



Advantech  
Wireless

## Линейность твердотельных усилителей мощности на базе нитрида галлия.

Cristi Damian, M.E.E.  
Advantech Wireless



### Введение

На сегодняшний день в основе разработки всех новых твердотельных усилителей мощности (Solid State Power Amplifier – SSPA) лежит нитрид-галлиевая (GaN) технология, которая позволяет обеспечить непревзойденные технические характеристики, надежность и эффективность.

Не смотря на большое количество статей и справочных материалов, посвященных GaN-усилителям, к выпуску которых первыми на рынке приступила Advantech Wireless еще в начале 2010 года, некоторые вопросы, касающиеся их производительности и использования, все ещё остаются неосвещенными.

Целью данной статьи является анализ линейности GaN-усилителей мощности Advantech Wireless при работе в односигнальном и многосигнальном режимах. Результаты даны в сравнении с усилителями на ЛБВ. Приведены таблицы соответствия мощностей усилителей на GaN, GaAs и ЛБВ элементах.

### Показатели линейности.

Есть несколько производителей оборудования, принявших отнюдь не тривиальный вызов разработки твердотельных усилителей по GaN-технологии. В настоящей статье представлены результаты измерений характеристик GaN-усилителей мощности компании Advantech Wireless. Результаты измерений, выполненные другими поставщиками, могут отличаться, так как производство твердотельных GaN-усилителей с высокой линейностью является задачей трудной, но в тоже время в случае успешного её решения очень перспективной.

### Односигнальный режим.

Традиционно твердотельные усилители характеризуются двумя уровнями мощности:

1.  $P_{sat}$  – мощность насыщения. Это максимальная мощность, которую может генерировать усилитель. Не рекомендуется эксплуатировать усилитель на уровне  $P_{sat}$ , так как это приведет только к ухудшению параметров радиолинии.
2.  $P_{1dB}$  – уровень компрессии 1 dB. Данный уровень является “критическим уровнем” выходной мощности, который не должен быть превышен. При данном уровне мощности, начинает наблюдаться нелинейность амплитудной характеристики, при этом само значение отстает всего на 0.8 – 1 dB от  $P_{sat}$ . Параметры радиолинии при превышении мощности  $P_{1dB}$  будут резко ухудшаться. Использование модуляции высоких порядков в радиолинии при мощности  $P_{1dB}$  не рекомендуется, так как и амплитуда, и фаза сигнала будут подвержены искажениям.

Однако ни уровень Psat, ни P1dB не дают представления о том, сколько несущих мы можем поднимать одним усилителем и с использованием каких типов модуляций. Для того чтобы определить это необходимы другие параметры.

Помимо этого в характеристиках усилителей на ЛБВ уровень P1dB не определяется, что делает их сравнение с твердотельными усилителями еще более запутанным.

Большое значение в односигнальном режиме имеет уровень внеполосных излучений (или так называемый подрост спектра - spectrum regrowth), которые приводят к появлению нежелательных «плечей» в спектре модулированной несущей. Их уровень должен быть минимален и не превышать определенного значения: -25 dBc при отстройке от центральной частоты спектра на величину символьной скорости для коммерческого применения и -30 dBc для военного применения.

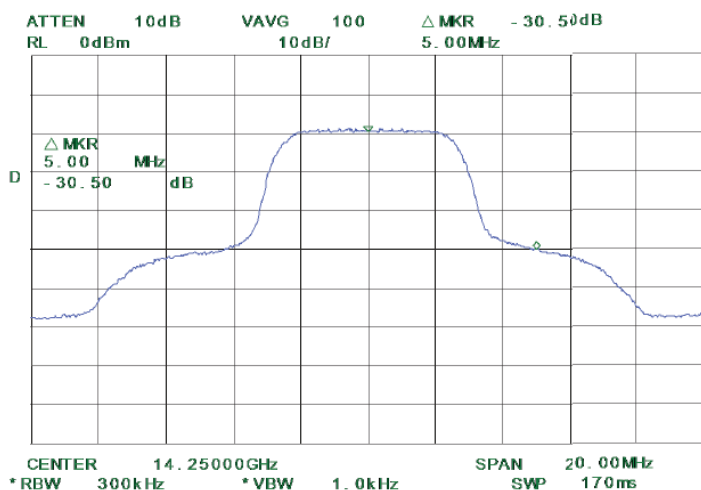


Рис.1 - Внеполосные излучения, GaN-усилитель, уровень мощности 1 dB до Psat (1 dB back off).

Твердотельные усилители на нитриде галлия отличаются лучшими характеристиками, позволяя добиться соответствия данной спецификации при уровне в 1 dB до насыщения (1 dB back off).

Таким образом, получается следующее:

1. Твердотельные усилители предыдущего поколения на базе арсенида галлия могут быть использованы для сигналов с модуляцией 8PSK или 16APSK, для примера, при уровне мощности 3 dB до P1dB.
2. Твердотельные усилители нового поколения на базе нитрида галлия могут быть использованы для сигналов с модуляцией 8PSK или 16APSK, при уровне мощности 1 dB до Psat или при уровне P1dB.

Напрашивающийся вывод в некоторой степени впечатляющий.

Твердотельный усилитель предыдущего поколения на базе арсенида галлия с максимальной мощностью Psat = 250W в односигнальном режиме с использованием модуляций высокого порядка можно использовать только на мощности до 100W. При превышении данной мощности будут генерироваться ошибки, которые в зависимости от требуемого запаса радиолинии могут быть недопустимы.

В свою очередь твердотельный усилитель на базе нитрида галлия с аналогичной максимальной мощностью 250W, может использоваться на мощности до 200W без ухудшения качества радиолинии.

Это равносильно использованию усилителя на арсениде галлия вдвое большей мощности, т.е. 500W.

Таким образом, в данном сравнении усилитель на нитриде галлия является безоговорочным победителем, обеспечивая вдвое больше используемой мощности при равной мощности насыщения Psat.

Вот почему мы считаем, что GaN-технология делает по-настоящему возможным использование самых современных сигнально-кодовых конструкций (modcods), определяемых стандартом DVB-S2.

Для обеспечения тех же самых характеристик радиолинии при использовании усилителя на ЛБВ необходимо обеспечить отступ от насыщения минимум 6 dB (back off), при использовании клистронного усилителя—9-10 dB.

В представленной ниже таблице отображены результаты испытаний твердотельного усилителя на нитриде галлия с несущей 16APSK, при отступе по мощности от 6 dB до 0 dB.

| Total back off | Signal to Noise Ratio (SNR) | Eb/No (dB) |
|----------------|-----------------------------|------------|
| 6 dB           | 15.37                       | 10.75      |
| 3 dB           | 17.26                       | 12.05      |
| 2 dB           | 16.58                       | 12.1       |
| 0 dB           | 15.09                       | 10.68      |

Таб. 1 - GaN-усилитель, односигнальный режим, несущая 16APSK. Зависимость SNR и Eb/No от величины отступа.

## Характеристики GaN-усилителя в односигнальном режиме, несущая 16APSK.

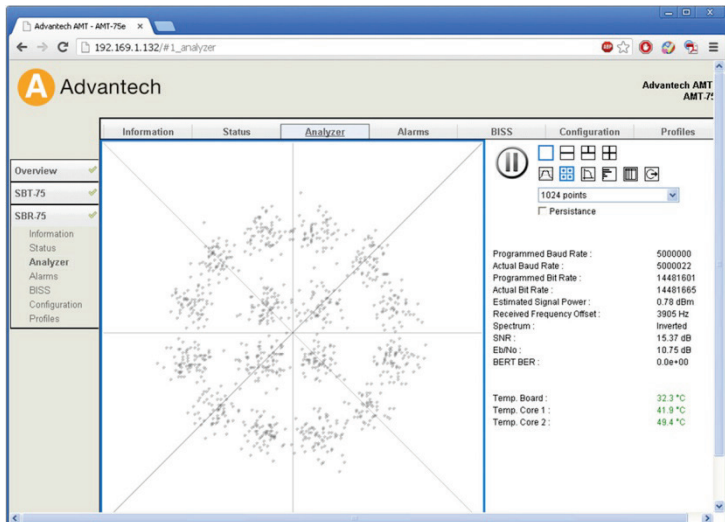


Рис. 2 – Диаграмма 16APSK, отступ 6 db от Psat

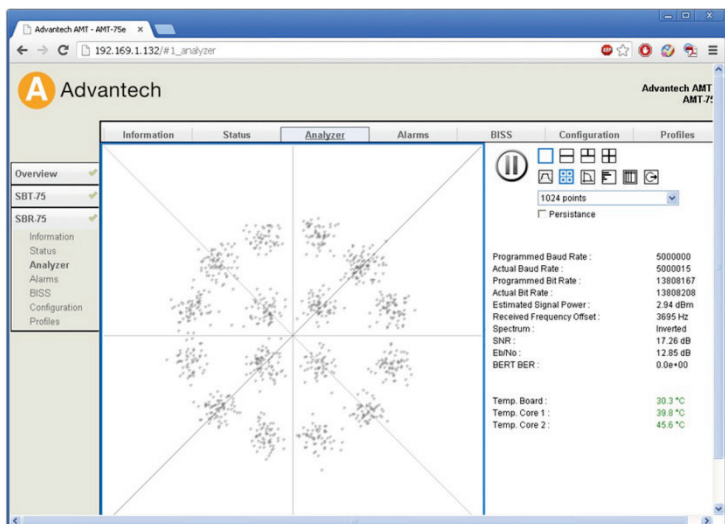


Рис. 3 - Диаграмма 16APSK, отступ 3 db от Psat

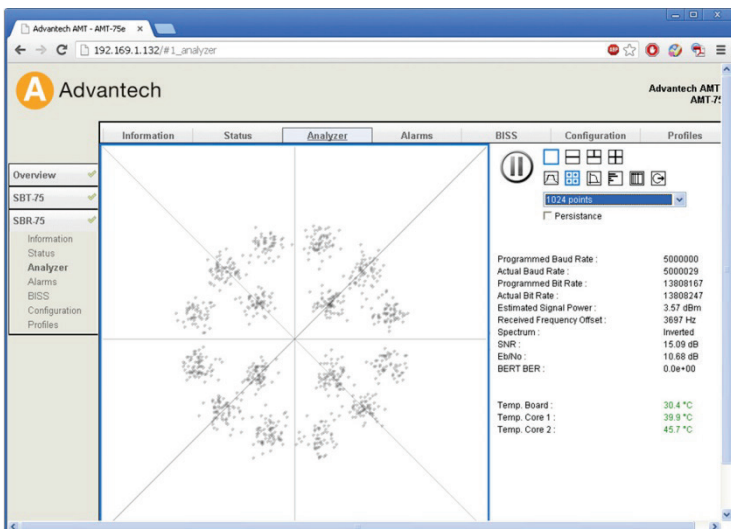


Рис. 4 - Диаграмма 16APSK, отступ 1 db от Psat

## Работа в многосигнальном режиме.

В многосигнальном режиме основным параметром, определяющим работу традиционных усилителей, является уровень продуктов интермодуляции третьего порядка или IM3.

Обычно требуется, чтобы две несущие, разнесённые на 5 Mhz, не приводили к появлению продуктов интермодуляции 3-го порядка уровнем более -25dBc

Это было достаточно, когда все модемы работали на промежуточной частоте 70 Mhz, а передача сигналов ограничивалась одним транспондером.

Современные модемы могут работать в полосе частот покрывающей весь диапазон частот спутника, а один усилитель способен одновременно ввести в насыщение все транспондеры спутника поднятыми несущими.

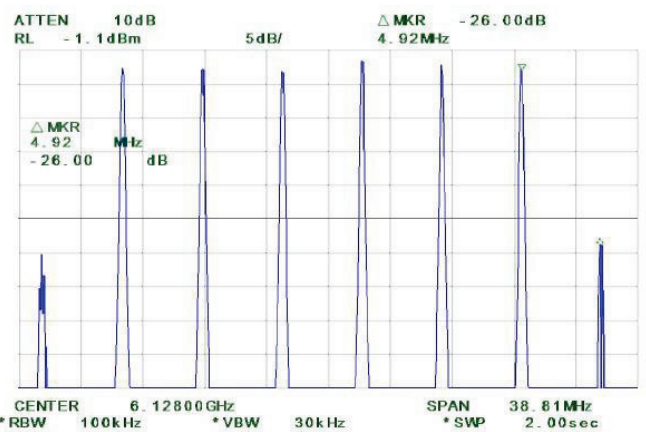


Рис. 5 - Характеристика IM3 в многосигнальном режиме

Однако в настоящий момент нет полной информации о том, как ведут себя твердотельные усилители в многосигнальном режиме. Данный вопрос будет предметом следующей части.

Для анализа поведения в многосигнальном режиме был протестирован GaN-усилитель Ku-диапазона с использованием от 2 до 16 несущих и измерением соответствующих значений IM3.

Для воспроизведения реальных условий работы с максимальной точностью все несущие были модулированными, чистые несущие (CW) не использовались.

Результаты тестирования были сравнены с опубликованными результатами подробных тестов, проведенных на усилителях мощности на ЛБВ.

Полученные результаты говорят сами за себя. GaN-усилитель превосходит по техническим характеристиками усилители на ЛБВ и клистронах, обеспечивая более высокую выходную мощность в линейном режиме, недостижимую при использовании усилителей, выполненных на базе любых других технологий.

Представленная ниже таблица показывает общий отступ от насыщения (back off), требуемый для GaN-усилителя Advantech Wireless мощностью 1.2 kW при работе в многосигнальном режиме с несущими в количестве от 1 до 24, для соответствия требованию по продуктам интермодуляции 3-го порядка (IM3) -25 dBc.

Интересно то, что после достижения отступа 6 dB от насыщения, общее количество несущих не влияет на значение IM3. При использовании от 8 до 24 несущих всё что необходимо – это обеспечить отступ 6 dB от насыщения.

| Number of carriers | Actual Intermodulation (dBc)                    | Total Output Power, 1250W Ku-band GaN | Total back off relative to Psat (dB) |
|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
|                    |   | SSPA (dBm)                            |                                      |
| 1 carrier          | Meets - 25 dBc spectrum regrowth specifications | 58.5                                  | 1                                    |
| 2 carriers         | -27.3   | 57                                    | 2                                    |
| 3 carriers         | -25.5   | 55.5                                  | 3.5                                  |
| 4 carriers         | -25.17  | 54.8                                  | 4.2                                  |
| 5 carriers         | -25.50  | 54.5                                  | 4.5                                  |
| 6 carriers         | -26.67  | 54.3                                  | 4.7                                  |
| 7 carriers         | -25.50  | 54.2                                  | 4.8                                  |
| 8 carriers         | -25.16  | 54.0                                  | 4.9                                  |
| 9 carriers         | -25.3   | 53.8                                  | 5.1                                  |
| 10 carriers        | -25.3   | 53.8                                  | 5.1                                  |
| 11 carriers        | -26.66  | 53.6                                  | 5.3                                  |
| 12 carriers        | -25.5   | 53.5                                  | 5.5                                  |
| 13 carriers        | -25.67  | 53.4                                  | 5.6                                  |
| 14 carriers        | -25.17  | 53.2                                  | 5.8                                  |
| 15 carriers        | -25.5   | 53.0                                  | 6.0                                  |
| 16 carriers        | -25.0   | 53.0                                  | 6.0                                  |
| 24 carriers        | -25 dBc   | 53.0                                  | 6.0                                  |

Таб. 2 - Зависимость выходной мощности GaN-усилителя мощностью 1.250 KW от количества несущих при соответствии требованиям -25 dBc по IM3.

Следующая таблица была составлена с использованием опубликованной информации относительно линейности ЛБВ усилителя мощностью 1.2kW при тех же условиях тестирования.

| Number of carriers | Actual Intermodulation (dBc) | Total Output Power, 1250W Ku-band linearized TWT (dBm) | Total back off relative to Psat (dB) |
|--------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| 1 carrier          | N/A                          | 57.3   | 3.6                                  |
| 2 carriers         | < - 25 dBc                   | 57.3   | 3.6                                  |
| 3 carriers         | < - 25 dBc                   | 55.5   | 4.75                                 |
| 4 carriers         | < - 25 dBc                   | 54.3   | 6.0                                  |
| 5 carriers         | < - 25 dBc                   | 53.4   | 6.84                                 |
| 6 carriers         | < - 25 dBc                   | 52.75  | 7.54                                 |
| 7 carriers         | < - 25 dBc                   | 52.1   | 8.20                                 |
| 8 carriers         | < - 25 dBc                   | 51.6   | 8.65                                 |
| 9 carriers         | < - 25 dBc                   | 51.3   | 8.95                                 |
| 10 carriers        | < - 25 dBc                   | 51.1   | 9.25                                 |
| 11 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.9   | 9.38                                 |
| 12 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.8   | 9.50                                 |
| 13 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.7   | 9.60                                 |
| 14 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.6   | 9.70                                 |
| 15 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.5   | 9.80                                 |
| 16 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.43  | 9.87                                 |
| 24 carriers        | < - 25 dBc                   | 50.4   | 10.20                                |

Таб. 3 - Зависимость выходной мощности ЛБВ усилителя с линеаризатором мощностью 1.250 KW от количества несущих при соответствии требованиям -25 dBc по IM3.

Данные таблицы представляют ключевую информацию о работе в многосигнальном режиме твердотельного усилителя на нитриде галлия и усилителя на ЛБВ.

- Прежде всего, для GaN-усилителей предельное значение отступа составляет 6dB, что позволяет увеличивать количество несущих без увеличения отступа (back off). Тогда как для усилителей на ЛБВ, увеличение количества несущих всегда ведет к увеличению отступа.
- При работе в многосигнальном режиме до 4 несущих, усилители обоих классов ведут себя примерно одинаково, однако при увеличении количества несущих разница становится существенной.
- При работе с шестью и более несущими GaN-усилители требуют на 3-5 dB меньший отступ от Psat, чем линеаризованные усилители на ЛБВ.
- Видно, что 1.2 kW ЛБВ усилитель, работающий с 10 и более несущими, обеспечивает только половину той мощности, которую может обеспечить 1.2kW GaN-усилитель Ku-диапазона.

Другими словами 1.2 kW ЛБВ усилитель не является эквивалентом 1.2 kW GaN-усилителю, ему соответствует 500W GaN-усилитель. Данное обстоятельство является существенным при проектировании систем связи, значительно влияющим на стоимость проекта. Капитальные и операционные затраты будут значительно ниже при использовании 500W GaN-усилителя.

Следующие графики отражают результат проведенных тестов и показывают разницу между усилителями на базе GaN и ЛБВ.

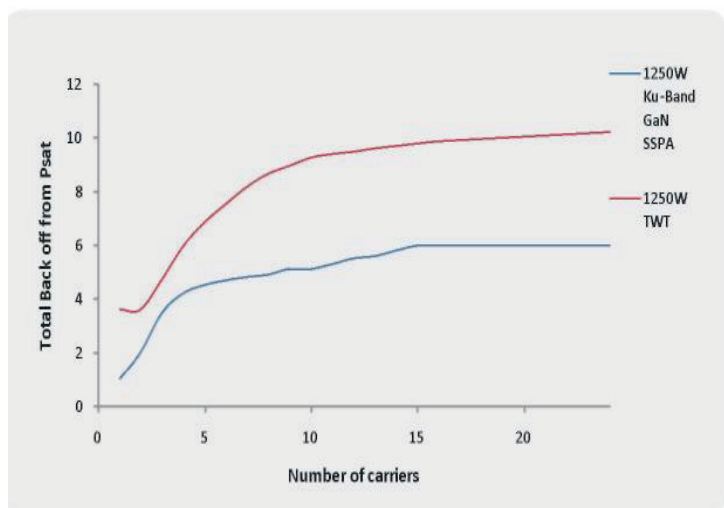


Рис. 6 - Зависимость значения отступа (back off) от количества несущих.

Голубая линия: 1250 W GaN-усилитель Ku-диапазона

Красная линия: 1250 W ЛБВ усилитель с линейризатором Ku-диапазона

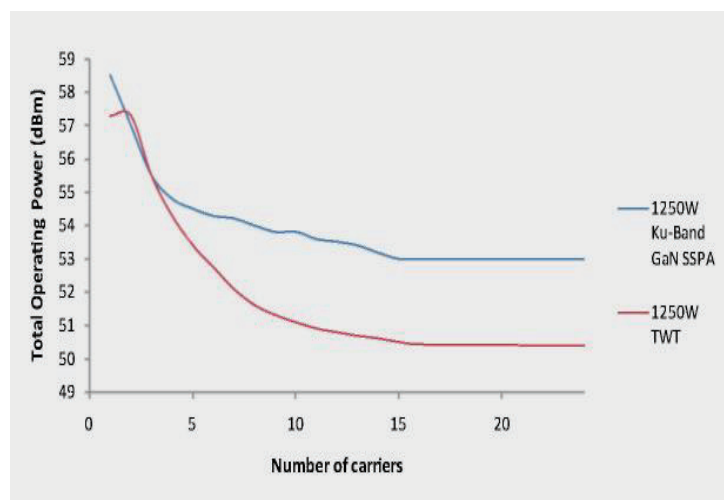


Рис. 7 - Зависимость мощности усилителя от количества несущих.

Голубая линия: 1250 W GaN-усилитель Ku-диапазона

Красная линия: 1250 W ЛБВ усилитель с линейризатором Ku-диапазона

## Руководство по быстрому выбору усилителя

На настоящий момент принцип выбора усилителя по мощности насыщения более не может быть достаточным. Это делает задачу разработчика систем связи более сложной. Цель данной части – предоставить простое руководство по выбору усилителя мощности.

В ближайшей перспективе, по нашему мнению, использование модуляции высоких порядков найдет широкое применение на фоне непрерывного увеличения объемов передаваемого трафика. На наш взгляд приведенные ниже рекомендации будут полезны для применения.

Приведенные далее таблицы эквивалентности предназначены для помощи в выборе усилителя.

При их составлении использовались следующие предположения:

1. Максимально допустимое значение коэффициента АМ/ФМ преобразования не более 1град/dB для возможности использования схем модуляций высоких порядков, определяемых стандартом DVB-S2.
2. Уровень внеполосных излучений не более -25 dBc для исключения интерференции между соседними несущими.
3. Передается несколько несущих, высокоскоростных, широкополосных, с использованием модуляций высоких порядков, подобно тем какие используются в вещании.

Однако следует отметить, что каждый случай является особенным, поэтому рекомендуется всегда проводить соответствующий анализ бюджета радиолинии. Выбор усилителя мощности требует соответствующих знаний параметров спутника, размера антенной системы, зоны покрытия спутника, затухания сигнала в осадках, требований к доступности радиолинии.

## Случай 1 - Таблица эквивалентности, односигнальный режим.

| No.            | GaN SSPA | Previous generation GaAs SSPA | TWT technology        |
|----------------|----------|-------------------------------|-----------------------|
| <b>C-band</b>  |          |                               |                       |
| 1              | 200W     | 300W                          | 400W Linearized TWT   |
| 2              | 350W     | 500W                          | 750W Linearized TWT   |
| <b>X-band</b>  |          |                               |                       |
| 3              | 300W     | 400W                          | 500W Superlinear TWT  |
| 4              | 400W     | 500W                          | 750W Linearized TWT   |
| <b>Ku-band</b> |          |                               |                       |
| 5              | 80W      | 100W                          | 200W Linearized TWT   |
| 6              | 100W     | 150 W                         | 250W Superlinear TWT  |
| 7              | 200W     | 300W                          | 400W Linearized TWT   |
| 8              | 250W     | 350 W                         | 400W Superlinear TWT  |
| 9              | 400W     | 500W                          | 750W Linearized TWT   |
| 10             | 600W     | 700W                          | 1250W Superlinear TWT |

## Случай 2 - Таблица эквивалентности, многосигнальный режим (5-9 несущих).

| No.            | GaN SSPA | Previous generation GaAs SSPA | TWT technology        |
|----------------|----------|-------------------------------|-----------------------|
| <b>C-band</b>  |          |                               |                       |
| 1              | 150 W    | 200W                          | 400W Linearized TWT   |
| 2              | 250W     | 300W                          | 750W Linearized TWT   |
| <b>X-band</b>  |          |                               |                       |
| 3              | 250W     | 300W                          | 500W Superlinear TWT  |
| 4              | 300W     | 400W                          | 750W Linearized TWT   |
| <b>Ku-band</b> |          |                               |                       |
| 5              | 80W      | 100W                          | 200W Linearized TWT   |
| 6              | 80W      | 100 W                         | 250W Superlinear TWT  |
| 7              | 200W     | 250W                          | 400W Linearized TWT   |
| 8              | 250W     | 300 W                         | 400W Superlinear TWT  |
| 9              | 300W     | 400W                          | 750W Linearized TWT   |
| 10             | 600W     | 700W                          | 1250W Superlinear TWT |

## Случай 3. - Таблица эквивалентности, многосигнальный режим (10 несущих и более)

| No.            | GaN SSPA | Previous generation GaAs SSPA | TWT technology        |
|----------------|----------|-------------------------------|-----------------------|
| <b>C-band</b>  |          |                               |                       |
| 1              | 100W     | 125 W                         | 400W Linearized TWT   |
| 2              | 200W     | 250W                          | 750W Linearized TWT   |
| <b>X-band</b>  |          |                               |                       |
| 3              | 150W     | 200W                          | 500W Superlinear TWT  |
| 4              | 300W     | 250W                          | 750W Linearized TWT   |
| <b>Ku-band</b> |          |                               |                       |
| 5              | 60W      | 70W                           | 200W Linearized TWT   |
| 6              | 70W      | 80 W                          | 250W Superlinear TWT  |
| 7              | 125 W    | 150W                          | 400W Linearized TWT   |
| 8              | 200W     | 250 W                         | 400W Superlinear TWT  |
| 9              | 250W     | 300W                          | 750W Linearized TWT   |
| 10             | 500W     | 600W                          | 1250W Superlinear TWT |

В многосигнальном режиме, например с 16 несущими, 250W GaN-усилитель Ku-диапазона будет эквивалентен 750W ЛБВ усилителю с линейризатором Ku-диапазона.

Эквивалентом 500W GaN-усилителю Ku-диапазона является 1.2 KW усилитель на ЛБВ с линейризатором.

Тогда как 1.2 KW GaN-усилитель серии SapphireBlu™ в данном случае не будет иметь аналогов среди ЛБВ усилителей.

Таким образом, мы видим, что твердотельные усилители на нитриде галлия идеально подходят для обоих случаев применения. В односигнальном режиме они предлагают максимум мощности, в многосигнальном режиме – требуют минимальный отступ (back off).

Разница стала еще более очевидной, с появлением нового поколения систем фазового сложения мощностей GaN-модулей.

Данные высокоомощные усилительные системы компании Advantech Wireless позволяют обеспечить до 3.6 kW в диапазоне Ku и 6.6 kW в диапазоне Си X.

Особенность данных систем состоит в том, что их архитектура предлагает уже встроенное резервирование, обеспечивающее работу с защитой от неисправностей. Если один из модулей выходит из строя, общая мощность уменьшится приблизительно на 1 dB, при этом данное падение будет автоматически скомпенсировано системой контроля выходной мощности.

Замена неисправного модуля не требует много времени и занимает в среднем 30 минут.

Другой интересной особенностью модульных систем фазового сложения является более низкий уровень интермодуляционных составляющих, в сравнении с одиночным твердотельным усилителем.

Данное обстоятельство кажется странным на первый взгляд, но оно имеет очевидное объяснение.

При синфазном сложении мощностей нескольких твердотельных усилителей, мощность суммируется когерентно, т.е. складывается с одинаковой фазой и амплитудой. Продукты интермодуляции третьего порядка IM3 не суммируются когерентно, и в большинстве случаев гасят друг друга.

Сказанное можно наблюдать при работе реально действующих систем, что отражено на рисунках ниже.

На рисунке 8 представлена группа несущих при работе одиночного твердотельного GaN-усилителя, продукты интермодуляции легко различимы. Тогда как на рисунке 9, который представляет работу 2.5 kW восьмимодульной усилительной системы с фазовым сложением мощности, они не видны или как минимум значительно меньше по уровню. Отступ в обоих случаях одинаков.

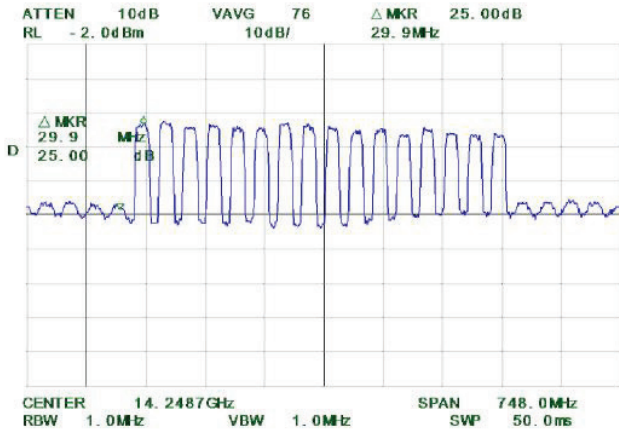


Рис 8 - GaN-усилитель Ku-диапазона, 16 несущих, отступ 6 dB, интермодуляционные составляющие видны справа и слева от несущих.

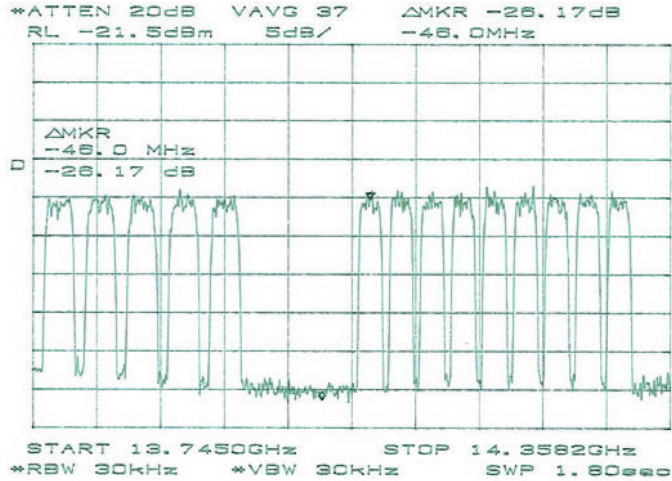


Рис 9 - 2.4 kW усилительная система на базе GaN-модулей Ku-диапазона, многосигнальный режим, отступ 6 dB, интермодуляционные составляющие не видны (минимальны).

3kW усилительная система на базе GaN-моделей Ku-диапазона преодолевает все существовавшие ранее барьеры.

В односигнальном режиме данная система может работать с несущей на мощности 2 kW. Ни ламповый, ни клистронный усилители не способны на это.



Рис. 10- 2.5kW усилительная система SapphireBlu™ на базе GaN-модулей Ku-диапазона

Также система способна обеспечить работу 24 несущих при мощности 600W в полосе более 750 Mhz.

Это было бы эквивалентом 6kW ЛБВ усилителю с линейризатором, если бы подробный усилитель был доступен.

6 kW клистронный усилитель не является альтернативой в данном случае, так как его полоса частот ограничена 80 MHz.

Насколько известно, усилители на ЛБВ мощностью 6 KW в настоящий момент еще не производятся. Исходя из вышесказанного, мы подходим к окончательному выводу.

Очевидно, что продолжавшийся в течение 50 лет спор между твердотельными усилителями и усилителями на ЛБВ подходит к своему завершению.

На сегодняшний день, твердотельные усилители на базе нитрида галлия значительно превосходят аналоги на ЛБВ и клистронах.

GaN-усилители предлагают сочетание высокой мощности и широкой полосы рабочих частот, которое недостижимо при использовании любых других технологий.

Они предлагают более высокие надежность и эффективность.

Данная технология является превосходным образцом, который удовлетворит текущие и будущие потребности отрасли спутниковой связи, а также послужит базой для создания новых, впечатляющих разработок, которые еще только зарождаются.

## ПРЕДСТАВИТЕЛСТВА ADVANTECH WIRELESS

### RUSSIA & CIS

Tel: +7 495 971 5918

info.russia@advantechwireless.ru

### USA

Tel: +1 703 659 9796

info.usa@advantechwireless.com

### Canada

Tel: +1 514 420 0045

info.canada@advantechwireless.com

### United Kingdom

Tel: +44 1480 357 600

info.uk@advantechwireless.com

### SOUTH AMERICA

Tel: +1 514 420 0045

info.latam@advantechwireless.com

### Brazil

Tel: +55 11 3054 5701 (São Paulo)

Tel: +55 21 3578 5632 (Rio de Janeiro)

info.brazil@advantechwireless.com

### Venezuela

Tel: +58 21 2844 3545

info.venezuela@advantechwireless.com

### Mexico

Tel: +521 55 5435 4989

info.mexico@advantechwireless.com

### Colombia

Tel: +57 315 596 1857

info.colombia@advantechwireless.com

### ASIA PACIFIC

Tel: +1 514 420 0045 ext. 3116

info.asia@advantechwireless.com

### INDIA

Tel: +91 33 2415 5922

info.india@advantechwireless.com



**Advantech  
Wireless**