев эта несущая занимает весь транспондер спутника. Этот режим работы называется одночастотным, и он гарантирует

отсутствие взаимной интерференции между несущими частотами в транспондере, что позволяет увеличить выходную эквивалентную изотропно излучаемую мощность (EIRP, Equivalent Isotropically Radiated Power). Вторая важная особенность: вещание в большинстве случаев осуществляется из единого центра, следствие этого – большое количество мультиплексов, которые необходимо передать из единой точки. Количество мультиплексов может достигать нескольких десятков. Обычно в Ku-диапазоне передается 40–50 мультиплексов в полосе 500 МГц.

Эти две особенности оказывают ключевое влияние на дизайн передающей части. Передача большого количества мультиплексов в широкой полосе частот предъявляет очень серьезные требования к мощности передачи антенной системы. Эта мощность может составлять несколько киловатт, при этом должна обеспечиваться высокая линейность передающего тракта. В течение продолжительного периода времени эти два фактора были взаимоисключающими, что и привело к классическому дизайну головных станций ДТН, который описан ниже.

### DVB-S: эпоха клистронов

Как было отмечено ранее, дизайн головной станции ДТН-вещания требует использования высокоомощных усилителей, которые должны иметь хорошую линейность и низкий уровень интермодуляционных составляющих. Эти два параметра до последнего времени были взаимоисключающими. Усилители с выходной мощностью в несколько киловатт и хорошими линейными характеристиками на момент появления ДТН не были аппаратно реализуемы. Единственным решением, позволяющим достичь требуемого уровня выходной мощности, были усилители на базе клистронов. Клистроны позволяли достичь требуемого уровня мощности, но обладали очень плохой линейностью и высоким уровнем интермодуляционных помех. Это существенно ограничивало их использование в многочастотном режиме работы и с модуляциями выше QPSK. Из-за таких существенных ограничений клистроны применялись в одночастотном режиме, как это показано на рис.1. Для каждого транспондера использовался отдельный клистронный усилитель мощности, на выходе применялась схема объединения каналов.



Такая схема позволяла решить поставленную задачу, но обладала существенными недостатками:

- структура передающего тракта очень громоздкая и негибкая. Как правило, такие системы обладают небольшим КПД и высоким энергопотреблением;
- внутреннее исполнение клистронов приводит к дополнительным существенным потерям в волноводном тракте (до 75% выходной мощности теряется в фидерном тракте);
- система объединения транспондеров вносит существенные потери в передающий тракт. Общая величина потерь растет пропорционально числу передающих транспондеров.

Последний недостаток, пожалуй, самый важный. Например, если оператор захочет передать через одну антенну сигналы 40 транспондеров, то он должен применять схему объединения на 40 каналов. Такая схема вносит огромные потери в тракт передачи (до 10 дБ), что сильно снижает КПД и приводит к огромному количеству впустую расходуемой электроэнергии. Поэтому на ранних этапах в головных станциях строилось несколько антенных систем, каждая из которых обслуживала 6–8 транспондеров. Такое решение было компромиссом между капитальными затратами на строительство нескольких антенных систем большого диаметра и операционными затратами из-за низкого КПД.

На ранних стадиях развития DTH клистроны доминировали просто потому, что альтернативы им не было. Для стандарта вещания DVB-S такая схемная реализация функционировала достаточно качественно и была, пожалуй, единственно возможным решением. При развитии DVB-S2 клистронное решение стало неприемлемым, поскольку ограничивало порядок модуляции уровнем QPSK. Для модуляций 8PSK и выше использование клистронов практически невозможно, и потому им на смену пришли системы с использованием ламп бегущей волны (ЛБВ, TWTА).

## DVB-S2: миграция в ЛБВ

После принятия стандарта DVB-S2 и начала его активного применения клистронные усилители мощности стали серьезным препятствием для дальнейшего развития DTH. Производители радиочастотного оборудования искали выход из сложившейся ситуации. Сначала было предложено усложнить конструкцию передающего тракта, включив туда дополнительные эквалайзеры. Однако коммерческого распространения такое решение не получило в силу своей сложности, высокой стоимости и низкой эффективности. На тот момент в качестве альтернативного решения могли выступить только ЛБВ. В отличие от клистронов, ЛБВ обладали существенно лучшей линейностью, что давало возможность работать на модуляциях более высокого порядка, таких как 8PSK и 16APSK. Однако основным недостатком ЛБВ была гораздо меньшая выходная мощность, чем у клистронов, а также не очень хорошая линейность в широкой полосе частот. Даже использование дополнительных встроенных линеаризаторов не дает требуемых параметров линейности в широкой полосе частот. Поэтому структурно решение не изменилось, оно также подразумевало применение одного усилителя на транспондер и систему объединения каналов. Только вместо клистронов использовались ЛБВ.

Таким образом, несмотря на то что ЛБВ позволили существенно увеличить скорости DTH-мультиплексов, их использование не давало возможности передавать сигналы всех транспондеров через одну антенну.

На сегодняшний день решение на базе ЛБВ – самое распространенное. Оно далеко от идеала, и операторы вынуждены очень существенно инвестировать в строительство таких систем. Более того, эксплуатация таких систем очень

дорогая. На сегодняшний день производители оборудования решают следующие задачи:

- передача сигналов всех транспондеров через одну антенную систему. Это позволит оператору существенно сократить инвестиции в строительство головной станции, а также снизит операционные расходы на эксплуатацию нескольких антенных систем;
- функционирование передающего тракта в широкой полосе, покрывающей все передаваемые транспондерами частоты. Это дает возможность избежать использования цепей фильтрации и объединения в передающем тракте, что в 4–5 раз снизит потери в тракте. Автоматически это приведет к снижению энергопотребления;
- размещение усилителя мощности в непосредственной близости от антенны. Это позволяет уменьшить протяженность волноводного тракта и снизить потери в 1,5–2 раза. Более того, это даст возможность существенно снизить требования к системам кондиционирования и отвода тепла от узлов вещания.

Для решения этих задач нужна принципиально новая технология сверхмощных усилителей. Эта технология уже существует, и в ближайшее время ожидается повсеместный переход на ее использование.

## СИСТЕМЫ ФАЗОВОГО СЛОЖЕНИЯ НА БАЗЕ GAN HEMT

Полупроводниковые усилители мощности (в зарубежной терминологии SSPA, Solid State Power Amplifier) известны достаточно давно. Они развивались параллельно клистронам и ЛБВ и постепенно вытесняли их с рынка систем спутниковой связи и вещания. Главное преимущество полупроводниковых усилителей мощности (ПУМ) по отношению к ЛБВ заключается в их существенно лучшей линейности. Недостаток ПУМ до последнего времени был связан с элементной базой, на которой они строились, а именно – с транзисторами по технологии GaAs. Кристалл транзистора GaAs очень хрупкий, но он подвергается существенным термическим, радиационным и механическим воздействиям. Транзисторы GaAs имеют небольшой коэффициент усиления, поэтому приходится использовать много каскадов для получения высокой выходной мощности. Чувствительность GaAs к высокой температуре заставляла строить сложные

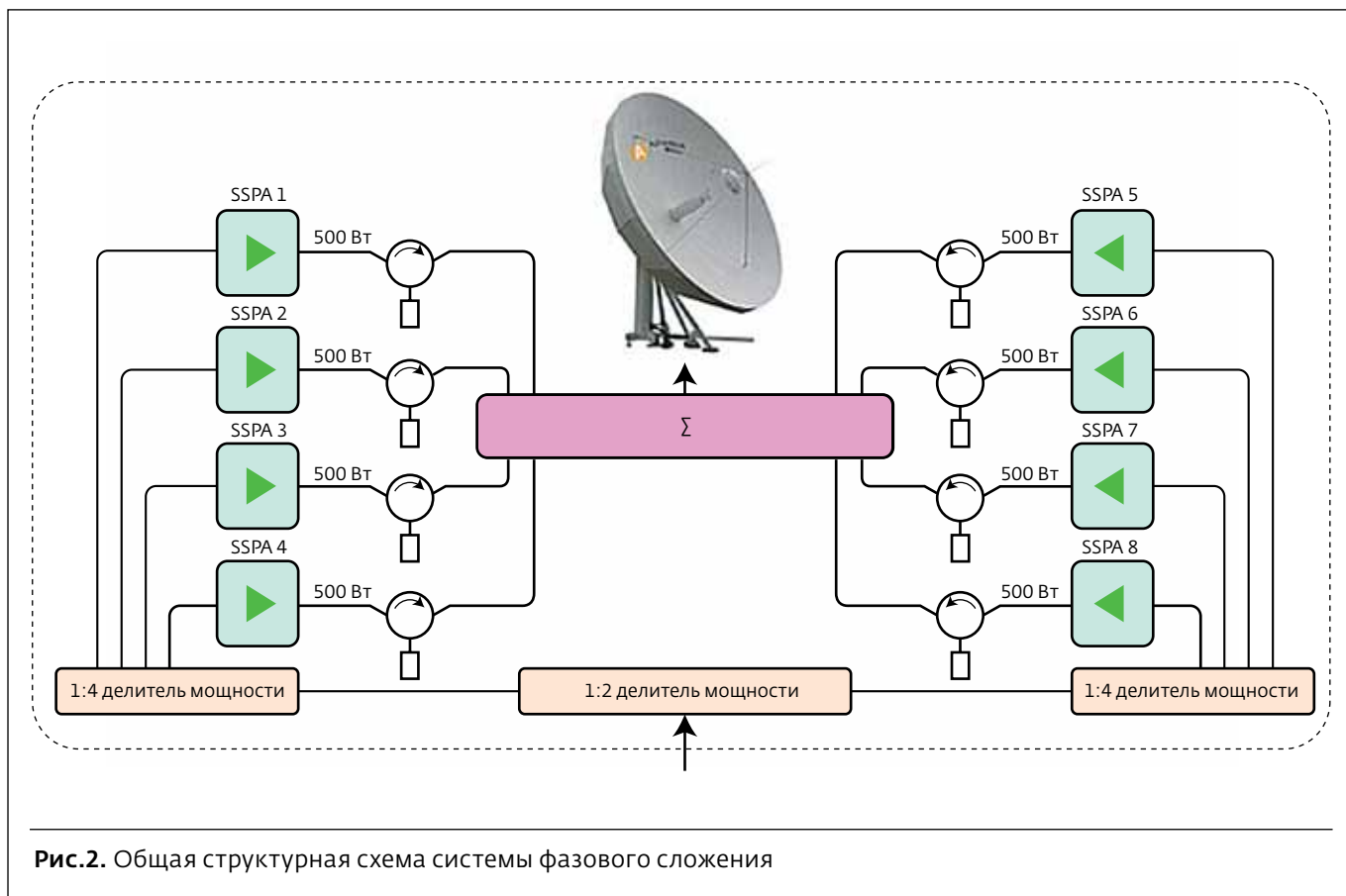


Рис.2. Общая структурная схема системы фазового сложения

схемы теплоотвода для выходных каскадов, что было критическим ограничением для ПУМ. В итоге высокомощные ПУМ по технологии GaAs имели очень большие габариты и низкий КПД. Для Ku-диапазона максимальным пределом были ПУМ мощностью 300 Вт. Чтобы решить эту проблему и повысить выходную мощность, разрабатывались разнообразные формы систем фазового сложения, которые позволяли увеличить мощность в 2-4 раза; но достичь значений, требуемых для DTH-приложений, разработчикам не удавалось. Ситуация коренным образом изменилась, когда была открыта и исследована новая элементная база – GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor, транзистор с высокой подвижностью электронов). Это достаточно новая технология для СВЧ-транзисторов, ее возраст менее 10 лет. Несмотря на относительную молодость, GaN HEMT получили очень широкое распространение в системах спутниковой связи и вещания, военных радаров, системах радионавигации, а также в системах подвижной связи.

Основные достоинства GaN HEMT – высокий коэффициент усиления, устойчивость к внешним

воздействиям и жесткая кристаллическая структура. Эти уникальные свойства стали ключевым движущим фактором использования GaN HEMT для решения задач передающего тракта в головных станциях DTH-вещания. Использование GaN HEMT-элементной базы дает разработчикам оборудования следующие преимущества:

- высокий коэффициент усиления позволяет реализовать высокомощные усилители в чрезвычайно компактном форм-факторе;
- прочность кристалла приводит к лучшей в индустрии линейности и низким фазовым шумам;
- устойчивость к высокой температуре (более 200°C) упрощает дизайн согласования и систему теплоотвода выходных каскадов и решает наиболее критическую проблему ПУМ.

Для создания высокомощных передающих систем на базе GaN ПУМ используется метод когерентного фазового сложения. Его упрощенная архитектура приведена на рис.2. В качестве примера выбрана система Ku-диапазона мощностью 3,6 кВт. Она состоит из восьми

усилительных модулей, которые объединены системой фазового сложения. Каждый модуль имеет выходную мощность 700 Вт и покрывает весь Ku-диапазон (500 МГц), 8-й модуль используется для резервирования по схеме 2x(4:1). Максимальная выходная мощность системы составляет 4,8 кВт, расчетная выходная мощность с учетом резервирования – 3,6 кВт.

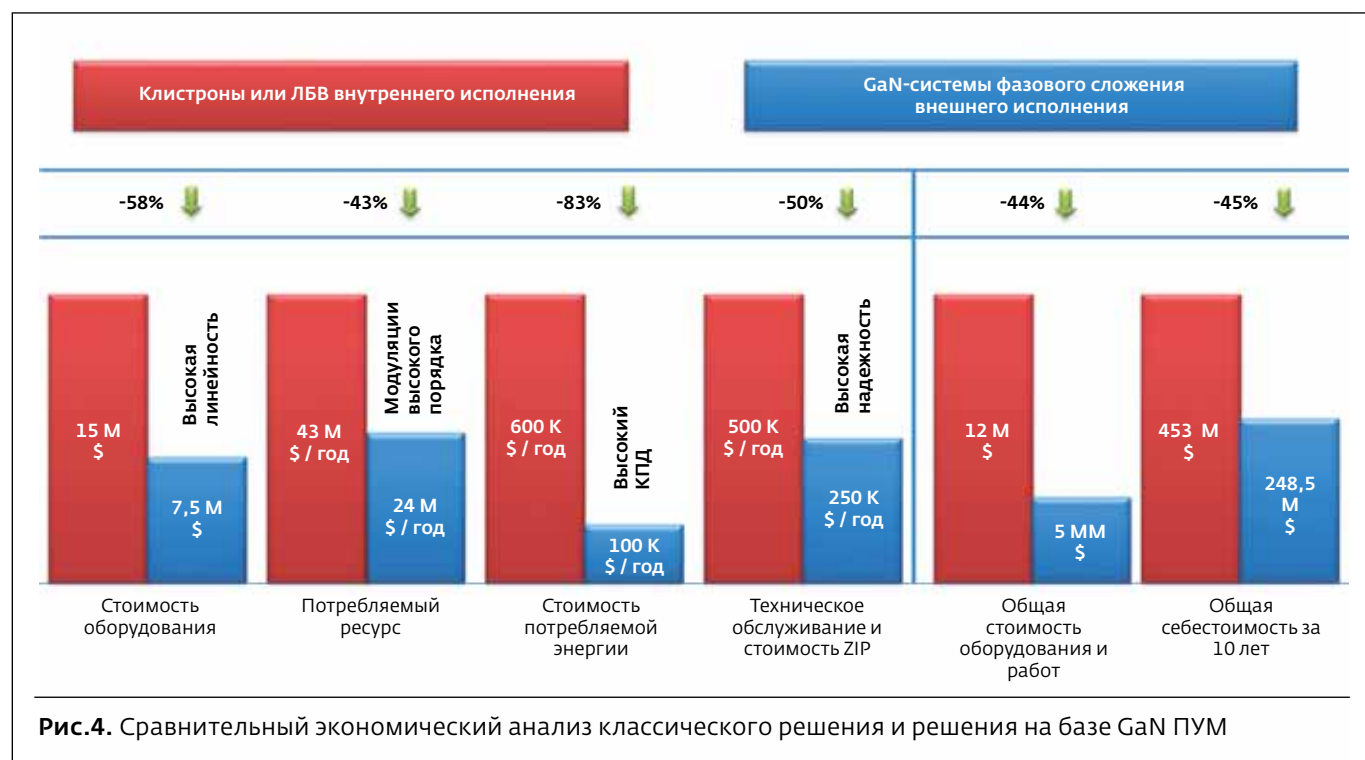
Особенность систем фазового сложения – безобрывное переключение. При выходе из строя одного из модулей никакого переключения на резервный тракт не происходит, просто сдвигается рабочая точка каждого усилителя. Данный процесс абсолютно незаметен для модуляторов DTH-мультиплексов, что существенно повышает надежность работы системы. Компактный дизайн дает возможность разрабатывать высокомощные системы для наружного исполнения, что тоже очень важно для операторов.

Использование GaN ПУМ, объединенных системой фазового сложения, позволяет достигнуть мощностей, которые требуются для реализации DTH головных станций. Высокая линейность усилителей позволяет осуществлять передачу во всем диапазоне для всех вещательных транспондеров, что в комплексе с оптимальным сочетанием цены и качества делает их лидирующими по параметрам решениями в индустрии.

## РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ GaN ПУМ

Первый подобный проект был реализован компанией Advantech Wireless в 2011 году в Японии. На момент его реализации решение считалось экзотическим и неопробованным, и многие операторы относились к нему с опасением. Однако эксплуатация сети показала, что решение обеспечивает беспрецедентную надежность и качество, одновременно с этим позволяя экономить колоссальные средства на операционных расходах. Сегодня все больше операторов проявляют интерес к решению, и было уже установлено несколько подобных систем. Наиболее интересным и показательным примером оптимального соотношения стоимости решения и его качества может быть реализация головной станции DTH-вещания национального оператора Бразилии.

Сеть вещания состоит из двух DTH головных станций, географически разнесенных между собой для организации резервирования. Вещание ведется в Ku-диапазоне. Для передачи сигнала на спутник на каждой станции была установлена двухзеркальная антенна Кассегрена диаметром 13 м. В качестве усилителя мощности используется система фазового сложения мощностью 3,6 кВт на базе GaN ПУМ, аналогичная приведенной на рис.2. Система размещается на пьедестале антенны в непосредственной близости от облучателя, длина волноводного





**Рис.3.** Реализация передающей части головной станции DTH на базе GaN ПУМ и системы фазового сложения компании Advantech Wireless

тракта от системы к облучателю не превышает 2 м (рис.3). Вещание ведется в двух поляризациях, для каждой поляризации используется своя система фазового сложения. В составе каждой системы применяется ВУС (Block-Up Converter), реализованный по схеме горячего резервирования 1+1, сигналы вещания подводятся к антенне в L-диапазоне.

Каждая передающая система позволяет организовать вещание более 40 транспондеров через одну антенную систему. Проведенные измерения при загрузке 50% транспондеров показали беспрецедентные параметры линейности. Уровень интермодуляционных помех составил менее -35 дБ во всем диапазоне передачи, что на 10 дБ ниже рекомендуемых значений. Ожидается, что при полной нагрузке уровень интермодуляционных помех не превысит -30 дБ.

Для оценки преимущества перехода на новое решение оператор провел детальный анализ своих капитальных затрат и возможных операционных расходов. Результаты этого финансового анализа приведены на рис.4. Полученные финансовые результаты показывают существенное сокращение капитальных и операционных расходов оператора при использовании GaN ПУМ. По оценке, использование GaN-технологии позволит оператору сократить операционные расходы на 20 млн. долл. ежегодно.

### Краткие выводы

Использование систем фазового сложения на базе GaN ПУМ решает одну из самых сложных задач дизайна головных станций DTH-вещания. Эта уникальная технология позволяет операторам значительно сократить капитальные и операционные расходы и повысить рентабельность бизнеса.

Применение систем фазового сложения на базе GaN ПУМ не ограничивается DTH, такие системы потенциально представляют интерес для любого крупного оператора систем спутниковой связи, которому требуются высокоомощные усилительные системы, обладающие беспрецедентной линейностью.

Основной выигрыш от использования подобных систем заключается в существенном сокращении числа необходимых антенн большого диаметра, возможности работы на модуляциях высокого порядка, значительном снижении потребления электроэнергии за счет высокого КПД усилителей, меньшем числе антенн с системами антиобледенения и автосопровождения, а также снижении мощности систем кондиционирования и теплоотвода за счет выноса высокоомощных усилителей за пределы помещения узла связи или вещания. ■