

**СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ МАЛОЭНЕРГОЕМКИХ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ СВЧ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ**

Представлен в общем виде алгоритм проектирования РПУ с позиций системного подхода. Введенное представление объекта в виде агрегативной системы сняло противоречие в модели, описывающей процессы различной природы. Дается характеристика современной элементной базы СВЧ техники приема.

При разработке крупного проекта принято учитывать рабочие условия, требования заказчика или потребителя, техническую и экономическую политику организации, рынок, качество, надежность, трудоемкость, совместимость, приспособляемость, долговечность, правовые ограничения, неосязаемые факторы. Последние включают в себя такие понятия, как репутация, доля ответственность, престиж и т. д. [1]. На рис. 1 представлены упрощенная формула прибыли (Π) и факторы (цели проектирования), влияющие на изменение цены (Π) и затрат ($З$). Рынок определяет неудовлетворенную потребность и дает первое представление о требуемом объекте. Например, требуются высокочувствительные мобильные радиоприемные устройства (РПУ) для связанных систем, радиоастрономии и др. Основные функции, выполняемые некоторыми радиоприемными устройствами, приведен в табл. 1.

Выполнение всех названных в таблице функций в одном РПУ неоправданно усложнит его. Достаточно универсальное РПУ может выполнять функции 2, 3, 4 (обведены рамкой).

Требование высокого интеллектуального уровня исполнения аппаратуры приводит к необходимости автоматизации отдельных процессов ее работы и создания аппаратуры контроля и восстановления работоспособности РПУ. Отсюда очевидно обязательное наличие процессора, пульта управления, сигнализации.

252148, Киев, пр. 50 лет Октября, 26, НПО "Сатурн", тел. 477673

Таблица 1

РПУ радио- экономии	РПУ стан- ций ССС	РПУ стан- ций РР/С	РПУ радио- перехвата	РПУ радио- подавления	
Пеленгация	-	-	-	Пеленгация	
Обнаружение	Последов. обнаружение	Последов. обнаружение	Последов. обнаружение	Последов. обнаружение	Мгновенное обнаружение
Техничес- кий анализ	Техничес- кий анализ	Техничес- кий анализ	Техничес- кий анализ	Техничес- кий анализ	
Прием ин- формации	Прием ин- формации	Прием ин- формации	Прием ин- формации	-	
Измерение параметров	-	-	-	Измерение параметров	

Высокая надежность при проектировании обеспечивается применением схем, резервированием, выбором специальной элементной базы, микрознергетическими режимами, защитой от магнитических и механических воздействий.

Снижение затрат на разработку и промышленное производство РПУ требует одновременной разработки ряда однотипных РПУ для нескольких близких диапазонов частот и создания целого семейства радиоустройств на базе одних и тех же новых функциональных узлов и блоков. Конструкция РПУ должна быть приспособлена для последующих модернизаций. Кроме того, необходимо предусмотреть варианты исполнения функционально замещающих узлов и блоков для самостоятельной продажи.

Все это обеспечит долговечность спроса, массовость потребления и возможность применения групповой и безлюдной технологии изготовления. Последнее приведет к снижению себестоимости продукции и, как следствие - к увеличению прибыли (см. рис. 1).

Для обеспечения специальных требований, таких как миниатюризация массогабаритных параметров, мощности потребления и экономичности одного рабочего комплекта аппаратуры, используются

На 1 уровне определяется минимальный функциональный набор функций на основе принципов отсутствия (или минимизации) функциональной избыточности и функциональной достаточности для выполнения конкретной работы с помощью данной аппаратуры. На 2 уровне применяются специальные меры по выбору имеющейся и созданию новой элементной базы, использованию новых принципов приема, анализа и обработки сигналов, а также новых материалов и технологий.

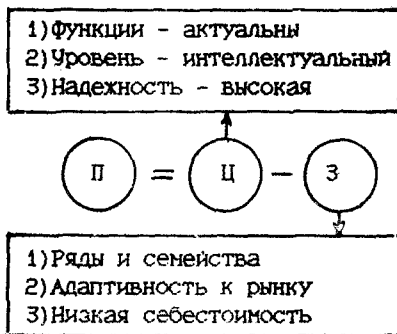


Рис. 1

Так, например, для аппаратуры приема связанных сигналов целесообразно ее разделить на два комплекса: комплекс технического анализа (КТА) и комплекс радиоприема (КРП). Аппаратура питания управления и контроля в каждом комплексе своя. По своему назначению КТА обеспечивает предварительный анализ сигналов на линии связи. Он позволяет выявить загрузку в выбранных частотных диапазонах, вычислить значение несущих частот интересующих сигналов, оценить уровни сигналов и их изменение, определить вид модуляции принимаемого сигнала, полосу спектра и скорость передачи, установить отношение сигнал/шум или ожидаемую вероятность ошибки приема.

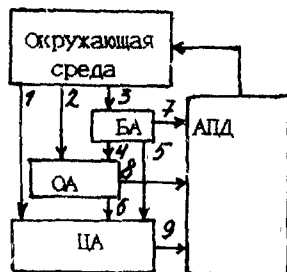


Рис. 2

Для создания высокочувствительных мобильных радиоприемных устройств в сантиметровом диапазоне длин волн в настоящее время могут быть применены полупроводниковые приборы на GaAs, БМК, СБИС, оптоакустоэлектронные преобразователи, волоконная оптика, приборы, использующие магнитостатические волны, гибридная и монокристаллическая технологии изготовления микросхем и др.

Заданием диапазонов рабочих частот, типов информационных сигналов, диапазонов скоростей потоков информации, и

данных характеристик и ограничений заканчивается формированием общего облика аппаратуры и ее математической модели уровня: система - окружающая среда. Схематическое представление системы и ее взаимодействие с окружающей средой показано на рис. 2. На языке модели агрегативной системы наш объект может быть представлен в обобщенном виде из четырех агрегатов: БА - буферного, ОА - обеспечивающего, ЦА - центрального, АПД - агрегата подготовки данных [1]. На рисунке также показаны каналы воздействия (1 - 10) для данной схемы. В каждом канале может содержаться много элементарных каналов. Характеристиками воздействия окружающей среды на систему могут быть: температура окружающей среды, время в виде переработки ресурса, информационные сигналы и сигналы помех, напряжение питания и др. Буферный агрегат по своему функциональному назначению ограждает другие агрегаты от отдельных воздействий окружающей среды, демпфируя силу этого воздействия. В нашем примере в КТА либо в КРП могут входить подсистемы регулирования температуры, стабилизации напряжения питания и др. Обеспечивающий агрегат содержит подсистемы, обеспечивающие работу центрального агрегата. В нашем примере для КТА либо КРП это могут быть синтезаторы частот гетеродинных сигналов, подсистема управления и др. Центральный агрегат представляет собой схему сигнального тракта КТА или КРП.

В формировании большинства характеристик системы, таких как масса, стоимость, трудоемкость и др., принимают участие все агрегаты системы и оказывается, что число сигналов, а одновременно число элементарных каналов, связывающих агрегаты системы с внешней окружающей средой, больше, чем количество входов у агрегата "окружающая среда". Поскольку к элементарному входу может быть присоединен только один элементарный канал, то налицо противоречие, которое снято введением нами в структуру системы фиктивного агрегата подготовки данных (АПД) [1].

Введенное представление КТА либо КРП в виде агрегативной системы позволило описать в единой модели процессы различной природы: электрические, теплофизические, механические, экономические и др. и создать единую систему информационных, энергетических и других воздействий между объектом и окружающей средой.

Процесс проектирования рождает множество возможных вариантов. Два алгоритма поиска оптимальных вариантов описаны автором в [1]. В каждом из них поиск идет на заданной структурной схеме. Для сложных КТА и КРП сегодня только интуиция и опыт разработчика позволяют синтезировать различные структурные схемы. При синтезе структурных схем РПУ принимаются во внимание: диапазоны сигнальных частот, виды модуляции сигналов, скорости потоков информации на различных ступенях разуплотнения; оптимальные полосы пропускания с учетом возможностей реализации тракта основной селекции; количество и номиналы промежуточных частот с учетом селекции зеркальных каналов и частотного плана в целом; варианты плавной и дискретной перестройки в диапазоне сигнальных частот с различными шагами дискрета при I и II преобразовании и т. д. Разработка алгоритмов синтеза структурных схем агрегатов системы самостоятельная задача.

Как было сказано выше, решения II уровня связаны с созданием новой элементной базы, чему и посвящена следующая часть данной работы.

АКТИВНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

В последнее время весьма интенсивно ведутся работы над созданием пассивных, активных аналоговых и цифровых интегральных устройств, выполненных как в виде однослойных, так и многослойных печатных плат.

Основной критерий развития различных видов МП ФАР заключается в обеспечении единства технологии производства МП ФАР и других узлов радиоаппаратуры, а также в тенденции размещения в раскрыве МП ФАР все новых и новых элементов и устройств радиоаппаратуры.

Для успешного решения этой глобальной проблемы необходимо создать соответствующий универсальный математический аппарат, методы анализа и синтеза многофункциональных устройств.

Авторами создана первая версия достаточно гибкой САПР. С ее помощью разработаны фотошаблоны для АФАР в диапазоне частот 0,5–15 ГГц. Изготовлен ряд МП ФАР. Одна из МП ФАР имеет совмещенные функции двух антенн в одном раскрыве и СВЧ фильтров. Ее параметры: коэффициент усиления 8 дБ, 22 дБ; коэффициент эллиптичности 0,6, 0,6; развязка между антеннами 25 дБ, 33 дБ; габаритные размеры 820x820x100 мм.

Авторами исследуются вопросы совмещения в раскрыве МП ФАР других устройств в частности и фазовращателей. Ведутся работы по созданию алгоритма расчета таких антенн. Разрабатываются многофункциональные МП антенные элементы, многофункциональные устройства управления в виде специальных микропроцессоров.

МОНОЛИТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ СВЧ НА GaAs

В современной радиоэлектронной аппаратуре наряду с малощумящими транзисторными усилителями в монолитном исполнении [2, 3] широкое применение находят различные переключатели в цепях коммутации модулей ФАР, для переключения антенн разных частотных диапазонов на один или несколько приемников, для резервирования отдельных участков схем, для переключения требуемых источников гетеродинного сигнала к смесителям, для создания модуляторов, мультиплексоров и демультимплексоров и других функциональных устройств.

В настоящее время интенсивно ведутся разработки матричных переключателей, позволяющих создавать перепрограммируемые переключательные схемы на СВЧ.

Высокое быстродействие, очень малое потребление мощности по цепям управления выгодно отличают переключатели на GaAs полевых транзисторах с барьером Шоттки от переключателей на p-i-n диодах.

По мнению авторов, для получения оптимальных характеристик переключателя наиболее приемлемо переключающая ячейка, состоящая из двух идентичных Г-образных звеньев (рис. 3).

Такое построение ячейки переключателя позволяет в широкой полосе частот получить большую развязку при достаточно малых потерях и, кроме того, такая ячейка имеет высокое входное сопротивление в закрытом состоянии, что упрощает создание на ее основе переключателей с большим числом направлений.

В первом приближении (без учета индуктивности L) расчет удобно вести при помощи графических построений, используя зависимость потерь L_0 и развязок L_2 ячейки от конфигурации транзисторов: $L_0 = f(W_1, W_2)$, $L_2 = f(W_1, W_2)$, где W_1 - ширина транзисторов T_1 и T_4 ; W_2 - суммарная ширина транзисторов T_2 и T_3 .

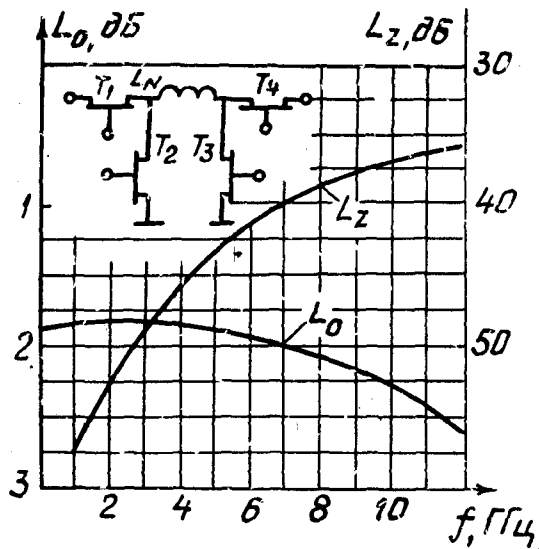


Рис. 3

Пример такого расчета представлен на рис. 4.

Дальнейшее уплотнение конфигураций элементов ячейки (ширина затворов транзисторов, величина индуктивности L_N) производится на этапе проектирования переключателя в целом.

Авторами проведена разработка переключателей с числом направлений 1×1 , 1×2 , 2×2 для диапазона частот 0 - 12 ГГц.

На рис. 3 приведены результаты экспериментальной проверки параметров переключателя 1×1 , выполненного на подложке из GaAs размерами $0,75 \times 0,75 \times 0,2$ мм в переключателе применены транзисторы с длиной затвора $1,2 \mu\text{м}$ и шириной $300 \mu\text{м}$. Переключатель обеспечивает в диапазоне частот 0-12 ГГц приемлемые для многих применений потери и электрическую изоляцию плеч.

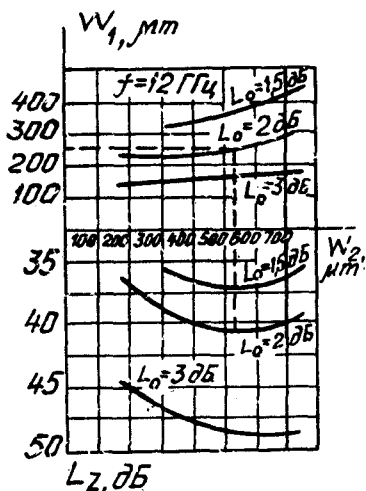


Рис. 4

СВЧ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Авторами исследовалась возможность создания фазовращателей на базе разработанных переключателей. На наш взгляд, наиболее предпочтительным на сегодняшний день является создание гибридно-монокристаллических схем типа тех конструкций, которые описаны в [4].

Электрическая схема ячейки переключателя приведена на рис. 5.

Для применения в широкой полосе частот более пригодны фазовращатели на LC-фильтрах. Однако следует иметь в виду, что фазовращатели на LC-фильтрах имеют существенно большие потери.

Для относительных рабочих полос сигнала (менее 10%) и величин фазового дискрета (менее 45°) достаточно хорошо ведет себя двухшлейфный фазовращатель.

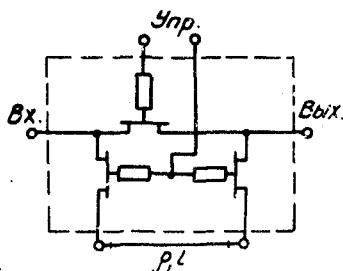


Рис. 5

Очевидно, что $| \Gamma_{ВХЗЛК} | = | S_{11ЗЛК} | \cdot | \Gamma_{ВХ0T} | = | S_{110T} |$. Для минимизации потерь вносимых фазовращателем необходимо и доста-

точно поддерживать максимальные значения $| S_{21ЗЛК} |$ и $| S_{210T} |$; $| S_{21ЗЛК} | = \max$, $| S_{210T} | = \max$. Значение фазового сдвига определяется как разность полученных значений углов $S_{21ЗЛК}$ и S_{210T} при их представлении в виде: $S_{21ЗЛК} = | S_{21ЗЛК} | \exp(j\varphi_1)$; $S_{210T} = | S_{210T} | \exp(j\varphi_2)$, тогда $\Delta\varphi = | \varphi_1 - \varphi_2 |$.

Для оптимизации характеристик фазовращателя в диапазоне частот необходимо задавать импедансы переключающих элементов и производить расчет в каждой частотной точке диапазона.

МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АТТЕНУАТОРОВ

Широкополосные аттенуаторы на транзисторах, управляемые напряжением, широко применяются в схемах АРУ и в модулях АФАР. Транзисторы в этом случае работают при нулевом напряжении смещения сток-исток - как управляемый напряжением резистор.

П-образная схема позволяет получить минимальное начальное ослабление, но при одинаковом диапазоне регулирования по сравнению с Т-образной схемой имеет большую частотную зависимость параметров.

Алгоритмами для реализации была выбрана Т-образная схема аттенуатора. Применялись те же подходы, что и при разработке переключающих элементов. Эквивалентная схема аттенуаторов приведена на рис. 6.

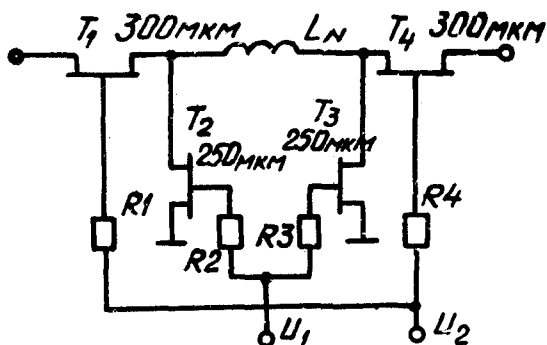


Рис. 6

Аттенюатор реализован в виде полупроводниковой микросхемы на GaAs. Размеры кристалла $0,75 \times 0,75 \times 0,15$ мм. В аттенюаторе ПТШ при ширине затвора 300 мкм использовался конденсатор с емкостью 30 нкФ; при этом сопротивление открытого транзистора составило 8–10 Ом, закрытого – более 10 кОм.

В диапазоне частот 0–12 ГГц аттенюатор обеспечивает начальное ослабление 2–2,5 дБ, диапазон регулирования ослабления 20 дБ и КСВН менее 2.

МАЛОШУМЯЩИЕ СВЧ ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Перспективными с точки зрения минимизации габаритов, энергопотребления, эксплуатационных характеристик являются транзисторные усилители, охлаждаемые посредством термоэлектрических охладителей. Если такие охладители обеспечивают температуру транзистора на уровне минус 40°C , то это позволяет получить выигрыш по эквивалентной шумовой температуре около 30 %.

Значительно уменьшить КСВН многокаскадного усилителя можно путем введения межкаскадного рассогласования. Включение согласующего четырехполюсника между каскадами решает проблему каскадирования монолитных схем малошумящих транзисторных усилителей без применения ферритовых развязывающих устройств [5, 6].

Основные характеристики разработанных малошумящих транзисторных усилителей приведены в табл. 2.

Таблица 2

ТРУ	Диапа- зон частот, Гц	ТШ (экв) К	Ку, дБ	ΔКу(ω) дБ	Δ fс, МГц	КСЕН вхо- да	Энер- го- постр., Вт	Объем, дм	Масса, кг	Темп. окр. среды, °С
ау	3	50	11	-	500	-	20	0,15	0,25	±50
ла	5	60	10,5	-	500	-	20	0,15	0,25	±50
хд	6	77	9,3	-	600	-	20	0,15	0,25	±50
ае	8	110	9,0	-	500	-	20	0,15	0,25	±50
мы	11	130	13	-	750	-	40	2,76	1,5	±50
е	15	150	12	-	1000	-	40	2,76	1,5	±50
	22	200	11	-	1500	-	40	1,9	1,4	±50
не	3	100	30	-	500	-	0,36	0,01	0,025	±10
ох	5	150	33	-	600	-	0,48	0,01	0,025	±10
ла	6	170	32	-	600	-	0,48	0,01	0,025	±10
хд	8	200	30	-	500	-	0,48	0,01	0,025	±10
ае	11	180	25	-	750	-	1,0	0,413	0,5	±10
мы	15	200	23	-	1000	-	1,0	0,386	0,5	±10
е	22	250	20	-	1500	-	1,0	0,338	0,5	±10
с	3	80	30	1,0	500	1,3	0,6	0,15	0,15	±50
вен	5	100	28	1,0	400	1,3	0,6	0,15	0,15	±50
ти	6	140	24	1,0	500	1,3	0,6	0,15	0,15	±50
лем	8	160	22	1,0	500	1,3	0,6	0,15	0,15	±50
МОНОЛИТНЫЕ										
0,2-4,2		500	20	2,0	4000	-	1,2	0,001	0,003	±50
3,4-4		250	30	2,0	600	2,0	0,6	0,001	0,003	±50

ФИЛЬТРЫ ЗЕРКАЛЬНОГО КАНАЛА

Преимущественное распространение в настоящее время получили схемы на основе параллельно связанных линий. Для расчета фильтров создан пакет прикладных программ [7], разработанный по алгоритму, изложенному в работах [8, 9]. Он позволя-

ет синтезировать структуру фильтра в диапазоне частот с учетом дальних связей в резонаторах и потерь в металле и диэлектрике. Время счета семирезонаторного фильтра данным пакетом составляет порядка 7 мин на ЭВМ типа ЕС 1045. Авторами создан ряд миниатюрных СВЧ полосовых фильтров в диапазоне частот 3-23 ГГц с различной шириной полосы пропускания. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что шпильчатые фильтры наиболее рационально использовать до 8 ГГц. Потери в полосе пропускания 14,4 - 17,4 ГГц фильтра на связанных полуволновых резонаторах не более 1,5 дБ. При уменьшении полосы пропускания потери резко увеличиваются. Так фильтр в диапазоне частот 3,451-3,5 ГГц, потери составляют порядка 5,0 дБ, загашение на частоте 3,325 ГГц более 56 дБ. КСВН входа и выхода данных фильтров не более 1,6 в полосе пропускания. Размер платы поликоровой подложки не превышает 5x24x0,5 мм. Хотя эти фильтры и имеют малые габариты вместе с тем, у них достижимая величина добротности резонаторов мала и составляет величины порядка 100.

Применение микрополосковых резонаторов при высоких значениях диэлектрической проницаемости подложки (достижимая добротность) достигает более 400. Это позволяет уменьшить начальные потери в полосе пропускания при малых габаритах фильтра. Возможно создание фильтра порядка 5x5x0,5 мм. Метод конструирования таких фильтров подробно описан в работе [10]. Проведенные исследования показали, что на микрополосковых резонаторах, изготовленных из керамики ТБС, сравнительно легко реализуются фильтры с полосой пропускания от 1 до 50%, при этом начальные потери не превышают 3,0 дБ на краях указанного диапазона частот. В дециметровом диапазоне волн оптимальной является полоса пропускания от 6 до 20%. Минимальные потери не превышают 0,5 дБ.

Так фильтр, изготовленный на частоту 1,5 ГГц, имеет потери не более 1 дБ при полосе порядка 10%, а его габариты 20x15x1 мм (на связанных линиях на поликоровой подложке такой фильтр реализовать нельзя).

СВЧ СМЕСИТЕЛИ И ГЕТЕРОДИННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

При анализе и расчете используется метод спектрального анализа, параметрический подход и метод численного интегри-

рования. Первые два метода находят решения в частотной области, а последний – во временной. При проектировании смесителей мы применяем параметрический метод и метод спектрального гармонического анализа.

При параметрическом подходе расчет качественных показателей обычно разбивается на два этапа: режим большого сигнала (нелинейный этап) и режим малого сигнала (линейный этап). Решение задачи в режиме большого сигнала заключается в нахождении значений гармоник нелинейной проводимости и емкости, которые передаются на линейный этап. На линейном этапе расчета смеситель представляется системой линейных алгебраических уравнений с комплексными переменными на множестве комбинационных частот.

При нескольких воздействующих сигналах наибольшее применение находят методы Вольтерра-Винера и методы, построенные на идеях спектрального гармонического баланса.

Некоторые данные разработок СВЧ смесителей и гетеродинных генераторов приведены ниже.

СВЧ смесители					
Диапазоны частоты,	ГГц	2-6	6-10	8-12	18-22
Δf_c ,	МГц	500	500	1000	1000
Потери,	дБ	7,0	7,0	7,5	7,5
$\Delta K_p(w)$,	дБ	1,5	1,5	1,5	1,5
Напряжение питания,	В	12,0	12,0	12,0	12,0
P гетеродина,	мВт	5-40	5-50	5-40	5-40
Гетеродинные генераторы					
Диапазоны частот,	ГГц	1-3	3-8	8-12	12-22
Уровень мощности,	мВт	30 ⁻⁶	25 ⁻⁶	20 ⁻⁶	10 ⁻⁶
$\Delta f/f$ за 24 ч		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
ТКЧ,	1/°С	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
ТКЧ при САРТ,	1/°С	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Объем,	дм ³	0,224	0,224	0,448	0,448
Масса,	г	300	300	300	300

Список литературы

1. Калниболотский Ю. М., Сундучков К. С., Солодовник А. И. Автоматизированное проектирование электронных схем. – Киев: Техника, 1987. – 301 с.
2. Sunduchkov K. S., Galitsin V. V., Tuzenko A. P. Low-

Noise Microwave Transistor Amplifier with a Matched Input. Proceedings of 2nd International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. September 4-8, 1989, Beijing, People's Republic of China, -P. 51-54

3. Сундучков К. С., Туменок А. В., Мельник Е. А. Базовый элемент монолитного СВЧ переключателя на GaAs полевых транзисторах // Электронная техника. Электроника СВЧ. - 1991. - Вып. 3(437). - С. 17-21.

4. Colloquium on Solid-State Components for Radar, Digest, - Saroy Place, London, 12 Febr., 1988. - P. 3/1-3/5, 4/1-4/5.

5. Гассанов Л. Г., Галицын В. В., Сундучков К. С., Тузенко А. П. Проблемы каскадирования монолитных схем малошумящих транзисторных усилителей // Электронная техника. Электроника СВЧ. - 1991. - Вып. 4(438). - С. 13-16.

6. Гасанов Л. Г., Сундучков К. С., Галицын В. В., Тузенко А. П., Гриненко Е. П. Монолитный малошумящий транзисторный усилитель сантиметрового диапазона // Радиотехника. - 1989. - №. -С. 23-25.

7. Лаучюс Ю. А., Ломака В. Л., Беляцкене И. П. Программа для синтеза и анализа П-резонаторного фильтра на связанных микрополосковых линиях. - Вильнюс, 1988. - 105с. Рег. в Гос. ФАП №5080001391.

8. Маттея Д. Л., Джонс Е. М. Т. фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. - т. 1, 2. -М.: Связь, 1971.

9. Галицын В. В., Ивашка В. П., Лаучюс Ю. А., Ломака В. Л., Сундучков К. С. Влияние потерь на параметры связанных микрополосковых структур // Изв. вузов. Радиофизика. -1987. - XXX, №. - С. 753-776.

10. Беляев Б. А., Тюрин В. В., Еписеев А. К., Рагзин Г. М. Исследование микрополосковых резонаторов и устройств СВЧ на их основе. Ч. 3. -Красноярск, -1988. - (Препринт №468Ф/АН СССР ИФ СО).