

Импульсный усилитель мощности X-диапазона на GaN СВЧ транзисторах: опыт изготовления

Герасимов А. О., Синкевич В. Ф., Миннебаев В. М., Редька А. В.

Представлены результаты изготовления и настройки опытного образца импульсного 500-ваттного усилителя мощности X-диапазона на GaN СВЧ полевых транзисторах и описание конструкции усилителя. Разработана методика настройки и контроля СВЧ параметров модуля ВУМ, предотвращающая выход усилителя из строя. Рассмотрены вопросы повышения эффективности сложения выходной СВЧ мощности усилителя и снижения потерь в СВЧ тракте усилителя. Определены пути совершенствования конструкции и увеличения выходной мощности усилителя. Усилитель предназначен для работы в составе выходных трактов передатчиков систем связи и радиолокации X-диапазона.

Введение

Нитрид-галлиевые гетероструктурные полевые транзисторы (GaN HEMT) открывают новую страницу в развитии параметров мощных усилителей СВЧ диапазона. В нитрид-галлиевой технологии соединяются преимущества, важные для создания активных приборов и устройств на их основе: высокое напряжение питания (28-50 В), высокий КПД (более 60%), возможность работы в классе АВ, высокое усиление, малые ёмкости активной структуры, высокая удельная выходная мощность (более 5 Вт/мм), высокие пробивные напряжения (до 100-140 В), что позволяет увеличить рабочие напряжения и выходную мощность в импульсных режимах работы [1-8].

При проектировании и изготовлении СВЧ модулей выходных усилителей мощности (ВУМ) существует множество факторов, которые определяют тактико-технические параметры устройства. Выбор элементной базы, конструкций узлов сумматоров и делителей мощности, элементов СВЧ тракта, транзисторов и режимов их работы, способов корректировки фазочастотных характеристик, качество сборки – всё это непосредственно влияет на СВЧ характеристики усилителя. Помимо этого важна и методика измерения СВЧ характеристик. Основной целью разработки методик измерения и настройки модуля ВУМ является достижение максимальной выходной мощности в заданном диапазоне частот при минимизации затрат рабочего времени. В статье рассматриваются изменения, внесённые в конструкцию усилителя для обеспечения эффективного сложения СВЧ мощности, а также определены перспективы модернизации конструкции модуля ВУМ и оценивается экономия времени, затрачиваемого на настройку, на основе опытных данных.

Постановка задачи

Для получения максимальной выходной мощности в многокаскадном импульсном усилителе X-диапазона на GaN транзисторах [9] необходима методика, позволяющая оптимально и эффективно настроить усилитель на максимум коэффициента передачи в заданном диапазоне частот. При формировании заданной АЧХ модуля ВУМ, имеющего многокаскадную структуру, необходимо систематизировать порядок этапов настройки усилителя. Последовательная корректировка АЧХ отдельных каскадов модуля в различных сечениях усилителя и контроль деления/суммирования мощностей показали неэффективность такого подхода вследствие отсутствия электромагнитной экранировки между каскадами и значительной величины случайной погрешности при перестыковке

измерительной оснастки. Кроме того, данный метод настройки является трудоёмким, недостаточно эффективным и подходит только на самых первых этапах работы с усилителем, когда необходимо выявить недостатки конструкции, влияющие на СВЧ параметры усилителя. При мелкосерийном производстве, когда необходимо воспроизведение результатов, полученных на опытных образцах, требуется методика настройки, позволяющая качественно и быстро решить поставленную задачу. В основу методики должны быть положены критериальные параметры, по которым можно судить об эффективности настройки СВЧ тракта на каждом этапе работы без нарушения его целостности, снизив таким образом величину случайной погрешности.

Конструкция модуля ВУМ

Выходной импульсный усилитель мощности представляет собой многокаскадный усилитель X-диапазона 9,7-10,7 ГГц, имеющий 3-ступенчатую древовидную систему деления и суммирования СВЧ мощности с использованием сумматора «гибридное кольцо». Внешний вид усилителя со снятыми крышками представлен на рис. 1.

Усилитель является модулем класса «система в корпусе» (СВК) [10]. В состав ВУМ входят:

- предварительный усилитель мощности (ПУМ); модуль ПУМ, выполненный в виде субблока и располагающийся на обратной стороне усилителя, включает в себя шестиразрядный фазовращатель, пятиразрядный аттенуатор, две ГИС усилителей мощности и выходной внутрисогласованный СВЧ транзистор;

- 14 мощных внутрисогласованных GaN СВЧ транзисторов; в качестве делителей и сумматоров используются микрополосковые мосты типа «гибридное кольцо», выполненные на поликоровой подложке толщиной $H = 1$ мм.

Внешний вид выходной части СВЧ тракта модуля ВУМ показан на рис. 2:

- вторичный источник питания (ВИП);
- шесть модуляторов питания СВЧ транзисторов [11];
- цифровая плата управления и диагностики (ЦБУ), осуществляющая формирование сигналов для модуляторов питания, фазовращателей и аттенуаторов и выдающая диагностические команды;
- входной микрополосковый ферритовый вентиль;
- выходные волноводные ферритовые вентили;
- волноводный сумматор с механическими фазовращателями в каждом плече.

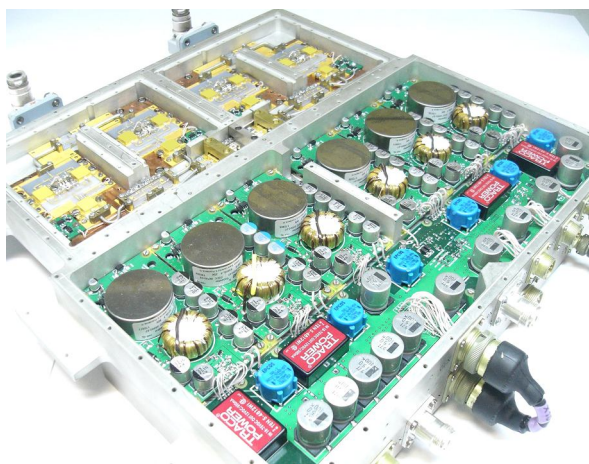


Рис. 1

Внешний вид модуля ВУМ X-диапазона

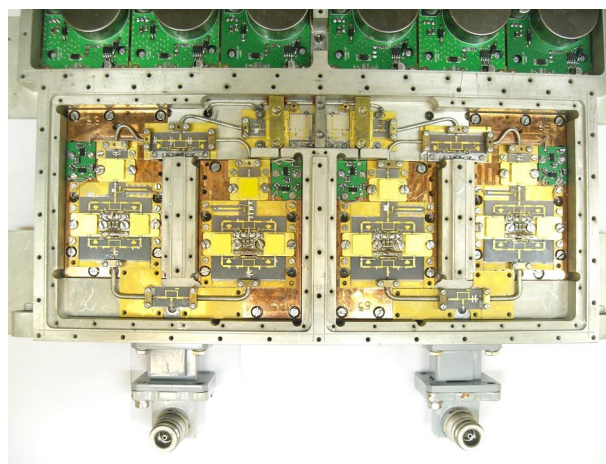


Рис. 2

Выходная часть СВЧ тракта модуля ВУМ

Режим работы усилителя – импульсный, система охлаждения – жидкостная. Блок-схема модуля ВУМ представлена на рис. 3.

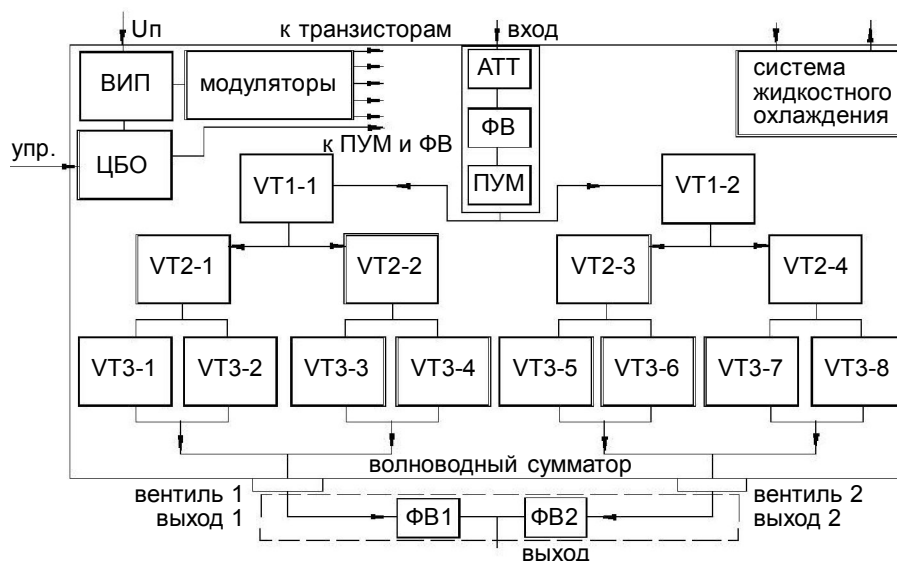


Рис. 3

Блок-схема ВУМ с механическими фазовращателями на выходе, встроенными в суммирующий волновод

Методика настройки СВЧ усилителя

Мощность на входе модуля ВУМ задана на уровне 1 мВт, выходная мощность должна составлять не менее 500 Вт. Ниже приведена таблица, в соответствии с которой происходит настройка усилителя для получения необходимой выходной мощности и вычислены минимальные коэффициенты передачи, необходимые для получения заданного уровня выходной мощности.

Таблица

Минимальный коэффициент усиления модуля ВУМ

Настраиваемая часть усилителя	Коэффициент усиления, дБ
1/8	не менее 39
1/4	не менее 45
1/2	не менее 51
1	не менее 57

Если настройка модуля ВУМ ведётся без волноводного сумматора в сечениях «выход 1» и «выход 2» (рис. 3), то коэффициенты передачи должны быть увеличены на 3 дБ (соответственно не менее 42 дБ, 48 дБ, 54 дБ).

При настройке усилителя мощности могут использоваться два метода:

1. первый метод заключается в последовательном контроле коэффициента усиления и разности фаз на каждом этапе деления и суммирования мощностей. При этом на выходе соответствующего делителя мощности вместо транзистора устанавливается измерительный полосково-коаксиальный переход, с помощью которого и осуществляется измерение коэффициента передачи K_p или выходной мощности $P_{\text{вых}}$. Данный способ измерения и настройки обладает рядом недостатков: высокой чувствительностью к ошибкам оператора (случайная погрешность), невозможностью учёта внутрисистемной ЭМС, высокими временными затратами, связанными с переустановкой транзисторов и полосково-коаксиальных переходов;

2. второй метод основывается на комбинированном включении импульсных напряжений питания $U_{\text{си}}$ GaN транзисторов по определённому алгоритму при сохранении целостности СВЧ тракта модуля ВУМ.

Алгоритм подачи напряжений питания $U_{\text{си}}$ следующий:

– при измерении и настройке K_p 1/8 части модуля ВУМ питания $U_{\text{си}}$ подаются на цепочку транзисторов VT1-1/VT2-1/VT3-1 или другие семь симметричных цепочек транзисторов;

– при измерении и настройке K_p 1/4 части модуля ВУМ питания $U_{\text{си}}$ подаются на цепочку транзисторов VT1-1/VT2-1/VT3-1+VT3-2 или другие три симметричные цепочки транзисторов;

– при измерении и настройке K_p 1/2 части модуля ВУМ питания $U_{\text{си}}$ подаются на цепочку транзисторов VT1-1/VT2-1+VT2-2/VT3-1+VT3-2+VT3-3+VT3-4 или вторую симметричную цепочку транзисторов;

– при измерении и настройке коэффициента передачи модуля ВУМ питания $U_{\text{си}}$ подаются на все транзисторы.

Данный метод позволяет хорошо контролировать все ступени усилителя и добиваться от них повторяемости как по фазе, так и коэффициенту усиления по мощности. Электродинамические расчёты и последующие измерения образцов показали, что развязка сумматора «гибридное кольцо» составляет не менее 20 дБ в заданном диапазоне частот. Это оказалось достаточным для того, чтобы отличие входных и выходных импедансов СВЧ транзисторов во включенном и выключенном состоянии, находящихся в одном плече сумматора/делителя, не оказывало существенного влияния на амплитудные и фазовые характеристики транзистора, расположенного во втором плече сумматора или делителя. Поэтому технически методика заключается в подаче напряжений питания только на транзисторы тех цепочек усилителя, которые участвуют в данный момент в настройке.

Например, при получении удовлетворительного результата в 1/8 части модуля ВУМ в соответствии с таблицей минимальных коэффициентов усиления в цепи VT1-1/VT2-1/VT3-1 усиление должно составить не менее 39 дБ. Далее происходит калибровка векторного анализатора цепей по фазе и коэффициенту передачи в рабочем диапазоне частот через включённый и настроенный СВЧ тракт. Затем питание транзистора VT3-1 отключается и подаётся на транзистор VT3-2. Далее происходит сравнение коэффициента передачи и фазы цепи VT1-1/VT2-1/VT3-2 относительно калиброванной цепи VT1-1/VT2-1/VT3-1. Выполняется необходимая подстройка и «сведение» двух 1/8 частей по фазочастотным характеристикам с помощью разомкнутых микрополосковых шлейфов с целью достижения максимального коэффициента передачи. На следующем этапе стокое питание подаётся на оба транзистора VT3-1 и VT3-2, при этом коэффициент усиления необходимо привести к значению 1/4 части усилителя в соответствии с определённым в таблице значением не менее 45 дБ. Настройка осуществляется в той части СВЧ тракта, которая является общей для данных цепочек транзисторов. Измерение АЧХ и ФЧХ трёх других четвертей модуля ВУМ происходит аналогичным образом. Настроенные по фазе и коэффициенту передачи поочередно, четверти отключаются по напряжению питания в сечении вторых транзисторов. Этого достаточно, чтобы четверти не влияли на измеряемые параметры друг друга.

Дальнейшее «сведение» каналов проходит в аналогичной последовательности: отдельно проводится сравнение и настройка K_p , ΔK_p и фазы $\Delta\varphi$ двух пар четвертей VT1-1/VT2-1/VT3-1+VT3-2, VT1-1/VT2-2/VT3-3+VT3-4 и VT1-2/VT2-3/VT3-5+VT3-6, VT1-2/VT2-4/VT3-7+VT3-8. Измеренная разница между характеристиками ΔK_p и $\Delta\varphi$ для двух четвертей модуля ВУМ представлена на рис. 4. Как видно из результатов измерений, $\Delta K_p < \pm 0,8$ дБ, а $\Delta\varphi < \pm 12^\circ$, что приводит к потере суммарной выходной мощности

менее 0,2 дБ.

После выполнения операций по выравниванию фазы четвертей модуля можно переходить к сравнению характеристик K_p , ΔK_p и $\Delta\varphi$ двух половин модуля ВУМ: VT1-1/VT2-1+VT2-2/VT3-1+VT3-2+VT3-3+VT3-4 и VT1-2/VT2-3+VT2-4/VT3-5+VT3-6+VT3-7+VT3-8, коэффициент усиления каждой из которых в соответствии с таблицей должен быть $K_p \geq 51$ дБ, а при совместной работе $K_p \geq 57$ дБ. Начальный разброс фаз и коэффициента передачи двух половин усилителя, а также результат их изменения после корректировки представлены на рис. 5. Результаты измерений показывают, что проведённая настройка снизила неравномерность коэффициентов усиления с $\Delta K_{p,НАЧ} < \pm 1,5$ дБ до $\Delta K_{p,ПЕЗ} < \pm 0,8$ дБ, разности фаз с $\Delta\varphi_{НАЧ} < 50 \pm 12^\circ$ до $\Delta\varphi_{ПЕЗ} < \pm 12^\circ$. Таким образом, потери суммарной выходной мощности снижены с $\Delta L_{ВЫХ,НАЧ} \approx 1,2$ дБ до $\Delta L_{ВЫХ,НАЧ} \leq 0,2$ дБ.

На этом этапе настройки модуля ВУМ при измерении АЧХ, ФЧХ и калибровке тракта используется отключение питания транзисторов VT1-1 и VT1-2. Типовые измеренные значения коэффициентов усиления для 1/8, 1/4, 1/2 и модуля ВУМ в целом представлены на рис. 6.

При измерении параметров K_p , ΔK_p , $P_{ВЫХ}$ и $\Delta\varphi^\circ$ использовалось стандартное измерительное оборудование:

- векторный анализатор цепей R&S ZVL14;
- генератор сигналов высокочастотный Agilent E8257D;
- генератор импульсов специальной формы Agilent 33220A;
- калориметрический измеритель мощности M3-52.

При работе над усилителем мощности оказалось ощутимым влияние разности фаз GaN СВЧ транзисторов на получение максимальной выходной мощности. Поэтому в усилителе использовались транзисторы с одинаковыми фазочастотными характеристиками. Эксперименты показали, что в одной партии транзисторов могут быть экземпляры, начальная фаза которых отличается друг от друга на $\Delta\varphi_{НАЧ} = 20-25^\circ$. Поэтому необходимо отбирать транзисторы не только по амплитудным, но и по фазовым характеристикам перед установкой в усилитель. Влияние на АЧХ и ФЧХ модуля ВУМ оказывают качество сборки ГИС сумматоров/делителей, транзисторов, зазоры между ними.

В конструкции модуля ВУМ предусмотрены фазовращатели (рис. 1), встроенные в плечи волноводного сумматора. Такое решение позволяет пересмотреть последовательность выполнения методики настройки и упростить фазирование двух частей усилителя. Эксперимент показал, что разность фаз в половинах модуля ВУМ, настраиваемых по описываемой методике, составляет $\Delta\varphi_{НАЧ} < 50 \pm 12^\circ$ (рис. 6) и имеет плавно изменяющийся характер. Это существенно лучше результата, полученного в экземплярах, настроенных по методике с последовательной настройкой каскадов, где разность фаз в половинах модуля ВУМ составляла до $\Delta\varphi_{НАЧ} < 120 \pm 30^\circ$ и имела неравномерный характер в полосе работы усилителя, что в свою очередь не позволяло в полной мере использовать встроенный фазовращатель, а только усреднить конечный результат. При этом потери при суммировании составляли до $\Delta L_{ВЫХ} \approx 1,6$ дБ.

Следующим этапом модернизации модуля ВУМ является перенос, исключение выходного волноводного фазовращателя и перенесение его функций на цифровые фазовращатели, устанавливаемые в блоке ПУМ. На рис. 7 представлена блок-схема модифицированного усилителя мощности, которая позволяет облегчить корректировку разности ФЧХ двух половин усилителя. Кроме того, данная схема при наличии признака рабочей частоты на входе модуля ВУМ позволяет корректировать разность фаз в любой точке диапазона рабочих частот.

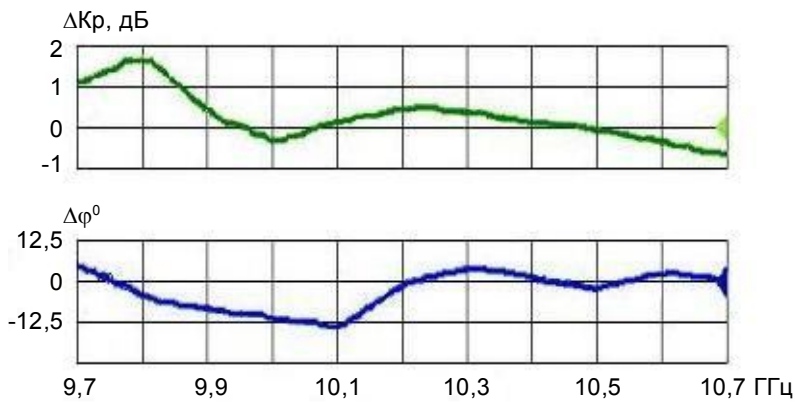


Рис. 4
Зависимость разности ΔKp и $\Delta\varphi$ от частоты для двух четвертей модуля ВУМ

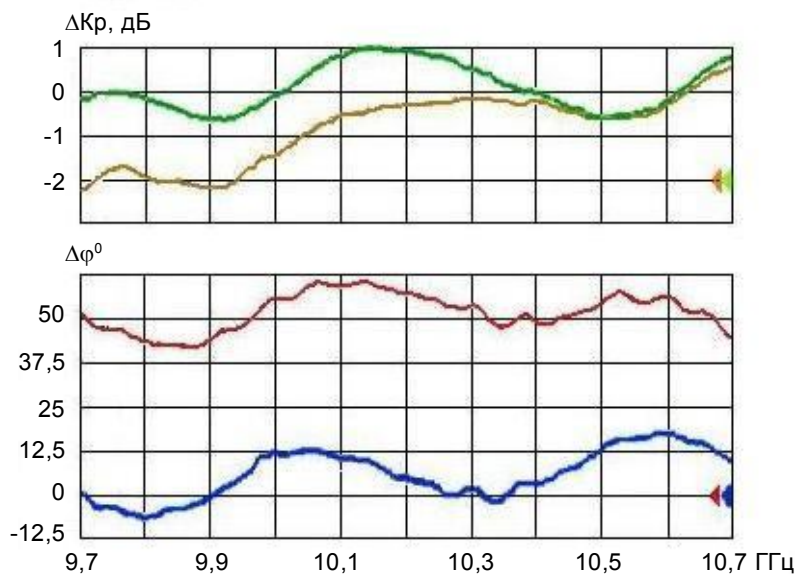


Рис. 5
Зависимость разности ΔKp и $\Delta\varphi$ от частоты до и после настройки для двух половин модуля ВУМ (коричневый и красный цвета – начальные ΔKp и $\Delta\varphi$, зелёный и голубой цвета – ΔKp и $\Delta\varphi$ после настройки)

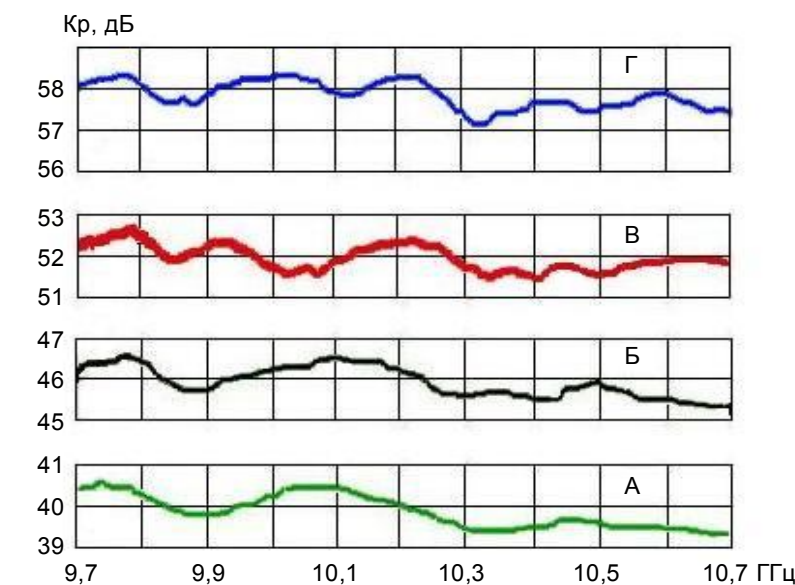


Рис. 6
Зависимость коэффициента передачи модуля ВУМ от частоты при $P_{вх} = 1$ мВт: А – 1/8 часть модуля ВУМ; Б – 1/4 часть модуля ВУМ; В – 1/2 часть модуля ВУМ; Г – модуль ВУМ (в целом)

В конструкцию модуля ВУМ были внесены изменения, заключающиеся в изменении субблока ПУМ, который включает в себя деление СВЧ сигнала на два канала с дискретными фазовращателями в каждом. Такое решение позволяет независимо работать с половинами СВЧ усилителя, а окончательную АЧХ модуля ВУМ корректировать методом электронной перестройки частоты с помощью фазовращателей, расположенных

в ПУМ. В результате это позволило отказаться от механического фазовращателя в волноводной части ВУМ и упростило требования к начальным фазовым характеристикам используемых транзисторов. Эффективность сложения суммарной выходной мощности с использованием входных дискретных фазовращателей возросла на 8-12 %.

Важное решение в изменении конструкции усилителя на основе проведенных экспериментов – замена, где это возможно, несимметричной полосковой линии на коаксиальный кабель. Данное решение позволяет частично избавиться от дисперсии, улучшить параметры внутренней электромагнитной совместимости в модуле и снизить потери в СВЧ тракте. Выполненная замена особенно заметно отразилась в выходных сумматорах после транзисторов VT3: диссипативные потери в тракте «VT3-Вентиль» уменьшились до 1-1,5 дБ. До замены потери на несимметричной полосковой линии и двойном суммировании составляли 2-2,5 дБ.

Установка режимов питания GaN транзисторов в усилителе проводится в соответствии с результатами измерений АЧХ и ФЧХ приборов в измерительной оснастке.

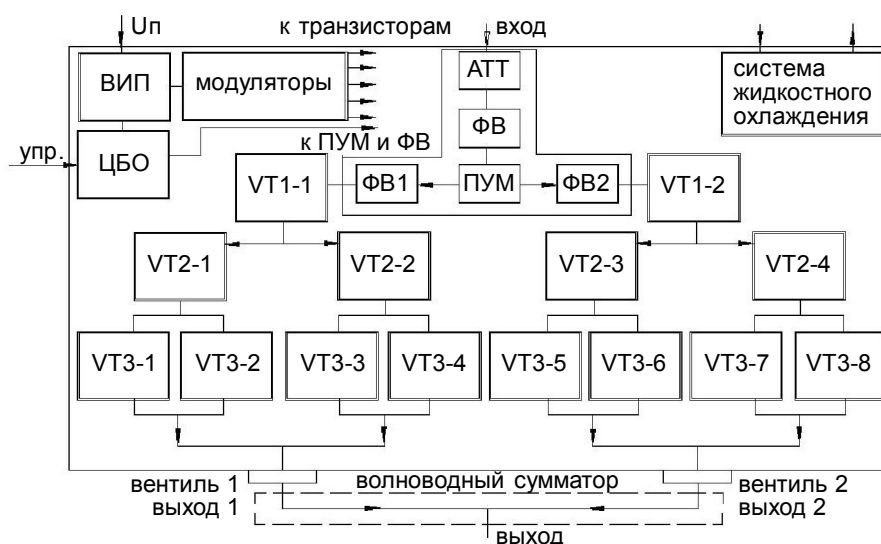


Рис. 7

Блок-схема модуля ВУМ с монолитными фазовращателями в блоке ПУМ

Заключение

1. Комбинированный метод настройки АЧХ многокаскадного модуля ВУМ позволяет суммировать выходную мощность в усилителе с эффективностью не менее 80% без нарушения целостности СВЧ тракта и сокращает время работы в 3-4 раза.

2. Дискретные фазовращатели, устанавливаемые на входе усилителя, при наличии признака частоты СВЧ сигнала повышают эффективность суммирования мощности на 8-12% по сравнению с выравниванием фазы в диапазоне частот едиными пассивными фазовращателями.

3. Изготовленные образцы модулей ВУМ обладают выходной мощностью от 450 до 550 Вт.

Литература

1. А. Кишинский. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ диапазона – смена поколений // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 2.

2. И. М. Аболдуев, А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев. Исследование мощных СВЧ GaN полевых транзисторов в импульсном режиме // «Пульсар-2008». Твердотельная электроника, сложные

функциональные блоки РЭА. – Материалы VI научно-технической конференции. – Москва. – 2008 – С. 24-25.

3. А. Г. Васильев, А. А. Дорофеев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев. СВЧ транзисторы и усилители мощности для сверхширокополосных РЭС // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. – Материалы конференции. – Омск. – 2008. – С. 31-32.

4. M. A. Gonzalez-Garrido, J. Grajal, P. Cubilla, C. Lanzieri, A. Cetronio. Broadband GaN MMIC Power Amplifiers for EW Systems // Proceedings of Silicon Carbide and Related Materials. – 2008. – P. 975-978.

5. P. Wright, A. Sheikh, C. Roff, P. J. Tasker, J. Benedikt. Highly Efficient Operation Modes in GaN Power Transistors Delivering Upwards of 81% Efficiency and 12 W Output Power // Proceedings of International Microwave Symposium and Conference. – 2008. – P. 932-939.

6. M. P. van der Heijden¹, M. Acar¹, J. S. Vromans¹, D. A. Calvillo-Cortes. 2 A 19W High-Efficiency Wide-Band CMOS-GaN Class-E Chireix RF Outphasing Power Amplifier // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2011

7. E. Reese, D. Allen, C. Lee, T. Nguyen. Wideband Power Amplifier MMICs Utilizing GaN on SiC // Proceedings of International Microwave Symposium and Conference. – 2010. – P. 1230-1233.

8. T. Kikkawa, K. Joshin, M. Kanamura. GaN Devices for Highly Efficient Power Amplifier // Fujitsu Sci. Tech. J. – V. 48. – No 1. – January 2012. – P. 40-46.

9. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М., Глыбин А. А., Иванов К. А., Мещерякова К. С. Твердотельный ниридгаллиевый 500-ваттный импульсный усилитель мощности X-диапазона // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – Вып. 1(226). – С. 83-88.

10. А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский. Новое поколение ЭКБ – твердотельные СВЧ модули класса «система в корпусе» для перспективных радиоэлектронных систем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – Вып. 2(225). – С. 53-60.

11. Борисов О. В., Глыбин А. А., Ивко А. М., Колковский Ю. В. Модулятор питания для GaN СВЧ усилителя мощности // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – Вып. 1(226). – С. 71-73.