

2. Кучумов А.И. Расчет пульсаций фазы колебаний в усилителях и умножителях частоты на транзисторах // Радиотехника. 1975. Т. 30. № 6.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио. 1967.
4. Бронштейн И.Н. и др. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: ГИТЛ. 1957.

#### 4.15. Основные проблемы создания ППУМ для АФАР L-диапазона\*

Одной из важных составных частей АФАР L-диапазона является приемо-передающий усилительный модуль (ППУМ), предназначенный для усиления передаваемых и принимаемых радиоимпульсов. Основная проблема при создании такого модуля заключается в необходимости реализации высокоэффективных передающих каналов с суммарной выходной пиковой мощностью порядка 1800 Вт на четыре канала при полезном объеме модуля приблизительно 2,5 л. При этом помимо усиления входных радиоимпульсов до требуемого уровня с необходимым коэффициентом усиления предъявляется не менее важное требование наименьшего искажения (ухудшения) спектральных, временных и шумовых характеристик входных радиоимпульсов.

Основные технические требования к приемному и передающему каналам ППУМ и измеренные характеристики макета МППУ приведены ниже в табл. 4.15.1 и 4.15.2 соответственно. Измеренные значения характеристик макета приведены по всем четырем каналам модуля.

**Таблица 4.15.1. Основные технические требования к приемному каналу ППУМ**

Наименование параметров	Технические требования	Измеренные параметры макета
Диапазон частот, ГГц	1,2...1,6	1,2...1,6
Коэффициент шума, дБ	не более 3	1,5...2,3
Коэффициент передачи, дБ	29...35	36,7...39,3
Неравномерность коэффициента передачи, дБ	не более 2	0,6...1,3
Глубина регулировки коэффициента передачи, дБ	-15,5	-15,5
Дискрет регулировки коэффициента передачи, дБ	0,5	0,5
КСВН входа приемного канала	не более 2	1,1...1,8

\* Авторы: С.Н. Семенин, И.А. Соколов, И.В. Голиков, Н.В. Варца.

Таблица 4.15.2. Основные технические требования к передающему каналу ППУМ

Наименование параметров	Технические требования	Измеренные параметры макета	Примечание
Выходная импульсная мощность, Вт	не менее 300	360...540	$\Delta F_2$
	400...500	330...480	$\Delta F_3$
Скол радиоимпульса, дБ	не более 0,3	0,2...0,7	$\Delta F_2$
	не более 0,6	0,3...0,5	$\Delta F_3$
Разброс выходной мощности между каналами, дБ	не более 1,0	1,1	$\Delta F_2$
		0,8	$\Delta F_3$
Глубина ступенчатой электронной регулировки уровня выходной мощности, дБ	3...5	2,8...4,8	$\Delta F_2, \Delta F_3$
Длительности фронта радиоимпульса, нс	не более 150	100...250	$\Delta F_2$
		25...130	$\Delta F_3$
Длительности спада радиоимпульса, нс	не более 150	не более 30	$\Delta F_2, \Delta F_3$
КСВН по входу передающего канала	не более 1,5	1,2...1,6	$\Delta F_2, \Delta F_3$
КПД. передающего канала, %	не менее 20	25...32	$\Delta F_2$

Примечание: диапазон частот  $\Delta F_2$  (радиолокационный режим) –  $\tau = 10$  мкс,  $Q = 20$ ; диапазон частот  $\Delta F_3$  (режим Госопознавания) –  $\tau = 32$  мкс,  $Q = 100$

Макет МППУ представлен на рис. 4.15.1.

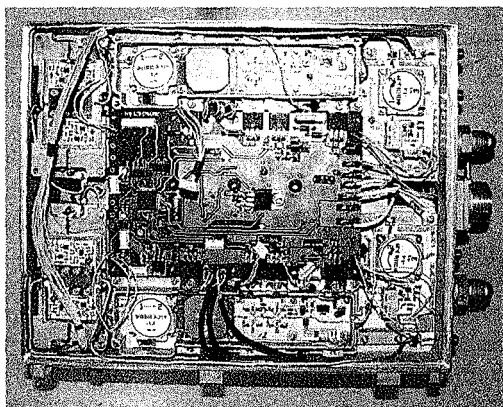


Рис. 4.15.1. Макет МППУ со снятой верхней крышкой

Анализ элементной базы для построения передающих каналов. Рассмотрены современные кремниевые СВЧ-транзисторы, применяемые для построения оконечных каскадов импульсных усилителей мощности в диапазоне частот 1,0...2,0 ГГц. Первоначально усилители мощности строились на основе биполярных транзисторов, которые применяются и в настоящее время. В последние 10 лет все более широко внедряются современные полупроводниковые технологии: кремниевые полевые СВЧ-транзисторы на основе LDMOS (Lateral Double Diffuse MOS) технологии.

В табл. 4.15.3 представлены биполярные транзисторы L-диапазона, выпускаемые ведущими мировыми производителями, а в табл. 4.15.4 – микросборки импульсных усилителей мощности на основе биполярных транзисторов, согласованные по входу и выходу на 50 Ом.

В табл. 4.15.5–4.15.8 представлены импульсные LDMOS транзисторы L-диапазона, выпускаемые ведущими мировыми производителями.

Необходимо отметить достижения в области LDMOS-технологии компании **HVVi Semiconductors**, которой удалось создать транзистор с номинальным напряжением питания 50 В (напряжение пробоя – 102 В), реализующий в диапазоне частот 1,2...1,4 ГГц уровень выходной пиковой мощности 250 Вт (длительность импульсов – 2 мс, скважность – 10) при высоком значении КПД 48 % и рекордно высоком значении коэффициента усиления 17 дБ!

Если сравнивать транзисторы, выполненные по технологии LDMOS, с транзисторами, выполненными по биполярной технологии, по таким важным характеристикам, как усиление, линейность, тепловые режимы работы (термостабильность), число каскадов усилителей мощности, сразу становится очевидным преимущество первых. Усиление LDMOS-транзисторов значительно выше, чем у биполярных транзисторов. Применение подобных приборов позволяет уменьшить число каскадов усилителя и уменьшить его габаритные размеры.

Важным преимуществом LDMOS-технологии по сравнению с биполярной является то, что полевой транзистор включен по схеме с общим истоком (исток соединен с землей). Такое включение уменьшает паразитную индуктивность истока и позволяет создать в транзисторе лучшие условия для отвода тепла. В биполярном же транзисторе большинство кремния занимает область коллектора, которая должна быть электрически изолирована от земли (радиатора), что затрудняет отвод тепла.

Конструкция LDMOS-транзистора не содержит токсичного оксида бериллия (BeO). При отсутствии изолятора из оксида бериллия вывод истока на кристалле соединяется напрямую с теплоотводящим радиатором, что снижает тепловое сопротивление. Температура распределяется по кристаллу достаточно равномерно, что обусловлено качественным процессом сборки транзистора (особенно важны операции крепления и разварки соединительных проводников на кристалле).

Таблица 4.15.3. Импульсные биполярные транзисторы L-диапазона

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ (мин)	$P_{\text{пик}}$ , Вт (мин)	КПД, % (мин)	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, дюймы
MS2208 APT RF	1,030...1,090	8,5	500 (32us, 2%)	40	50	1,0×0,4×0,23
IB0912M600 Integra	0,96...1,21	8,3	600 (10us, 10%)	53	50	1,0×0,4×0,20
IB1012S1100 Integra	1,025...1,15	9,6	1000 (10us, 1%)	45	60	1,0×0,4×0,20
IB1011S1500 Integra	1,030...1,090	9,4	1300 (10us, 1%)	42	60	1,0×0,4×0,20
MAPRST1214-150UF M/A-COM	1,20...1,40	7,4	150 (6ms, 25%)	45	36	0,9×0,4×0,17
PH1214-300M M/A-COM	1,20...1,40	8,8	300 (150us, 10%)	50	40	0,9×0,4×0,17
1214-300M APT RF	1,20...1,40	8,8	300 (150us, 10%)	50	40	1,0×0,4×0,17
IB1214M375 Integra	1,21...1,40	8,8	375 (300us, 10%)	55	42	1,0×0,4×0,20
1517-250M APT RF	1,48...1,65	7,0	250 (200us, 10%)	38	40	1,0×0,4×0,17
IB1191 Integra	1,45...1,55	7,5	650 (32us, 1%)	40	50	1,0×0,4×0,20

П р и м е ч а н и е : максимальное значение скола выходного радиоимпульса не превышает 0,5 дБ.

Таблица 4.15.4. Импульсные усилители мощности L-диапазона на основе биполярных транзисторов

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ (мин)	$P_{\text{пик}}$ , Вт (мин)	КПД, % (мин)	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, дюймы
IBP1011L900 <i>Integra</i>	1,030	9,5	900 (32us, 1%)	45	48	3,9×2,0×0,20
IBP1214M700 <i>Integra</i>	1,21...1,40	8	700 (200us, 10%)	50	42	3,5×1,8×0,20
1214-550 <i>Microsemi</i>	1,20...1,40	8	550 (300us, 10%)	50	42	3,2×2,0×0,20

Примечание: максимальное значение скола выходного радиопульса не превышает 0,5 дБ.

Таблица 4.15.5. Линейка LDMOS транзисторов компании Infineon

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ (тип.)	$P_1$ , дБ (тип.)	КПД (тип.)	Напряжение питания, В
PTFA142401	1,45...1,55	15,5 дБ @ 1,475 ГГц	240 Вт @ 1,475 ГГц	52 % @ 1,475 ГГц	30
PTFA140451	1,45...1,55	17,5 дБ @ 1,50 ГГц	60 Вт @ 1,50 ГГц	54 % @ 1,50 ГГц	28

Таблица 4.15.6. Линейка LDMOS импульсных транзисторов компании Philips Semiconductors

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ (мин)	$P_{\text{пик}}$ , Вт (мин)	КПД, % (мин)	Напряжение питания, В
BLL1214-250	1,20...1,40	12,0	250 (1ms, 10%)	42	36
BLL1214-35	1,20...1,40	13,0	35 (1ms, 10%)	43	36

Таблица 4.15.7. Импульсные LDMOS транзисторы L-диапазона компании HVVi Semiconductors

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ (мин)	$P_{\text{пик}}$ , Вт (мин)	КПД, % (мин)	Напряжение питания, В
HVV1011-600	1,030...1,090	17,3 (тип.)	600 (50us, 2%)	53 (тип.)	50
HVV1214-250L	1,20...1,40	17,0 (тип.)	250 (2ms, 10%)	48 (тип.)	50

Таблица 4.15.8. Импульсные LDMOS транзисторы L-диапазона компании Integra

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ (мин)	$P_{\text{пик}}$ , Вт (мин)	КПД, % (мин)	Напряжение питания, В
ILD1012S500HV	1,025...1,150	15,8	500 (10us, 1%)	45	50
ILD1011M550HV	1,030...1,090	16,3	550 (50us, 2%)	42	50
ILD1214L250	1,21...1,40	10,0	250 (1ms, 10%)	45	30
ILD1214EL200	1,21...1,40	10,0	200 (16ms, 50%)	38	30

Между затвором и стоком помещен экранирующий слой, уменьшающий емкость цепи обратной связи. Предельно малые значения индуктивности истока, емкости обратной связи и последовательного сопротивления затвора являются причиной повышенного коэффициента усиления: в среднем на 5...8 дБ выше, чем у биполярных транзисторов.

LDMOS – транзисторы обладают высокой устойчивостью к рассогласованию на выходе ( $K_{СВН} < 5$ ), что достигается благодаря высокому напряжению пробоя. Биполярные приборы допускают работу на нагрузку со значением  $K_{СВН}$ , не превышающим 2. Следует также отметить чрезвычайно высокое прогнозируемое время безотказной работы (MTBF) подобных приборов — от 2600 до 4800 лет при температуре кристалла 130 °С, и более 1700 лет при температуре 200 °С, что существенно выше, чем у приборов, выполненных по биполярной и традиционной MOS-технологии.

Одним из мировых лидеров в области разработки транзисторов и транзисторных усилителей мощности для радиолокационных применений является американская компания **Integra Technologies**. За свой относительно небольшой срок существования (около 15 лет) компания разработала и внедрила в производство широчайший ряд как биполярных, так и LDMOS-транзисторов и импульсных усилителей мощности в L- и S-диапазонах частот. На рис. 4.15.2 представлена одна из последних разработок компании: микросборка импульсного усилителя мощности ILP1269 на LDMOS-транзисторах.

Массогабаритные характеристики микросборки позволяют применять ее в составе «плотной» АФАР.

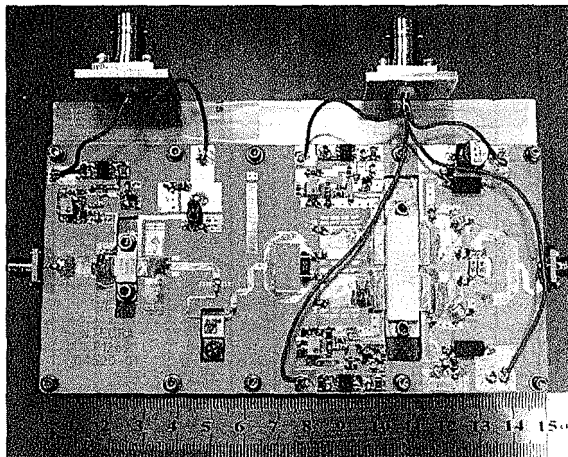


Рис. 4.15.2. Микросборка импульсного усилителя мощности ILP1269 (Integra)

Результаты экспериментальных исследований характеристик макета микросборки ILP1269, проведенных в ООО «НИИ «Компонент» (г. Зеленоград), представлены в табл. 4.15.9.

**Таблица 4.15.9. Результаты экспериментальных исследований макета микросборки ILP1269:  $U_{dc} = +30$  В (4700 мкФ);  $I_{d0} = 0,36$  А**

Параметры импульсов	$F$ , ГГц	1,215	1,3	1,4
	$P_{вх}$ , Вт	1,6	1,6	1,6
$\tau = 16$ мс; $Q = 2$	$P_{вых}$ , Вт	259	300	230
	$I_{dc}$ , А	10,7	11,2	9,2
	КПД, %	40,3	44,6	41,7
$\tau = 0,2$ мс; $Q = 20$	$P_{вых}$ , Вт	275	326	244
	$I_{dc}$ , А	1,52	1,56	1,32
	КПД, %	30,2	34,8	30,8

Примечание:  $\tau$  – длительность импульса;  $Q$  – скважность.

В настоящее время усилия разработчиков LDMOS-транзисторов L- и S-диапазонов частот направлены на повышение уровня выходной пиковой мощности, сравнимой с уровнем выходной мощности биполярных транзисторов, при значении коэффициента усиления существенно более высоком, чем у биполярных транзисторов.

**Анализ функциональной схемы модуля.** Функционально и конструктивно модуль делится на две части: в верхней части расположены первый и второй приемо-передающие каналы, в нижней – третий и четвертый. В каждой из частей расположен контроллер первого и второго или третьего и четвертого каналов соответственно. Функциональная схема двух смежных каналов модуля представлена на рис. 4.15.3. Конструктивная реализация этой схемы изображена на рис. 4.15.4.

Проблему улучшения технических характеристик модуля (повышения КПД, коэффициента усиления и устойчивости усилительных каскадов, уменьшения шумов и побочных спектральных составляющих выходного сигнала в режиме передачи) удалось в значительной степени решить следующим образом: весь диапазон рабочих частот передачи 1,25...1,55 ГГц был разбит на два относительно узкополосных поддиапазона:  $\Delta F_2$  (радиолокационный поддиапазон частот) и  $\Delta F_3$  (поддиапазон частот Госопознания). При этом для построения передающих каналов модуля применены микросборки усилителей мощности IBP1268 (рис. 4.15.5) в диапазоне  $\Delta F_2$  и IBP1267 (рис. 4.15.6) в диапазоне  $\Delta F_3$ . Микросборки усилителей мощности IBP1268 и IBP1267 разработаны компанией Integra по заказу ООО «НИИ «Компонент».

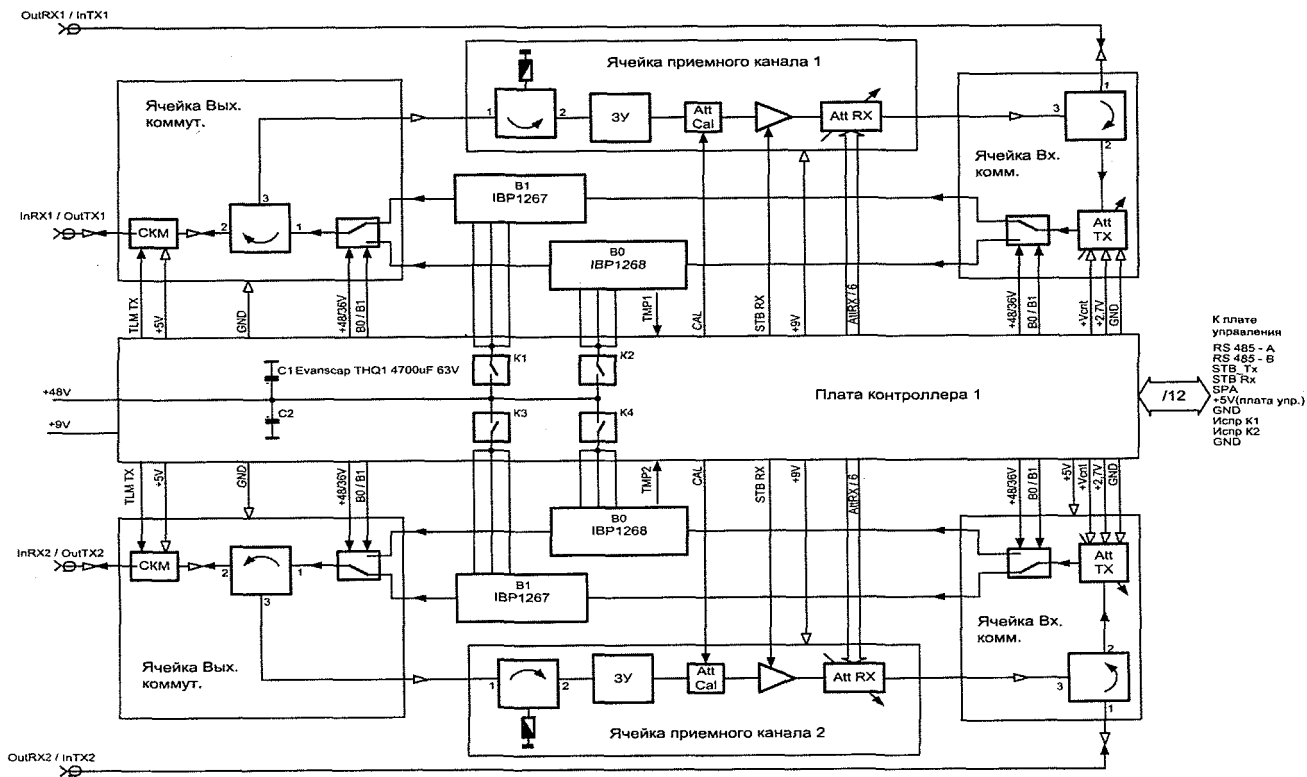


Рис. 4.15.3. Функциональная схема двух смежных каналов модуля



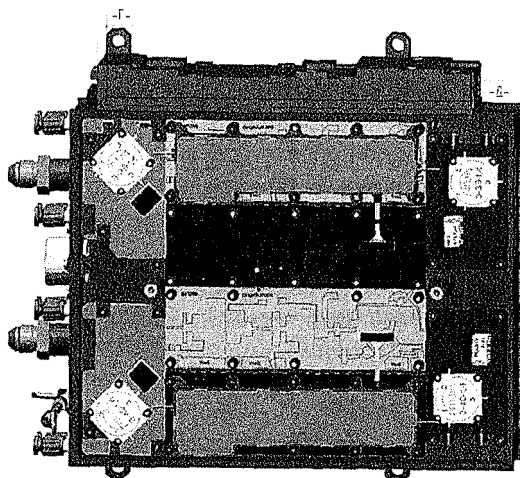


Рис. 4.15.4. Проект конструктивной реализации модуля

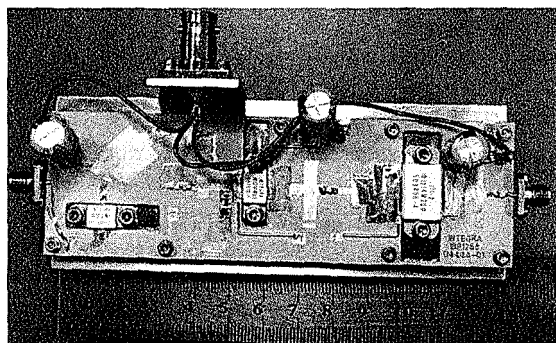


Рис. 4.15.5. Макет микросборки IBP1268 компании Интегра

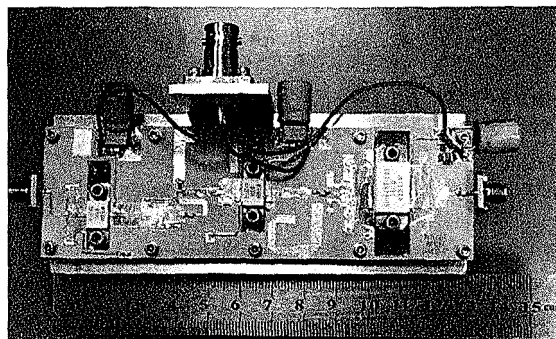


Рис. 4.15.6. Макет микросборки IBP1267 компании Интегра

Чтобы реализовать это техническое решение, необходимо высокочастотный коммутатор с малыми потерями и габаритными размерами, способный переключать высокие уровни подводимой СВЧ-мощности. Традиционный *p-i-n*-диодный коммутатор в данном случае не может быть применен по причине больших высокочастотных потерь (приблизительно 1 дБ) и высоких уровней коммутируемых мощностей.

Компания RADIALL в 2008 г. выпустила высокочастотное электромагнитное реле серии R596... (рис. 4.15.7) для поверхностного монтажа. Высокочастотные характеристики реле представлены в табл. 4.15.10: потери в диапазоне частот 1...2 ГГц не превышают 0,2 дБ при значении КСВН не более 1,2.

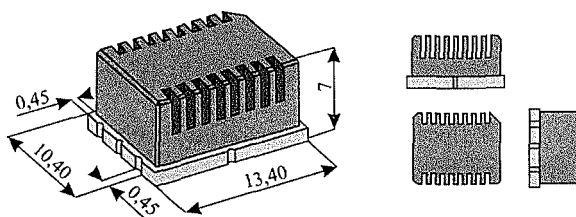


Рис. 4.15.7. Реле R596...

Таблица 4.15.10. Высокочастотные характеристики реле серии R596...

Frequency Range GHz	V.S.W.R (max)	Insertion Loss (max) dB	Isolation (min) dB		Average power W		Third order Inter modulation	Impedance ohms
			switch alone	switch + board layout (1)	(2) cold switching	(3) hot switching		
DC - 3	DC - 1	1.10	0.10	50	50	120	50	- 120 dBc typical (2 carriers 20W)
	1 - 2	1.20	0.20	45	40	70	50	
DC - 8	2 - 3	1.35	0.30	40	30	40	40	
	3 - 6	1.35	0.40	35	30	25	25	
	6 - 8	1.40	0.60	30	30	5	5	

Так как значение максимальной пиковой коммутируемой мощности не приведено в спецификации компании-производителя (приведено только среднее значение коммутируемой мощности – 70 Вт), то на основе реле R596313100 был разработан макет высокочастотного коммутатора, реализованный на высокочастотном материале ROGERS 4350 с толщиной диэлектрика 0,76 мм (рис. 4.15.8).

Результаты экспериментальных исследований макета коммутатора подтвердили возможность коммутации уровней подводимой пиковой мощности до 600 Вт в L-диапазоне с характеристиками импульсов согласно табл. 4.15.2.

Другой проблемой при создании модуля оказалась проблема разработки оптимальных емкостных «накопителей». При использовании традиционных электролитических конденсаторов габаритные размеры «накопителей» оказываются недопустимо большими. Это связано с тем, что для получения удовлетворительных характеристик выходных радиоимпульсов необходима емкость на один канал не менее 4000 мкФ. Один конденсатор типа TITANO серии EXR (1000 мкФ, 63 В) цилиндрической формы имеет габаритные размеры: диаметр – 16 мм, длина – 31 мм. На один канал необходимо как минимум 4 таких конденсатора, а на весь модуль – 16.

В результате вне габаритных размеров макета на верхней крышке модуля был сделан отдельный герметичный объем, в который были вынесены накопительные конденсаторы. Кроме того, при отрицательных температурах эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) таких конденсаторов резко падает, что приводит к «разрушению» выходных радиоимпульсов. Поэтому эти типы конденсаторов при отрицательных температурах требуют подогрева.

Решение проблем «накопителей» видится в применении в модуле герметичных низкопрофильных конденсаторов, разработанных компанией **Evans Cap**.

На рис. 4.15.9 изображен конденсатор THQ1063402 компании **Evans Cap** емкостью 4000 мкФ (63 В).

Результаты сравнительных испытаний в диапазоне температур традиционных электролитических конденсаторов и конденсаторов **Evans Cap**, проведенных в ООО «НИИ «Компонент», приведены в табл. 4.15.11.

Полученные данные показывают, что конденсаторы **Evans Cap** можно использовать при температуре минус 50...55° без подогрева. Применение конденсаторов THQ1063402 **Evans Cap** (по одному на канал) позволит расположить «накопители» в пределах объема блока и отказаться от нагревательных элементов.

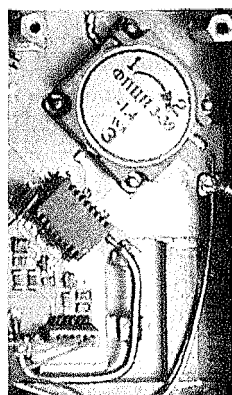


Рис. 4.15.8. Печатная плата макета коммутатора на реле R596313100 RADIALL

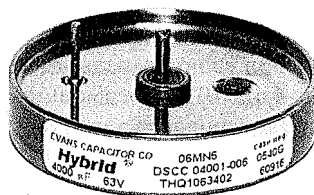


Рис. 4.15.9. Конденсатор THQ1063402 (**Evans Cap**) (габаритные размеры 35,6×7,9 мм; масса 44...50 г)

Таблица 4.15.11. Сравнение характеристик электролитических конденсаторов EXR HITANO и Evans Cap, полученных экспериментальным путем

№		HITANO EXR 1000мкФ 63В		EVANS THQ11 1000мкФ 125В	
		С (1 кГц), мкФ	ESR (100 кГц), Ом	С (1кГц), мкФ	ESR(100 кГц), Ом
1	+20 °С	–	–	940	0,051
2	+16 °С	851	0,048	–	–
3	+10 °С	–	–	896	0,053
4	0 °С	831	0,09	812	0,058
5	-10 °С	810	0,148	709	0,063
6	-20 °С	773	0,28	594	0,071
7	-30 °С	714	0,6	489	0,082
8	-40 °С	605	1,5	380	0,104
9	-50 °С	371	4,66	300	0,137
10	-55 °С	–	–	260	0,167
11	-60 °С	–	–	205	0,228

**Конструктивное исполнение модуля.** Конструкция модуля двухсторонняя. На верхней стороне располагаются первый и второй приемопередающие каналы, на второй – третий и четвертый. Каждая из сторон модуля в свою очередь имеет двухслойную конструкцию: нижний слой (рис. 4.15.10) – передающие каналы, верхний слой – приемные каналы и плата контроллера с «накопителями».

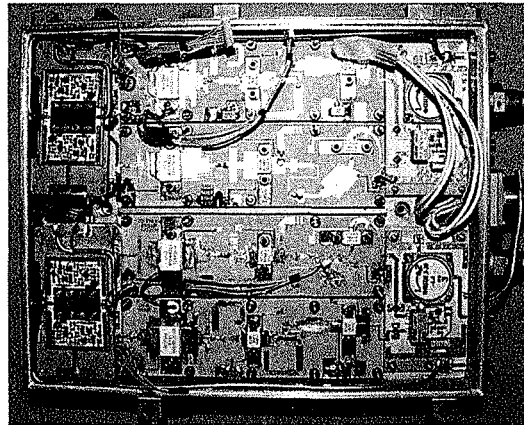


Рис. 4.15.10. Передающие каналы МППУ (нижний слой)

Самые теплонагруженные усилительные паллеты IВР1268 (поддиапазон частот  $\Delta F_2$ ) располагаются непосредственно над отверстиями канала жидкостного охлаждения.

Ячейки входных коммутаторов включают ферритовый циркулятор, входное реле HF3 56 фирмы AXICOM – переключатель диапазонов  $\Delta F_2$  и  $\Delta F_3$  по входу, микросхему управляемого напряжением аттенюатора ALM-38140 фирмы AVAGO для регулировки выходной мощности передающего канала. Ферритовые циркуляторы типа ФПЦНЗ-39 производства НП ОАО «Фаза» имеют в рабочем диапазоне частот 1,25...1,55 ГГц следующие высокочастотные характеристики: прямые потери – не более 0,5 дБ, обратные потери (развязка) – не менее 20 дБ, КСВН – не более 1,25.

Конструкция ячейки – пьедестал из алюминиевого сплава с покрытием для пайки и печатная плата из материала ROGERS 4350 с толщиной диэлектрика 0,76 мм (толщина металлизации – 18 мкм), на которой расположены элементы схемы и СВЧ полосковые линии передачи. Аналогичную конструкцию имеют ячейки выходных коммутаторов на основе реле R596313100, подробно рассмотренного выше.

Платы контроллеров обеспечивают управление функциональными узлами модуля и связь с устройством управления модуля. Кроме набора микросхем контроллера на плате располагаются ключевые транзисторы, коммутирующие питание усилительных паллетов и накопительные конденсаторы (по одному на канал). Конструкция платы многослойная (6 слоев), материал – FR-4.

Устройство управления модуля (УУМ) располагается на боковой стенке корпуса вне гермообъема модуля. Подключение ячейки УУ к модулю осуществляется через гермопереходы типа «слезка». Линии питания, управления и телеметрии ячейки соединяются с платами контроллеров модуля через два 12-ти контактных гермоперехода.

Ячейки приемных каналов располагаются в верхнем слое над усилительными паллетами (см. рис. 4.15.4).

На рисунке 4.15.11 изображен макет приемного канала.

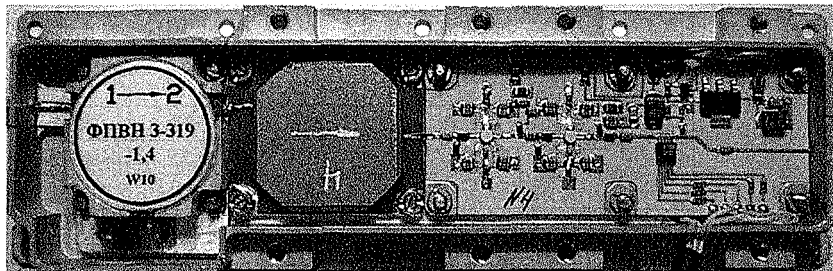


Рис. 4.15.11. Макет приемного канала в составе: ферритовый вентиль ФПВН 3-319-1,4, защитное устройство, МШУ

В силу жестких ограничений по уровню шумов приемного канала модуля (не более 3 дБ) и с учетом потерь высокочастотного тракта модуля непосредственно МШУ должен иметь уровень собственных шумов не более 0,5 дБ. Анализ элементной базы показал, что согласованные по входу и выходу микросхемы с таким низким уровнем шумов в L-диапазоне отсутствуют. Поэтому двухкаскадный МШУ был разработан на основе дискретных GaAs-транзисторов. Результаты экспериментальных исследований макета платы МШУ подтвердили возможность реализации столь низкого уровня шумов: в диапазоне рабочих частот 1,2...1,6 ГГц уровень шумов МШУ не превысил 0,49 дБ.

**Результаты экспериментальных исследований технических характеристик модуля.** Результаты экспериментальных исследований характеристик макета микросборки ИВР1268 приведены в табл. 4.15.12.

Результаты экспериментальных исследований характеристик макета микросборки ИВР1267 приведены ниже в табл. 4.15.13.

**Таблица 4.15.12. Результаты экспериментальных исследований макета микросборки ИВР1268**

$U_{dc}$ , В	Параметры импульсов	$F$ , ГГц	1,215	1,28	1,36	1,4
		$P_{вх}$ , Вт	0,8	0,8	0,8	0,8
45 (4700 мкФ)	$\tau = 8$ мкс $Q = 20$	$P_{вых}$ , Вт	412	373	545	438
		$I_{dc}$ , А	1,27	1,10	1,52	1,19
		КПД, %	36,1	37,7	39,8	40,9
	$\tau = 8$ мкс $Q = 70$	$P_{вых}$ , Вт	411	368	561	445
		$I_{dc}$ , А	0,37	0,31	0,44	0,34
		КПД, %	35,3	37,7	40,5	41,5

Примечание:  $\tau$  – длительность импульса;  $Q$  – скважность.

**Таблица 4.15.13. Результаты экспериментальных исследований макета микросборки ИВР1267**

$U_{dc}$ , В	Параметры импульсов	$F$ , ГГц	1,45	1,50	1,55
		$P_{вх}$ , Вт	1,3	1,3	1,3
49,5 (4700 мкФ)	$\tau = 32$ мкс $Q = 100$	$P_{вых}$ , Вт	556	537	494
		$I_{dc}$ , А	0,25	0,25	0,29
		КПД, %	44,9	43,4	34,4
	$\tau = 8$ мкс $Q = 100$	$P_{вых}$ , Вт	484	537	493
		$I_{dc}$ , А	0,24	0,29	0,35
		КПД, %	40,7	37,4	28,5

Примечание:  $\tau$  – длительность импульса;  $Q$  – скважность.

В табл. 4.15.14–4.15.16 приведены результаты измерений одного из передающих каналов макета МППУ.

**Таблица 4.15.14. Режим передачи: импульс 8 мкс, скважность 20,  $P^{(имп)}_{вых} = 1,0 \text{ Вт}$ ,  $U_n = +48 \text{ В}$**

$F$ , ГГц	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36
$P^{(имп)}_{вых}$ , Вт	370	415	510	530	517
$I_{ср}$ , А	1,43	1,58	1,84	1,72	1,63
КПД, %	27,0	27,4	28,9	32,1	33,0
$\tau_{фр}$ , нс	180		140		100
$\tau_{сп}$ , нс	20, не более		20, не более		20, не более
max/min, дБ	0,2		0,7		0,8

**Таблица 4.15.15. Режим передачи: импульс 8 мкс, скважность 70,  $P^{(имп)}_{вых} = 1,0 \text{ Вт}$ ,  $U_n = +48 \text{ В}$**

$F$ , ГГц	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36
$P^{(имп)}_{вых}$ , Вт	382	431	544	564	542
$I_{ср}$ , А	0,46	0,50	0,58	0,55	0,52
КПД, %	24,7	25,7	27,9	30,5	31,0
$\tau_{фр}$ , нс	200		160		100
$\tau_{сп}$ , нс	20, не более		20, не более		20, не более
max/min, дБ	0,3		0,6		0,8

**Таблица 4.15.16. Режим передачи: импульс 32 мкс, скважность 100,  $P^{(имп)}_{вых} = 1,5...1,6 \text{ Вт}$ ,  $U_n = +48 \text{ В}$**

$F$ , ГГц	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55
$P^{(имп)}_{вых}$ , Вт	480	481	452	413	365	330
$I_{ср}$ , А	0,41	0,39	0,36	0,33	0,31	0,28
КПД, %	24,4	25,7	26,2	26,1	24,5	24,6
$\tau_{фр}$ , нс	30			33		36
$\tau_{сп}$ , нс	30, не более			30, не более		30, не более
max/min, дБ	0,8			0,7		0,8

На рис. 4.15.12 приведена измеренная эпюра выходного импульса передающего канала.

Видно, что при уровне выходной пиковой мощности 500 Вт имеется незначительное затягивание переднего фронта импульса.

На рис. 4.15.13 приведены результаты экспериментальных измерений коэффициента передачи и коэффициента шума макета платы МШУ.

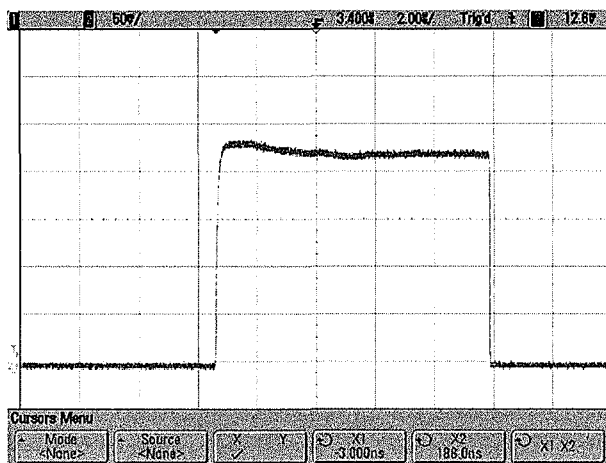


Рис. 4.15.12. Эпюра выходного импульса:

$F = 1,32$  ГГц;  $\tau = 8$  мкс;  $Q = 20$ ;  $P_{\text{вх}}^{(\text{имп})} = 1,0$  Вт;  $P_{\text{вых}}^{(\text{имп})} = 502$  Вт;  $U_{\text{п}} = +48$  В;  
 $I_{\text{п}}^{(\text{имп})} = 35$  А; КПД = 29,9 %;  $\tau_{\text{фр}} = 120$  нс;  $\tau_{\text{сп}} = 25$  нс; max/min = 0,6 дБ

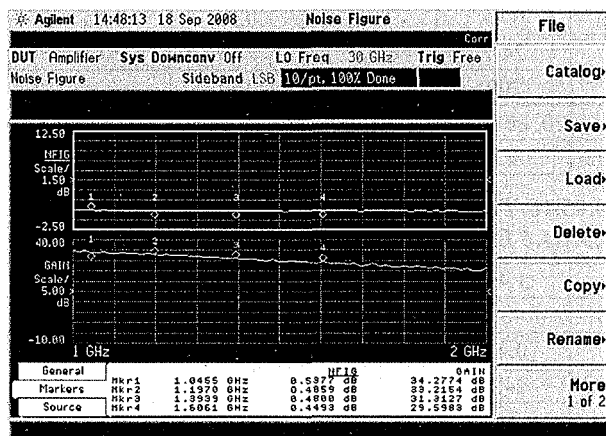


Рис. 4.15.13. Результаты измерений коэффициента передачи и коэффициента шума макета платы МПГУ (измеритель N8975A Agilent)

В процессе разработки и изготовления макета МПГУ L-диапазона основной проблемой явилось отсутствие отечественной элементной базы, на которой можно было бы реализовать функциональные узлы, удовлетворяющие высоким техническим требованиям к передающим и приемным каналам модуля. Зарубежные компоненты, позволившие реализовать достаточно высокие технические характеристики макета моду-



ля в столь малых габаритах, появились на рынке в последние 5 лет. Уровень технологической оснащённости не позволяет в настоящее время отечественным предприятиям разрабатывать и производить аналогичные компоненты, хотя многие из них имеют значительный теоретический и экспериментальный задел.

*Полученные характеристики макета позволяют утверждать о том, что разрабатываемые опытные образцы модулей, в основном, будут удовлетворять требованиям к АФАР L-диапазона. Отдельных исследований требуют спектральные и шумовые характеристики выходного сигнала в режиме передачи и испытания на ЭМС.*

*Особого внимания заслуживают вопросы метрологического обеспечения разработки и изготовления модулей. Измерительная аппаратура ведущих мировых производителей позволяет с необходимой точностью измерять параметры модуля в импульсных режимах работы, хотя и отличается достаточно высокой стоимостью. При серийном изготовлении модулей, с целью автоматизации процесса настройки и измерения большого числа параметров, потребуется разработка и изготовление автоматизированных рабочих мест.*

#### 4.16. Микрополосковое диаграммообразующее устройство\*

В разработанных в НИИП ФАР бортовых радиолокационных станций, требующих от антенны максимальной энергетической эффективности при минимальном уровне боковых лепестков (УБЛ), применяются волноводные распределительные системы (ВРС). Из известных типов ВРС в этих разработках традиционно отдается предпочтение строчно-столбцовым схемам [1].

Основной функцией ВРС является распределение мощности СВЧ-сигнала между излучающими элементами апертуры антенной решетки. Кроме того, для ФАР с суммарно-разностными характеристиками излучения распределительная система по существу является также и диаграммо-образующей структурой. Для выполнения этих функций в строчно-столбцовую ВРС включаются следующие элементы:

четыре строчно-столбцовых делителя, каждый из которых распределяет СВЧ-энергию между излучающими элементами одного из квадрантов апертуры, для чего используется один распределитель-«столбец» и  $n$  линеек-«строк»;

\* Авторы: В.М. Кузьменков, В.А. Митин, А.И. Синани, М.Г. Струнский, И.В. Трусилова, Л.И. Трухляева.