

МОЩНЫЕ СВЧ-МОДУЛИ

ГИБРИД ВАКУУМНОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Уровни СВЧ-мощности от десятков до ста и более ватт в средней части сантиметрового диапазона являются пограничными между мощностями твердотельных и электровакуумных усилительных приборов [1, 2]. Между тем, малогабаритные эффективные передатчики с такой мощностью необходимы для ряда применений, особенно в аппаратуре авиационно-космического назначения. Опыт показывает, что ни твердотельная, ни вакуумная технологии в отдельности не способны обеспечить оптимальную конструкцию передатчика по совокупности таких параметров, как масса, габариты, КПД, потребляемая мощность, шумы и др. Сравнительно недавно за рубежом сформировалось направление новых оптимизированных приборов, объединивших обе технологии и получивших название "мощные СВЧ-модули" (Microwave Power Modules, MPM). Эти модули заняли промежуточную по мощности область между твердотельными и вакуумными приборами и при этом заимствовали лучшие качества и тех, и других.

СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ МОЩНЫХ СВЧ-МОДУЛЕЙ

Концепция мощных СВЧ-модулей была изложена в 1988 году в специальном докладе Министерства обороны США по вакуумным СВЧ-приборам. В 1989 году на совместном совещании представителей правительства с экспертами по системам и компонентам были сформулированы целевые параметры этих приборов с учетом требований разрабатываемых и перспективных систем (рис.1) [1]:

И.Викулов, к.т.н.,
Н.Кичаева

Частота	6–18 ГГц
Выходная СВЧ-мощность	50–100 Вт
Коэффициент усиления	50 дБ
Коэффициент заполнения импульса	0–100%
Коэффициент полезного действия	33%
Спектральная плотность мощности шума	-45 дБ/МГц
Коэффициент шума	10 дБ
Объем	123 см ³
Толщина	0,79 см

В разработках, начавшихся в 1991 году, участвовало пять групп фирм:

- Hughes EDD (теперь Boeing EDD);
- Lockheed Sanders/Teledyne Electronic Systems (ныне – BAE Systems North America/Teledyne MEC/ Teledyne Wireless);
- Northrop (теперь Northrop Grumman);
- Raytheon (группа мощных ламп, теперь отделение L-3 Communications EDD);
- Westinghouse/Varian (теперь Northrop Grumman/CPI).

В 1990-е годы большинство целевых параметров было достигнуто, и на рынке появился новый электронный СВЧ-усилитель – мощный СВЧ-модуль в легком компактном корпусе (рис.2, 3). В него вошли миниатюрная ЛБВ, твердотельный предусилитель (ТТУ) и интегральный источник питания.

Твердотельные усилители в составе MPM – это стандартные приборы, выпускаемые многими фирмами. Обычно они выполняются на GaAs ПНЕМТ-транзисторах. Их назначение – усиление входного СВЧ-сигнала до уровня, достаточно для насыщения ЛБВ.

Лампа бегущей волны в MPM представляет собой спиральную мини-ЛБВ с многоступенчатым понижением потенциала коллектора (рис.4).

Равномерное распределение усиления между предварительным твердотельным и мощным выходным вакуумным усилителями позволяет оптимизировать параметры усилительной цепочки в целом, а именно [3]:

- уменьшить размеры и массу за счет уменьшения коэффициента усиления и сокращения длины ЛБВ;
- увеличить широкополосность за счет уменьшения усиления ЛБВ;

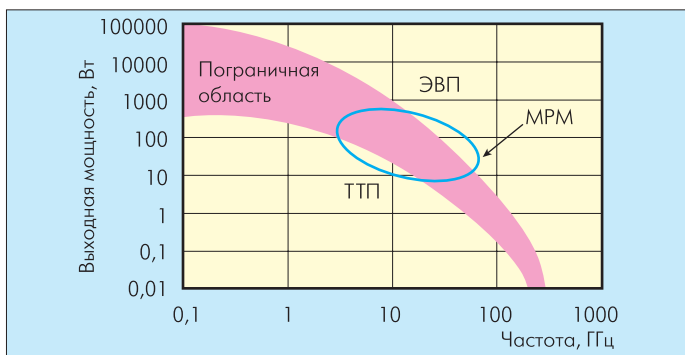


Рис. 1. Мощности твердотельных (ТТП) и электровакуумных (ЭВП) приборов

- максимально повысить КПД благодаря использованию в ЛБВ многоступенчатого коллектора;
- достичь приемлемого коэффициента шума (≤ 10 дБ) благодаря применению твердотельного усилителя;
- ввести в ТТУ схемы выравнивания частотной характеристики усиления, схемы температурной компенсации и линейризации;
- повысить надежность за счет снижения высоких напряжений в ЛБВ с уменьшенным коэффициентом усиления.



Рис. 2. Блок-схема мощного СВЧ-модуля

Источник питания модуля преобразует исходное напряжение, вырабатывает напряжение питания для ТТУ и ЛБВ. Модуль состоит из двух секций – низковольтной (логические и преобразовательные схемы) и высоковольтной (трансформатор, модулятор и высоковольтные схемы). Применение электронных компонентов в корпусах для поверхностного монтажа, новых плоских трансформаторов и методов высокочастотной коммутации позволили создать миниатюрные источники питания (рис.5), которые обеспечивают работу МРМ от постоянного напряжения 270 В или 28 В либо от переменного трехфазного напряжения 115 В, 400 Гц.

Согласно оценке специалистов компании L-3 Communications [1, 2], мощный модуль Ку-диапазона (12–18 ГГц) с вы-

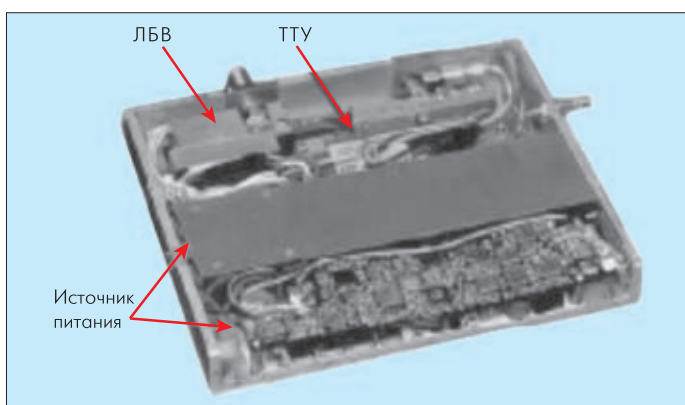


Рис. 3. Мощный СВЧ-модуль

ходной мощностью 100 Вт в целом в пять раз меньше по объему и массе своего вакуумного аналога (с учетом питания и охлаждения) и в восемь раз меньше соответствующего полупроводникового устройства (рис.6). Таким образом, мощные СВЧ-модули способны обеспечить в единице объема максимальную мощность по сравнению как с вакуумными, так и с полупроводниковыми приборами [3].

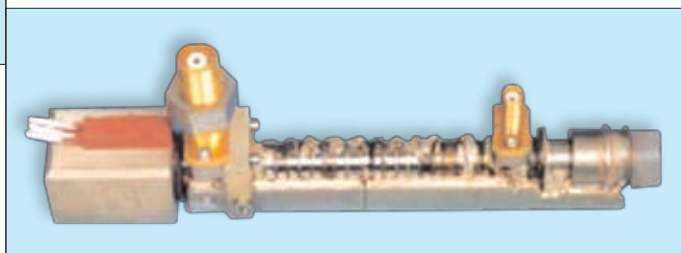


Рис. 4. Мини-ЛБВ, используемая в мощных модулях

ПАРАМЕТРЫ МРМ

В настоящее время МРМ серийно выпускает ряд фирм, включая L-3 Communications EDD (см. таблицу), Triton, Northrop и CPI (США), Thales (Франция) и NEC (Япония). Модули полностью покрывают диапазон частот от 2 до 40 ГГц.

К примеру, модуль марки M1221 имеет специальное аэрокосмическое назначение и способен работать в интервале температур -54...85°С на высоте более 20 км. Его размеры 19,9×16,5×2,5 см, а масса 1,8 кг [4].

На рис.7 показана частотная характеристика широкополосного модуля M1220.

Основные параметры МРМ компании L-3 Communications EDD

Марка	Полоса рабочих частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Напряжение питания, В	Назначение
M1000	2–8	50	~90–260	Гражданское
M1030	14–14,5	125	~90–260	
M1125	27,5–31,5	40	~90–260	
M1221	6–18	60–100	28	Военное
M1231	12,75–14,75	80	270	
M1280	18–40	20	270	
M1282	26–40	20	270	
M1340	43,5–45,5	40	~115	Космическая связь

ПРИМЕНЕНИЕ

Одно из направлений развития военной авиационной техники – беспилотные летательные аппараты (БЛА), применяемые для разведки, сбора данных, целеуказания и др. Наряду с электрооптическими и инфракрасными системами БЛА комплектуются аппаратурой спутниковых линий связи диапазона 12–18 ГГц, в передатчиках которых используются МРМ. При выходной мощности 50–100 Вт один прибор покрывает широкий диапазон частот и может работать как в однополосном, так и в многополосном режиме. Такие модули установлены в связных передатчиках американских БЛА Predator и Global Hawk [1, 2].

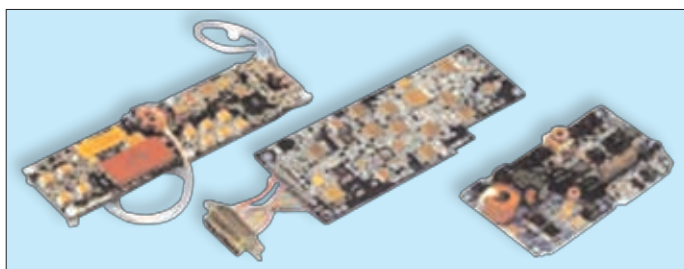


Рис.5. Платы со схемами, входящими в источник питания МРМ

Для обеспечения работы в любых погодных условиях в состав БЛА стали также включать компактные легкие РЛС с синтезированной апертурой. Обычно в них используют МРМ Х-диапазона (8–12 ГГц) с выходной мощностью ~100 Вт и коэффициентом заполнения импульса ~25%. В отличие от связанной аппаратуры, в радиолокационных системах к импульсным характеристикам МРМ предъявляются дополнительные требования. Чтобы их удовлетворить, в источник питания включают дополнительные схемы управления, с помощью которых выполняется регулировка рабочих напряжений ЛБВ в течение импульса и синхронизация режима источника питания с частотой следования импульсов. В результате в течение импульса обеспечивается ровная характеристика рабочего напряжения ЛБВ (девиация напряжения катода <0,1%) и минимизируются шумы в паузе между импульсами.

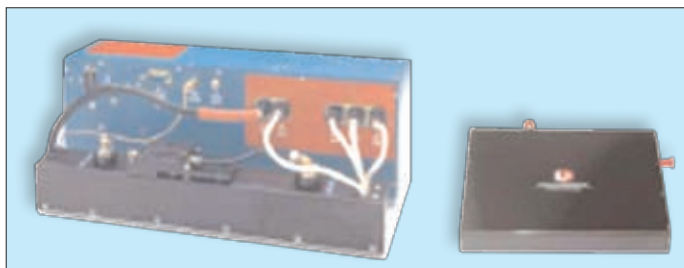


Рис.6. Обычная ЛБВ с источником питания (слева) и МРМ (справа)

Малогабаритные РЛС с синтезированной апертурой TES-AR на основе МРМ работают в составе БЛА Predator [1, 2]. Для установки на БЛА радиолокаторов большой дальности создаются МРМ с импульсной мощностью 1 кВт при средней до 100 Вт (рис.8). Вместо мини-ЛБВ в них используются специальные импульсные ЛБВ спирального типа. По последним данным, МРМ Х-диапазона серии M1270 с такой импульсной мощностью уже выпускаются фирмой L-3 Communications для авиационных РЛС [5].

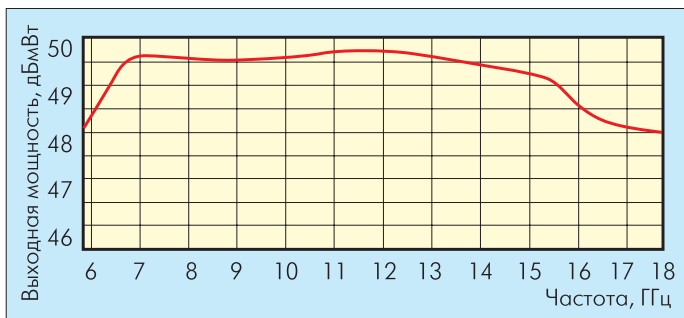


Рис.7. Частотная зависимость выходной мощности модуля M1220

Приводятся следующие их характеристики:

Частота	Х-диапазон
Рабочая полоса частот.....	2 ГГц
Выходная импульсная СВЧ-мощность	1 кВт
Коэффициент усиления	
в режиме малого сигнала	55 дБ
Коэффициент заполнения импульса	5%
Длительность импульса	0,1–80 мкс
Уровень гармоник относительно несущей	-10 дБ
Рабочее напряжение	28 В
Диапазон рабочих температур	-40...85°C
Масса	4 кг
Габариты	28×15,2×5 см

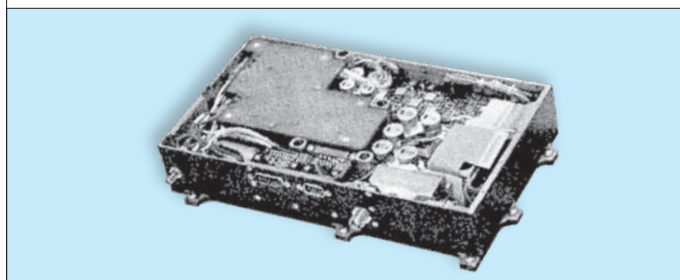


Рис.8. МРМ с импульсной мощностью 1 кВт

Совокупность параметров позволяет широко использовать МРМ в системах радиоэлектронной борьбы, включая аппаратуру электронного подавления и создания ложных целей. Они могут также применяться в мобильной спутниковой связи военного и гражданского назначения. Сегодня МРМ остаются одним из приоритетных направлений разработок в зарубежной СВЧ-электронике. ○

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ninnis T.** Microwave Power Modules – Miniature Microwave Amplifiers for UAVs. – www.l-3com.com, 2007.
2. **Ninnis T.** Microwave Power Modules (MPMs) – Miniature Microwave Amplifiers for Radars. www.l-3com.com, 2007.
3. **Abrams R.H.** et al. Vacuum Electronics for the 21st Century. – IEEE Microwave Magazine, September 2001, p.61–72.
4. Press release, 22 May 2006. – www.linkmicrotek.com
5. L-3 Electron Devices Introduces New 1 kW Pulse Microwave Power Amplifier. June 25, 2007 – www.l-3com.com