

# Аппаратура и испытания

УДК 621.396.61

## Выходной усилительный блок миллиметрового диапазона длин волн с импульсной мощностью 3 кВт

О.В.Беловодский, Я.В.Доминюк, А.В.Зубенко, Б.А.Левитан, В.И.Пичин, А.А.Толкачев

Описан радиолокационный выходной усилительный блок миллиметрового диапазона длин волн (ММДВ) на основе лампы бегущей волны; приведены технические характеристики передатчика и его составных частей; рассмотрены особенности работы.

This paper describes the millimeter wave output amplifier for radar on the basis of traveling wave tube (TWT). The technical performances of the device and their components are presented, the operating features are considered.

### Введение

Разработка мощных многофункциональных радиолокационных средств миллиметрового диапазона длин волн предъявляет высокие требования к гибкости аппаратуры при обеспечении работы в различных режимах, одновременно при этом желательно максимальное сокращение размеров и массы аппаратуры. Значительные трудности в реализации этих проблем возникают при разработке передающих трактов РЛС ММДВ. Наиболее просто указанные требования могли бы, по-видимому, быть реализованы при использовании в передающем устройстве твердотельных СВЧ-усилительных приборов. Однако в настоящее время отсутствуют СВЧ-приборы ММДВ с необходимой мощностью и эффективностью [1, 2] как для использования в составе АФАР, так и в сосредоточенных передающих устройств РЛС ММДВ. В связи с этим остается актуальной задача создания передающих устройств с использованием электровакуумных приборов, применение которых (ЛБВ, клистронов, магнетронов) ведет к появлению в аппаратуре высоких напряжений.

Современные многофункциональные РЛС с ФАР требуют многообразия сигналов для различных режимов работы. Разработка импульсного модулятора, способного работать в широком диапазоне длительностей импульсов с частотами повторения в сотни килогерц является сложной технической проблемой. Принципы построения импульсного модулятора в цепи модулирующего анода с прямой связью рассмотрены, например, в [3]. Однако вопросы, связанные с конкретными техническими решениями, обеспечивающими работу передающего блока в широком диапазоне длительностей и высокой частотой повторения импульсов, в литературе рассмотрены недостаточно подробно.

Для решения задачи минимизации габаритных размеров и массы передатчиков потребовались новые подходы при разработке высоковольтных, мощных источников питания. Основным элементом такого подхода является идея использования преобразователей напряжения с частотой преобразования в десятки килогерц и ферритовых трансформаторов. Такие технические решения достаточно хорошо проработаны для низковольтных источников питания [4 – 6].

*Цель работы – привести результаты разработки передающего блока, обеспечивающего усиление СВЧ-сигналов в полосе рабочих частот 33,5 ... 34,5 ГГц с длительностями импульсов от 0,3 до 30 мкс, частотами повторения до 100 кГц в виде одиночных импульсов и пачек импульсов с неэквидистантной расстановкой при выходной импульсной мощности 3кВт и скважности 10, работающего в усилительном режиме.*

### Функциональная схема

Функциональная схема передающего блока приведена на рис.1, а его внешний вид – на рис.2. Блок выполнен по двухкаскадной схеме усиления СВЧ-сигналов. В качестве первого каскада используется транзисторный усилитель, в качестве второго – ЛБВ.

Транзисторный усилитель постоянно подключен к источникам питания. При усилении импульсных сигналов в паузах между импульсами напряжения питания не снимаются, длительность импульсов не ограничена.



В передающем блоке используется прямоугольный волновод сечением 7,2×3,4 мм. Во входном волноводном тракте установлены вентили ФВФН1-4, предназначенные для подавления возможных переотражений в волноводном тракте. После транзисторного усилителя в волноводном тракте установлен *p-i-n* диодный attenuator, который выполняет две функции:

установку оптимального значения мощности входного сигнала ЛБВ «Челлок» при настройке на максимальную выходную мощность;

уменьшение выходной импульсной мощности передающего блока на 20 дБ при подаче внешней команды. При этом передающий блок работает с постоянным уровнем входной мощности СВЧ-сигналов, а ЛБВ – в линейном режиме.

В волноводном тракте после ЛБВ установлены следующие элементы:

мощный волноводный вентиль ФВВВ1-3 для защиты ЛБВ от отраженного сигнала. Вентиль может использоваться при импульсной мощности до 3,5 кВт и средней мощности до 350 Вт без жидкостного охлаждения;

аппаратура контроля огибающей выходного СВЧ-сигнала, состоящая из направленного ответвителя с переходным ослаблением 40 дБ, *p-i-n* диодного attenuator, детекторной головки, модуля усиления. Attenuator предназначен для регулирования мощности как в режиме максимальной выходной мощности, так и в режиме пониженной мощности. Управление двумя *p-i-n* диодными attenuatorами осуществляется ячейкой синхронизации и контроля.

С модуля усиления огибающей сигнал подается на плату контроля ячейки синхронизации и контроля. На нее одновременно подается входной видеопульс. При номинальном значении выходной импульсной мощности передающего блока плата контроля вырабатывает сигнал «ИСПРАВНО» с уровнем постоянного напряжения 5 В. При снижении уровня выходной импульсной мощности более чем на 3 дБ сигнал снимается.

Длительность, частота повторения и форма модуляции выходных СВЧ-сигналов передающего блока определяются входным СВЧ-сигналом и согласованным с ним формирующим видеопульсом, поступающим на входы блока. Входной СВЧ-сигнал должен быть длиннее выходного на 1 мкс для обеспечения режима работы ЛБВ [1]. Передающим блоком накладывается единственное ограничение на расстановку импульсов – скважность импульсов в любой момент времени должна быть не менее 10.

Ячейка синхронизации и контроля формирует импульсы, необходимые для работы модулятора (импульс запуска и импульс среза). Временное положение и длительность импульса запуска соответствуют временному положению фронта и длительности формирующего видеопульса. Временное положение импульса среза соответствует временному положению спада видеопульса, длительность импульса среза равна 1 мкс.

Оптические элементы преобразуют импульс запуска и импульс среза в оптический сигнал и по оптоволоконному кабелю эти сигналы подаются на модулятор. Оптоволоконный кабель выполняет функцию потенциальной развязки, так как модулятор находится под напряжением катода ЛБВ.

В ячейке синхронизации и контроля реализованы две защиты передающего блока. В случае отсутствия по какой-либо причине высокого напряжения питания заземляющей системы (ЗС) ЛБВ по сигналу с ячейки преобразователя напряжения высоковольтного источника питания в ячейке производится блокировка входных видеопульсов, и импульсы запуска и среза для модулятора не вырабатываются. В случае повышения температуры охлаждающей жидкости на выходе из ЛБВ свыше 70°C и повышения давления в расширительном бачке также производится блокировка видеопульсов.

Ламповый модулятор формирует из импульсов запуска и среза модулирующий импульс с амплитудой до 400 В на управляющий электрод ЛБВ. Длительность и период повторения модулирующих импульсов соответствуют длительности и периоду повторения формирующих видеопульсов. В паузах между модулирующими импульсами на управляющий электрод ЛБВ подается отрицательное запирающее напряжение 1,9 кВ. В модуляторе формируется напряжение питания накала ЛБВ. Питание модулятора осуществляется напряжением 72 В с частотой 20 кГц

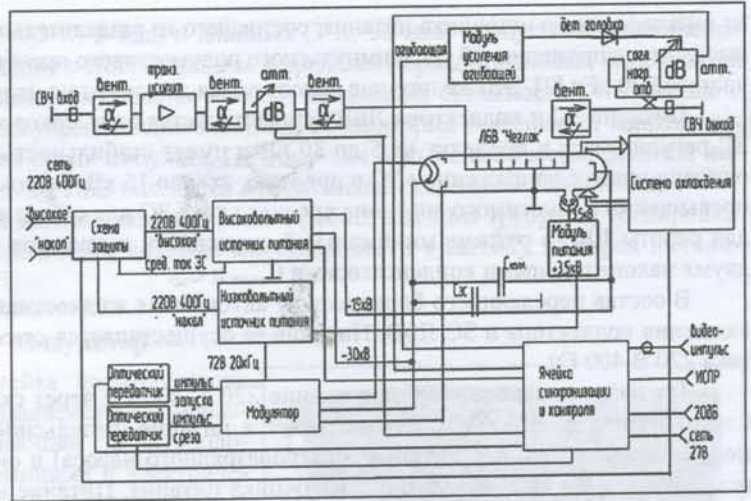


Рис. 1

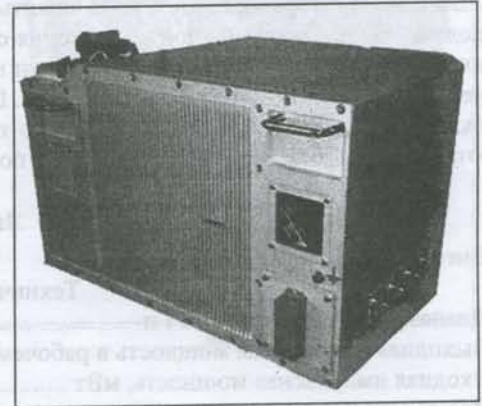


Рис. 2



от низковольтного источника питания, состоящего из разделительного трансформатора, обеспечивающего развязку по высокому напряжению 30 кВ, и импульсного полумостового преобразователя, который формирует напряжение 150 В с частотой 20 кГц [2]. Это же питание используется для создания напряжения 3,5 кВ для электроразрядного насоса ЛБВ.

Питание ЗС и коллектора ЛБВ осуществляется от высоковольтного источника питания. Напряжение питания ЗС регулируется в пределах от 5 до 30 кВ и имеет стабильность не хуже 1%. Напряжение коллектора изменяется одновременно с напряжением ЗС в пределах от 0 до 15 кВ. Высоковольтный источник питания формирует сигнал о превышении допустимого значения среднего тока ЗС для схемы защиты. Мощность источника питания достаточна для работы ЛБВ в режиме минимальной скважности импульсов. Импульсный режим работы ЛБВ обеспечивается двумя накопительными конденсаторами  $C_{колл}$  и  $C_{ЗС}$ .

В состав передающего блока входит автономная жидкостная система охлаждения. Она предназначена для охлаждения коллектора и ЗС ЛБВ. Питание ее осуществляется от сети постоянного тока 27 В и от сети переменного тока 220 В 400 Гц.

Трехфазное переменное напряжение 220 В 400 Гц через схему защиты подается на два входа передающего блока. От входа «НАКАЛ» осуществляется питание импульсного полумостового преобразователя (через него – модулятора и источника питания электроразрядного насоса) и системы охлаждения. От входа «ВЫСОКОЕ» происходит питание высоковольтного источника питания. Питание на вход «ВЫСОКОЕ» поступает не ранее чем через 3 мин после подачи питания на вход «НАКАЛ». Задержка по времени необходима для прогрева цепей накала ЛБВ и модуляторных ламп. Схема защиты имеет в своем составе два контактора, по одному на каждый вход. При подаче на передающий блок напряжения сети 27 В контакторы автоматически замыкаются и переменное напряжение 220 В 400 Гц подается на источники питания. На схему защиты поступают сигналы, обеспечивающие отключение аппаратуры в аварийных режимах. При поступлении сигналов «ОТСУТСТВИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ» с системы охлаждения, либо превышение среднего тока ЗС с высоковольтного источника питания оба контактора размыкаются и первичное питание 220 В 400 Гц полностью снимается с передающего блока.

#### Лампа бегущей волны «Чеглок»

Внешний вид ЛБВ показан на рис.3.

#### Технические характеристики ЛБВ «Чеглок»

Диапазон рабочих частот, ГГц	33,25...34,75
Выходная импульсная мощность в рабочем диапазоне частот, кВт	не менее 3,0
Входная импульсная мощность, мВт	50...100
Время готовности с момента включения напряжения накала, мин	3
Максимальная длительность управляющих импульсов, мкс	30
Минимальная длительность управляющих импульсов, мкс	0,3
Максимальная суммарная длительность фронта и спада управляющего импульса от минимальной длительности импульса, %	25
Минимальная скважность управляющих импульсов	10
Напряжение замедляющей системы, кВ	27...28
Импульсный ток замедляющей системы, А	0,1
Напряжение коллектора, кВ	не менее 15
Импульсный ток коллектора, А	1,0
Напряжение управляющего электрода в паузе между импульсами, кВ	минус 1,9
Напряжение управляющего электрода во время импульсов, В	0...150
Импульсный ток управляющего электрода, мА	1
Напряжения накала, В	3,2...4
Ток накала, А	3,2
Напряжение электроразрядного насоса, кВ	3,0...3,5
Ток электроразрядного насоса, мкА	не более 10
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	3,5
Габаритные размеры, мм	430×155×90
Масса, кг	6

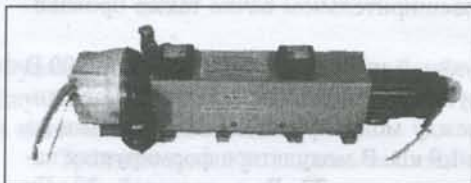


Рис. 3

При эксплуатации ЛБВ выявился ряд особенностей ее работы: режим работы ЛБВ первоначально устанавливается в соответствии с паспортными данными по следующим параметрам: ток накала, напряжение замедляющей системы и коллектора, напряжение на управляющем электроде во время импульса и в паузе между ними, а также входная мощность СВЧ. Необходима настройка режима с целью минимизации значения тока ЗС и оптимизации значения тока коллектора;



поведение ЛБВ в режимах усиления коротких (0,3 ... 3 мкс) и длинных (3 ... 30 мкс) импульсов существенно различается. При длинных импульсах токораспределение в ЛБВ находится в пределах нормы при любых скважностях импульсов. При коротких импульсах токораспределение ухудшается по мере понижения скважности. Это связано с тем, что во время длительности фронта напряжение на управляющем электроде проходит все значения от напряжения в паузе до напряжения на управляющем электроде во время импульса. Поэтому чем больше количество фронтов импульсов на единицу времени, тем более длительное время ЛБВ находится в неоптимальном режиме управления;

при первичном включении и включении после длительного перерыва в работе для ЛБВ требуется тренировка. После тренировки снижается вероятность искрений в ЛБВ, которые могут привести к выходу из строя высоковольтного источника питания и модулятора.

### Модулятор

Внешний вид модулятора показан на рис.4. Ячейка подмодулятора формирует фронт и длительность импульса, подаваемого на управляющий электрод ЛБВ. Импульс запуска, поступающий по оптоволоконному кабелю, преобразуется оптическим приемником в электрический сигнал, усиливается платой подмодулятора и подается на сетку модулирующей лампы. Плата питания формирует напряжения превышения, смещения и накала для модуляторной лампы. Аналогичную схему имеет ячейка среза.

Ячейка питания ЛБВ содержит три источника питания. Источник питания 2,2 кВ формирует напряжение, которое подается на управляющий электрод (УЭ) ЛБВ и запирает ее в паузе между импульсами. Источник питания 400 В формирует напряжение, которое через модуляторную лампу подается на УЭ ЛБВ и отпирает ее на время длительности импульса. Третий источник питания предназначен для питания накала ЛБВ.

При разработке и эксплуатации модулятора решен ряд технических проблем [5]:

наиболее тяжелым режимом для модулятора является режим формирования модулирующих импульсов длительностью 0,3 мкс со скважностью 10. В этом режиме модулятор работает в основном на заряд и разряд паразитных емкостей во время фронта и спада импульсов. Собственная емкость ЛБВ по управляющему электроду составляет 35 пФ, паразитная емкость модулятора –135 пФ. При высокой частоте повторения импульсов это приводит к тяжелому тепловому режиму модуляторных ламп;

модулятор в схеме передающего блока постоянно находится под потенциалом катода ЛБВ, который достигает 28 кВ. Наилучшим способом решения проблемы изоляции является заливка изолирующим компаундом. Но в данной конструкции модулятора этот способ применить не удалось в связи с тем, что требуется интенсивное воздушное охлаждение всех элементов. Проблема была решена путем разработки сборного изоляционного корпуса из капролоновых плит;

для снижения нагрузки на модулятор, решалась задача уменьшения его паразитной емкости. Задача решалась двумя путями: оптимизацией конструкции и применением в ячейке питания ЛБВ источников с преобразованием напряжения на частотах 20...50 кГц с использованием ферритовых трансформаторов. Особенно тщательно потребовалось отработать конструкцию разделительного трансформатора 2,2 кВ в подмодуляторе.



Рис. 4

### Высоковольтный источник питания

Высоковольтный источник питания состоит из трех ячеек: преобразователя напряжения, повышающего трансформатора, умножителя напряжения.

#### Технические характеристики источника

Выходное регулируемое напряжение в пределах, кВ .....	5...30
Максимальный выходной ток, мА	
для питания ЗС .....	14
для коллектора .....	110
Стабильность выходного напряжения, % .....	≤1
Пульсации выходного напряжения, % .....	≤0,1
КПД, % .....	>95

Источник питания имеет внутреннюю защиту от импульсного нарастания тока нагрузки при высоковольтном пробое. Через 7 с после срабатывания защиты производится плавный подъем высокого напряжения. При случайном



пробое работоспособность источника автоматически восстанавливается. С высоковольтного источника выдаются сигналы на схему защиты о превышении среднего тока ЗС и сигнал об отсутствии высокого напряжения на ячейку синхронизации и контроля.

Ячейка преобразователя напряжения построена на основе мостового преобразователя напряжения на частоте 20 кГц с фазовым управлением ключами [3]. Она обеспечивает стабилизацию и регулировку высокого напряжения. Ячейка повышающего трансформатора имеет в своем составе мощный ферритовый трансформатор и согласующие дроссели. Ячейка умножителя напряжения обеспечивает формирование высоких напряжений для питания ЗС и коллектора ЛБВ [4].

#### Система охлаждения

Внешний вид системы показан на рис.5. Система обеспечивает съем 2 кВт мощности тепловыделения ЛБВ при расходе охлаждающей жидкости 3 л/мин и избыточном давлении 1,5 кгс/см<sup>2</sup>. В состав системы охлаждения входят: расширительный бачок, теплообменник, вентиляторы, датчик расхода жидкости, датчик температуры. В расширительный бачок встроен насос на основе электродвигателя типа ДПР. В рабочем состоянии система охлаждения полностью заполнена охлаждающей жидкостью. Для компенсации расширения жидкости при нагреве на расширительном бачке имеются два сильфона, на которых установлены концевые выключатели, сигнализирующие о недопустимом повышении давления в системе. Теплообменник охлаждается четырьмя вентиляторами типа 2ДВО. Датчик температуры настроен на 70°C. В качестве охлаждающей жидкости используется «Тосол 40». С датчика расхода жидкости выдается сигнал «ОТСУТСТВИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ» на схему защиты. Сигналы о повышении давления в расширительном бачке и сигнал о превышении температуры охлаждающей жидкости значения 70°C выдается на ячейку синхронизации и контроля.

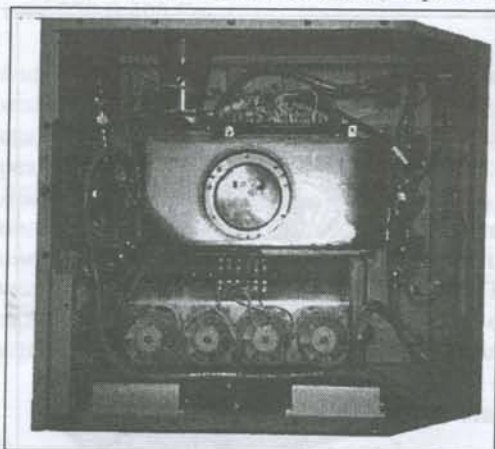


Рис. 5

- Предложены принципы разработки передающего блока для многофункционального радиолокатора миллиметрового диапазона длин волн, базируемого на подвижном объекте. При создании передающего блока разработан малогабаритный высоковольтный источник питания с выходным напряжением до 30 кВ мощностью 3 кВт и высоковольтный импульсный модулятор с амплитудой выходных импульсов 2,2 кВ, длительностью импульсов от 0,3 до 30 мкс. Разработанный передающий блок обеспечивает в полосе рабочих частот 33,5 ... 34,5 ГГц выходную импульсную мощность 3 кВт с перепадом выходной мощности в полосе частот 0,4 дБ при мощности входного сигнала 10 мВт.

#### Литература

1. Толкачев А. А. О некоторых тенденциях развития радиолокационных и СВЧ систем. – Сб. обзоров «Вакуумная СВЧ электроника». – Н. Новгород, 2002.
2. Уманский В. С. Усилительный тракт импульсных передающих устройств СВЧ. – М.: Сов. радио, 1973.
3. Справочник по радиолокации. Т. 3 / Под ред. М. Сколника. – М.: Сов. радио, 1979.
4. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Справочник / Под ред. Г. С. Найфельта. – М.: Радио и связь, 1986.
5. Силовые полупроводниковые приборы International Rectifier: Пер. с англ. / Под ред. В. В. Токарева. – Воронеж: Изд. ТООМП «Элист», 1995.
6. Костиков В. Г., Никитин И. Е. Источники электропитания высокого напряжения РЭА. – М.: Радио и связь, 1986.

Поступила 13 декабря 2005 г.