Российская академия наук
Институт прикладной астрономии

Сообщения ИПА РАН № 133

А. В. Ипатов, Н. Е. Кольцов, Н. Г. Лубешкин

Новая элементно-узловая база широкополосных каналов промежуточных частот радиотелескопа

Санкт-Петербург
2000

УДК 521.8

Ипатов А. В.[1], Кольцов Н. Е.[1], Лубешкин Н. Г.[2]. [1] Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, [2] Государственное предприятие “Микротехника”, Санкт-Петербург. Новая элементно-узловая база широкополосных каналов промежуточных частот радиотелескопа.

Ключевые слова: радиотелескоп, сигнал ПЧ, передача, усиление, канал.

Рассматриваются схемы и параметры микросборок узлов диапазона промежуточных частот (100 ÷ 1000 МГц) для радиоастрономической аппаратуры: магистральные усилители с коррекцией неравномерности затухания сигналов в коаксиальных линиях передачи, широкополосные каналы радиометрических измерителей и РСДБ-конверторов, устройства коммутации и распределения сигналов. Новая элементно-узловая база расширяет динамический диапазон принимаемых сигналов, обеспечивает совместимость с современными РСДБ-терминалами, упрощает конструкцию, повышает надежность и удобство эксплуатации аппаратуры радиотелескопа.

Ipatov A. V., Koltsov N. E., Lubeshkin N. G.. Hybrid integrated microcircuits for wide-band IF channels of a radiotelescope.

Keywords: radiotelescope, IF signal, transmission, amplification, channel.

New hybrid integrated microcircuits for IF channels of a radiotelescope are submited. There are wide-band low-noise amplifiers, attenuators, filters and switchs of channels. The bandwidth of these units is 100–1000 MHz. The dinamic range of low-noise amplifiers is 18 dB more than it was before.

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 133 – Санкт-Петербург, 2000. – 15 с.

© Институт прикладной астрономии, 2000.

Содержание

1. Введение 4

2. Широкополосный канал радиометрического измерителя сигналов 7

3. Микросборка широкополосного канала конвертора 10

4. Распределитель каналов конвертирования модуля СПС 12

5. Магистральный усилитель линии передачи промежуточных частот 12

6. Доработка преобразователя частот РПУ 14

7. Заключение 15

Список литературы 15

1. Введение

В радиотелескопах комплекса КВАЗАР сигналы, преобразованные радиоастрономическими приемными устройствами (РПУ) к полосе промежуточных частот (ПЧ), через коммутатор и коаксиальные линии передаются на радиометрические измерители (РМИ) и РСДБ-аппаратуру преобразования и регистрации сигналов (рис. 1).

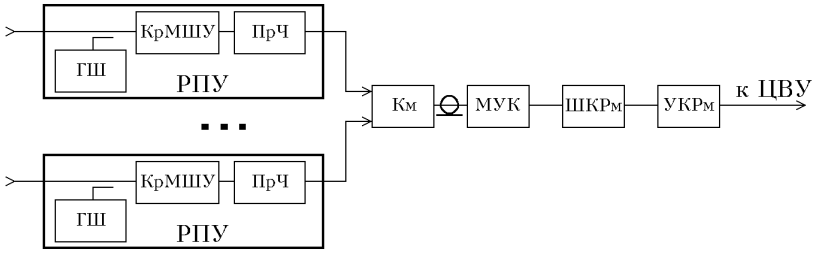


Рис. 1. Упрощенная структурная схема измерительного тракта радиометра: КрМШУ – криоэлектронный малошумящий усилитель СВЧ, ПрЧ – преобразователь частот, ГШ – генератор шума СВЧ, Км – широкополосный коммутатор, МУК – широкополосный магистральный усилитель с коррекцией неравномерности затуханий, ШКРм, УКРм – широкополосный и узкополосный каналы радиометра, ЦВУ – цифровое выходное устройство радиометра.

Из-за неодинакового затухания сигналов в коаксиале на разных частотах неравномерность спектра сигнала в полосе ПЧ на выходе линии передачи может стать весьма большой и привести к недопустимым искажениям сигналов в устройствах с ограниченным динамическим диапазоном, в первую очередь в малошумящих широкополосных усилителях (МШУ). В линии передачи радиотелескопа обсерватории “Светлое” эта неравномерность составляет 11 ÷ 12 дБ в полосе частот 100 ÷ 600 МГц и 18 ÷ 19 дБ в полосе 100 ÷ 1000 МГц. Для выравнивания спектра сигнала на выходе коаксиальной линии, а при большой длине линии — и в ее разрыве, необходимо устанавливать МШУ с коррекцией неравномерности затухания. В макете аппаратуры “Ключ” [1] эту задачу выполняет блок предварительного усиления и распределения сигналов.

До настоящего времени во всех основных узлах линии передачи ПЧ, начиная с преобразования частот РПУ и кончая широкополос-

ным детектором РМИ, применяются разработанные в 80-х годах МШУ класса “Олимпик”: М42118-2, М42136 и их аналоги. В этих усилителях выходная мощность гармонического сигнала начинает ограничиваться на уровне (1–3) мВт, а шумовой сигнал на уровне $P = (0.4 - 0.5)$ мВт. При этом линейность амплитудной характеристики (АХ) широкополосного канала обеспечивается в динамическом диапазоне

$$D \;\; = \;\; 10 \;\; lg \;\; (P/P \;\; K) \;\; - \;\; 20, \quad ,$$

где P — мощность собственных шумов МШУ, приведенная к его входу, K — коэффициент усиления МШУ, а второе слагаемое (20 дБ) учитывает то, что минимальная мощность входного сигнала $P_{x\ min}$ должна быть по крайней мере на 20 дБ выше чем P , чтобы потери чувствительности радиотелескопа не превысили 1%. Поскольку для МШУ класса “Олимпик” можно принять шумовую полосу $B \approx 10^9$ Гц, шумовую температуру $T \approx 300$ и ≈ 400 (26 дБ), то

$$P \;\; = \;\; 1.38 \;\; 10^{-23} \quad B \quad T \approx 4 \;\; 10^{-12}$$

и, соответственно, $D \;\; \approx 36$ дБ.

Следовательно, динамический диапазон приемной аппаратуры, изготовленной на отечественной элементно-узловой базе 80-х годов, в любом случае не превышает 36 дБ. На практике динамический диапазон существенно сужается из-за избыточного усиления отдельных экземпляров МШУ в приемно–усилительном тракте и отсутствия между каскадами усиления элементов согласования уровней сигналов (широкополосных управляемых аттенюаторов). Диаграмма распределения уровней сигналов (рис. 2) показывает, что среднее значение динамического диапазона канала “РПУ — коаксиальная линия — усилительно-распределительный блок — широкополосный тракт РМИ” сужается до 16 дБ при работе с охлажденным РПУ (шумовая температура радиотелескопа $T_\eta \;\; \approx \;\; 30$ К) и до 13 дБ при работе с неохлажденными РПУ ($T\eta \;\; \approx \;\; 300$ К). В зависимости от диапазона частот и экземпляра РПУ эти цифры могут изменяться в ту или иную сторону на несколько децибел.

Поскольку для неискаженного приема шумового сигнала необходим тракт с линейным участком амплитудной характеристики не менее 10 дБ даже при правильно установленном уровне сигнала, нетрудно заметить, что разработанная ранее аппаратура работает в широкой полосе частот ($B \approx 500 \;\; \div \;\; 900$ МГц) без запаса динамического диапазона, а в некоторых случаях может ощущаться даже его дефицит.

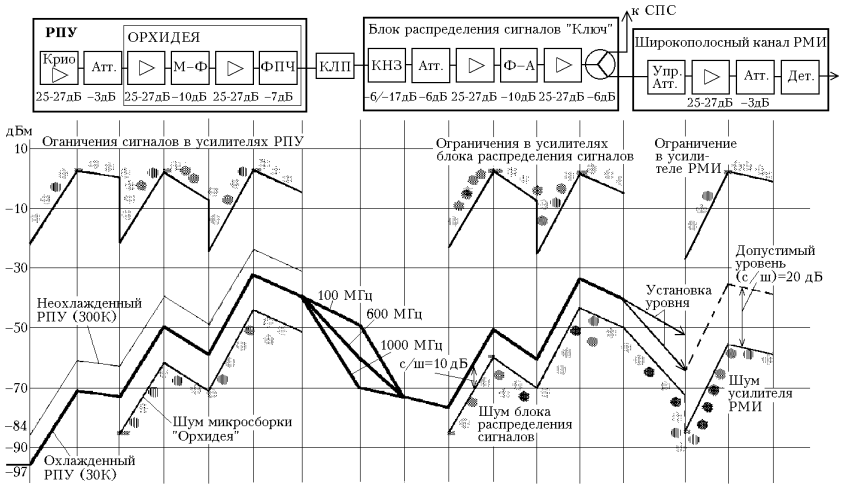


Рис. 2. Распределение уровней сигналов: Атт. – аттенюатор, М–Ф – модулятор и фильтр, ФПЧ – фильтр ПЧ, КЛП – коаксиальная линия передачи, КНЗ – корректор неравномерности затухания в линии, Ф–А – фильтр и аттенюаторы, Дет. – детекторы, Крио. – криостат с МШУ.

В разработанной ранее аппаратуре нет возможности расширить динамический диапазон и за счет снижения уровня сигналов в тракте, так как начинают влиять собственные шумы усилителей тракта: в аппаратуре “Ключ” например отношение мощности сигнала к мощности собственных шумов снижается до 8 ÷ 10 дБ (рис. 2), что ведет к ощутимым (до 10÷15 %) потерям чувствительности радиометра. Для устранения этого недостатка необходимы магистральные МШУ с расширенным динамическим диапазоном, которые могли бы устанавливаться на стыках отдельных участков коаксиальной линии передачи (например, на концах азимутальной петли).

В данной работе рассматривается новая элементно-узловая база для широкополосных каналов радиометра, которая решает проблему динамического диапазона. Одновременно рассматривались и возможности расширения диапазона частот канала с 500 МГц (ПЧ = 100 ÷ 600 МГц) до 900 МГц (ПЧ = 100 ÷ 1000 МГц), что необходимо для обеспечения совместимости аппаратуры со стандартом Mark IV, а так-

же вопросы коррекции частотной зависимости затуханий сигналов в коаксиальных линиях и коммутирующих устройствах с учетом современных требований к РСДБ-аппаратуре.

2. Широкополосный канал радиометрического измерителя сигналов

Широкополосный канал РМИ должен обеспечивать усиление сигналов ПЧ, установку уровня сигнала, необходимого для нормальной работы квадратичного детектора, и возможность переключения режимов работы радиометра. В соответствии с этими функциями был разработан широкополосный канал, содержащий входной коммутатор, управляемый аттенюатор и МШУ с расширенным динамическим диапазоном (рис. 3).

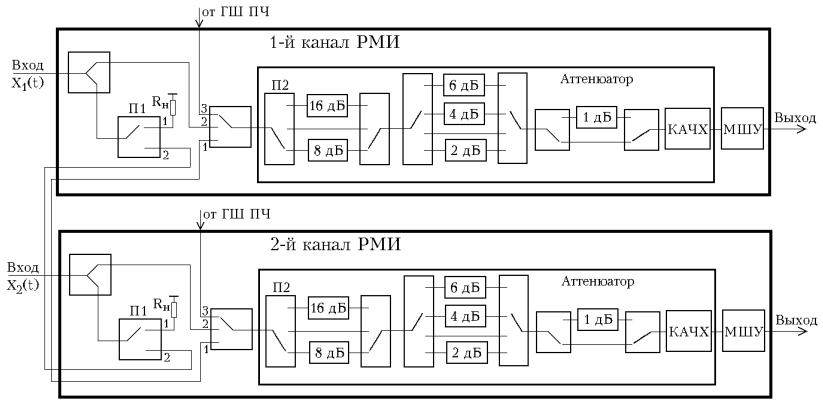


Рис. 3. Функциональная схема двух широкополосных каналов РМИ с переключателями режимов работы: КАЧХ – корректор неравномерности амплитудно-частотной характеристики, ГШ ПЧ – генератор шума диапазона ПЧ, Rн – согласованная нагрузка.

Каждый широкополосный канал выполнен в виде гибридно-интегральной сборки (ГИС) на микроплате. В РМИ, содержащем два широкополосных канала, обеспечивается возможность работы в следующих режимах радиометрии:

- модуляционный (с модуляцией на СВЧ) или компенсационный (без модуляции) – одновременный (независимый) прием двух входных сигналов [$x_1(t)$ и $x_2(t)$], поступающих с выходов РПУ;
- парноканальный модуляционный прием одного из двух сигналов, реализуемый при использовании двухканального РПУ (по схеме Грахама);
- одновременный (независимый) прием сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в режиме с модуляцией по ПЧ;
- парноканальный прием одного из двух [$x_1(t)$ или $x_2(t)$] сигналов в режиме с модуляцией по ПЧ.

При использовании РПУ с одним каналом для каждой поляризации [2] парноканальный режим работы реализуется только при модуляции по ПЧ. Режимы работы устанавливаются двумя переключателями в каждом канале (П1, П2 и П3, П4) в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Состояния переключателей (номера замыкаемых контактов) в разных режимах работы радиометра.

Режим работы, принимаемый сигнал	П1	П2	П3	П4
Модуляционный или компенсационный				
сигнал $x_1(t)$	1	2	—	—
сигнал $x_2(t)$	—	—	1	2
Парноканальный модуляционный (в 2-канальном РПУ):				
сигнал $x_1(t)$	2	2	1	1
сигнал $x_2(t)$	1	1	2	2
Модуляция по ПЧ, сигналы $x_1(t)$ и $x_2(t)$ одновременно:				
полупериод модуляции 1	1	2	1	3
полупериод модуляции 0	1	3	1	2
Парноканальный с модуляцией по ПЧ, сигнал $x_1(t)$:				
полупериод модуляции 1	2	2	1	3
полупериод модуляции 0	2	3	1	1
Парноканальный с модуляцией по ПЧ, сигнал $x_2(t)$:				
полупериод модуляции 1	1	1	2	3
полупериод модуляции 0	1	3	2	2

Для реализации всех возможностей по оперативному изменению режимов работы в соответствии с задачами радиометрических наблюдений при разработке четырехканальных программируемых РМИ ра-

диотелескопов комплекса КВАЗАР используются две одинаковых пары широкополосных каналов, представленных на рис. 3.

Аттенюатор в широкополосном канале выполнен на переключаемых p–i–n диодами резисторных Т–схемах, обеспечивающих достаточную широкополосность и высокую температурную стабильность. Трехступенчатая схема аттенюатора (рис. 3) дает возможность получать перестройку в диапазоне $0 \div 31$ дБ с шагом 1 дБ при сравнительно небольших начальных (в состоянии 0 дБ) потерях. Погрешность установки затуханий меньше $0.3 \div 0.5$ дБ. Для выравнивания величины затухания в полосе частот $100 \div 1000$ МГц введена схема коррекции неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

МШУ канала выполнен по трехкаскадной схеме. В первом каскаде используется малошумящая микросхема S868T с корректором АЧХ на выходе для получения равномерности усиления в полосе частот до 1000 МГц. Второй и третий каскады выполнены на транзисторах BFG-591 по схеме с общим эмиттером. Для коррекции АЧХ в эти каскады введены RC–звенья в цепи баз, индуктивности в цепи обратной связи коллектор–база и RC–противосвязи в цепи эмиттеров.

Разработанный МШУ имеет такие же чувствительность и усиление, что и применявшиеся ранее МШУ класса “Олимпик”, но динамический диапазон линейного участка АХ канала расширен примерно на 17 дБ (табл. 2), что значительно упрощает настройку трактов радиотелескопа и гарантирует возможность проведения радиометрических наблюдений с высокой точностью. Введение управляемого аттенюатора еще на 31 дБ расширяет допустимый динамический диапазон входных сигналов, что дает возможность применять РМИ практически на любом радиотелескопе.

Таблица 2. Параметры микросборки широкополосного канала радиометра.

Диапазон частот, МГц	100 ÷ 1000
Коэффициент шума МШУ	2
Уровень ограничения гармонического сигнала МШУ (1 дБ компрессии на частоте 600 МГц), дБм	18
Уровень ограничения шумового сигнала на выходе МШУ, дБм	15
Потери во входных делителях мощности, переключателях и аттенюаторе, дБ	11 ÷ 12
Коэффициент стоячей волны по входу и выходу	1.6 ÷ 1.8
Неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне, дБ	1.5
Волновое сопротивление входа и выхода, Ом	50
Диапазон регулировки аттенюатора, дБ	0 ÷ 31
Шаг регулировки аттенюатора, дБ	через 1
Минимальная мощность сигнала на входе МШУ, дБм	−64
Минимальная мощность сигнала на входе канала, дБм	−52
Динамический диапазон линейного участка АХ, дБ	52
Динамический диапазон входных сигналов, дБ	83

3. Микросборка широкополосного канала конвертора

Микросборка широкополосного канала конвертора, предназначенного для РСДБ-терминалов, устанавливается на входе каждого канала конвертирования перед квадратурным преобразователем частот и содержит входной управляемый аттенюатор для установки необходимого уровня сигнала, коммутируемый преселектор для подавления помех, создаваемых комбинационными каналами преобразования частот, и МШУ (рис. 4).

Управляемый аттенюатор и МШУ здесь такие же, как и в рассмотренном выше канале РМИ.

Преселектор выполнен из четырех переключаемых p–i–n–диодами полосовых фильтров на поддиапазоны частот 100 ÷ 207 МГц, 143 ÷ 347 МГц, 283 ÷ 592 МГц, 528 ÷ 1032 МГц. Каждый полосовой фильтр составлен из пары фильтров верхних и нижних частот, частоты среза которых соответствуют нижней (fн) и верхней (fв) границам поддипазона. Потери в фильтрах не превышают 1.7 дБ, а неравномерность потерь

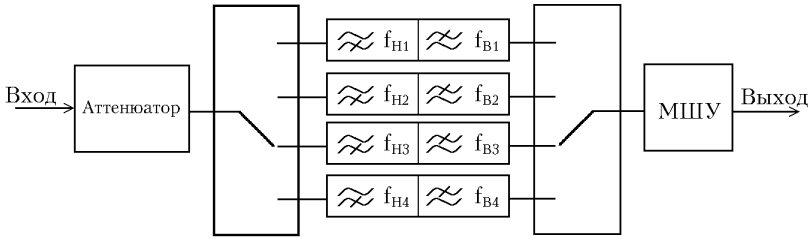


Рис. 4. Широкополосный канал конвертора.

в рабочей полосе пропускания менее 0.5 дБ. Взаимное перекрытие полос пропускания фильтров обеспечивает возможность приема сигналов в верхней и нижней боковых полос пропускания до 32 МГц при настройке конвертора на любую частоту (за исключением нижней полосы при настройке на частоты, близкие к нижней границе диапазона 100 МГц).

Фильтры имеют достаточно хорошую избирательность: внеполосное затухание превышает 35 дБ при $f < 0.5$ fн и $f > 1.5$ fв. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) практически линейна в полосе пропускания: нелинейность ФЧХ меньше погрешности измерительной аппаратуры, составляющей 2–3 град.

Микросборка выполнена на одной подложке и удобна для сопряжения с квадратурным преобразователем частот.

Микросхемы, широко применяемые в современных квадратурных преобразователях частот, имеют коэффициент шума 12 дБ и работают в полосе частот около 2 ГГц, а пересчитанная ко входу мощность собственных шумов составляет около -71 дБм. При этом уровень сигнала на входе преобразователя должен быть не менее -51 дБм, а на выходе МШУ рассматриваемого канала — не менее -48 дБм (с учетом затухания 3 дБ в согласующем аттенюаторе между МШУ и преобразователем). Учитывая параметры МШУ (табл. 2), можно заметить, что динамический диапазон линейного участка АХ рассматриваемого тракта составляет около 63 дБ. Следовательно, потери когерентности сигналов из-за амплитудных ограничений в широкополосном тракте практически исключены, а качество РСДБ-конвертора определяется в основном последующими устройствами: квадратурным преобразователем частот, его гетеродином, видеоусилителями и квантователями сигналов.

4. Распределитель каналов конвертирования модуля СПС

Многоканальные терминалы СПС обычно содержат устройство оперативного подключения конверторов к тому или иному РПУ в соответствии с планируемой программой наблюдений. Обычно обеспечивают возможность одновременного приема сигналов обеих ортогональных поляризацией, т.е. предусматривают два входа терминала (L и R), а число конверторов, подключаемых к любому из входов, варьируются.

В терминале "Модуль СПС", используется коммутирующее устройство, распределяющее 4 конвертора между двумя входами в произвольной пропорции (рис. 5). Предусматривается также возможность параллельного подключения аналогичных устройств к выходам L и R для наращивания числа каналов конвертирования.

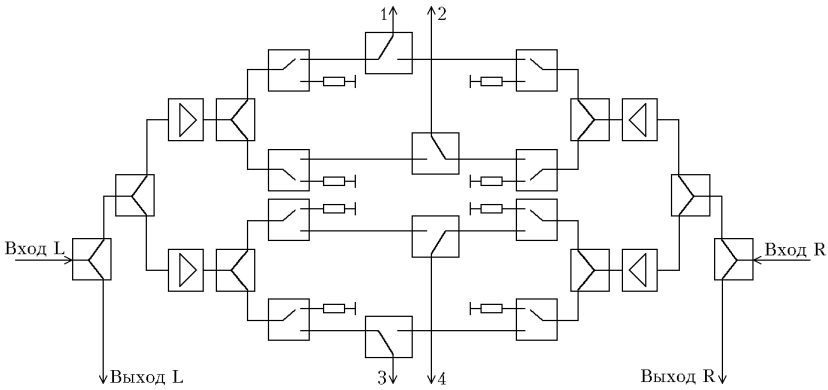


Рис. 5. Распределитель каналов конвертирования.

5. Магистральный усилитель линии передачи промежуточных частот

Затухание сигналов ПЧ в коаксиальных линиях передачи между РПУ и аппаратурой преобразования и регистрации зависит от частоты и, как показали исследования, проведенные в обсерватории "Светлое", составляет 6 ÷ 7 дБ на частоте 100 МГц, 17 ÷ 18 дБ на частоте 600 МГц

и 23 ÷ 24 дБ — на частоте 1000 МГц. Для усиления сигналов и выравнивания его спектра в полосе ПЧ разработан магистральный усилитель с коррекцией неравномерности затуханий (рис. 6). Усилитель содержит последовательно соединенные входной аттенюатор, корректор неравномерности затуханий, МШУ и трехдецибельный делитель мощности для подключения РМИ и терминала СПС.

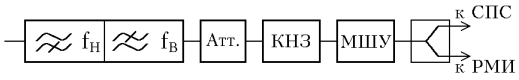


Рис. 6. Магистральный усилитель линии передачи ПЧ: Атт – аттенюатор, КНЗ – корректор неравномерности затухания

Входной фильтр, состоящий из фильтров верхних и нижних частот, изготовлен в двух модификациях: на полосу частот 100 ÷ 1000 МГц и на полосу 500 ÷ 1000 МГц. Последняя модификация более предпочтительна при использовании РСДБ-терминалов диапазона частот 500 ÷ 1000 МГц (Mark IV, VLBA 4), поскольку здесь лучше подавляются помехи линии передачи ПЧ, создаваемые передатчиками систем связи и других радиоизлучений. Параметры фильтров аналогичны рассмотренным выше фильтрам широкополосного канала конвертора.

Аттенюатор перестраивается в диапазоне 0 ÷ 31 дБ с шагом 3 дБ.

МШУ в данном устройстве такой же как и в других узлах (см. табл. 2).

Корректор неравномерности затухания выполнен по Т–образной схеме с последовательно-параллельными контурами, настроенными на частоту 1100 МГц. Затухания на частотах 100 МГц, 600 МГц и 1000 МГц составляют соответственно 21 дБ, 15 дБ и 4 дБ. Неравномерность коэффициента передачи в полосе частот ПЧ для коаксиальной линии с рассматриваемым магистральным усилителем не превышает 1.5 дБ.

Магистральный усилитель выполнен в виде микросборки в герметизированном корпусе с входным и выходным коаксиальными разъемами 7 / 3.5 мм.

По сравнению с разработанной ранее аппаратурой макета “Ключ” данный магистральный усилитель имеет следующие преимущества:

- диапазон частот расширен до 1000 МГц;
- динамический диапазон линейного участка АХ линии передачи расширен на 16 дБ;

- предусмотрена возможность изменения уровня сигнала в пределах $0 \div 21$ дБ при установке на радиотелескопах (для исключения влияния разброса величин затуханий при разных типах и длинах коаксиальных линий);
- одна микросборка заменяет 7 высокочастотных элементов, применявшихся ранее, и исключает 8 пар коаксиальных разъемов для их соединения, что повышает эксплуатационную надежность линии передачи ПЧ.

6. Доработка преобразователя частот РПУ

В преобразователях частот РПУ комплекса "Квазар" используются разработанные в 80-х годах микросборки типа "Орхидея", которые содержат выходной фильтр с полосой пропускания $100 \div 600$ МГц, не совпадающей с диапазоном частот РСДБ-терминалов Mark IV и VLBA 4, а также микроплату МШУ класса "Олимпик" с небольшим динамическим диапазоном.

Рассмотренная элементно-узловая база дает возможность устранить эти недостатки путем переработки конструкции или замены микросборок "Орхидея". В новой микросборке вместо фильтра $100 \div 600$ МГц следует установить фильтр с полосой $100 \div 1000$ МГц, а МШУ класса "Олимпик" заменить рассмотренным выше трехкаскадным МШУ с расширенным динамическим диапазоном. Кроме того на входе микросборки "Орхидея" (по СВЧ) или перед выходным МШУ (по ПЧ) полезно установить переключаемый p–i–n–диодами высокостабильный резисторный аттенюатор (например, 0–6–12 дБ) для устранения неоправданно большого разброса уровней сигналов в разных каналах РПУ, обусловленного разбросом коэффициентов усиления трактов СВЧ и изменением уровней шумов РПУ. Выравнивание уровней сигналов в каналах РПУ всех диапазонов частот не только улучшает режим работы последующих устройств передачи и преобразования сигналов, но и устраняет возможность появления взаимных межканальных помех в линиях передачи и распределения сигналов при большом различии уровней сигналов.

Необходимые для модернизации микросборки "Орхидея" элементы (фильтр, МШУ, управляемый аттенюатор диапазона ПЧ) имеются в составе магистрального усилителя и рассмотрены выше.

Проведение сравнительно несложных доработок преобразователей частот РПУ позволит решить важнейшую задачу совмещения с РСДБ-терминалами Mark IV, VLBA 4 и устранить все затруднения, связанные с ограничениями динамического диапазона сигналов. За счет нового МШУ в преобразователе частоты динамический диапазон линейного участка АХ увеличивается до 51 дБ для охлажденного РПУ и до 28 дБ — для неохлажденного РПУ, а управляемый аттенюатор дополнительно расширяет допустимый динамический диапазон сигналов.

7. Заключение

В результате разработок, проведенных совместно ИПА РАН и государственным предприятием "Микротехника", создана и освоена в производстве новая элементно-узловая база диапазона ПЧ (100 ÷ 1000 МГц) для радиоастрономической аппаратуры. Разработанные гибридно-интегральные микросборки используются в каналах передачи и распределения сигналов ПЧ на радиотелескопе, входит в состав разрабатываемой РСДБ-системы преобразования сигналов "Модуль СПС" и программируемого радиометрического модуля ПРМ-2.

Применение новой элементно-узловой базы решает задачу расширения диапазона ПЧ и совмещения с РСДБ-терминалами Mark IV, VLBA 4, устраняет проблемы, связанные с искажениями сигналов из-за ограниченого динамического диапазона аппаратуры, упрощает конструкцию, повышает надежность аппаратуры и удобство эксплуатации систем передачи, преобразования и измерения сигналов ПЧ на радиотелескопе.

Список литературы

[1] С.Ю.Горновесов, С.Д.Климов, Н.Е.Кольцов, В.И.Царёв. Система преобразования и регистрации сигналов в диапазоне промежуточных частот радиоинтерферометра. Сообщение ИПА РАН, 1995, №83.

[2] Д.В.Иванов, А.В.Ипатов, И.А.Ипатова, В.В.Мардышкин, А.Г.Михайлов. Труды ИПА РАН. Техника радиоинтерферометрии. Вып.2. С.-Пб., 1997, р. 242—256.

А. В. Ипатов, Н. Е. Кольцов, Н. Г. Лубешкин
Новая элементно-узловая база широкополосных каналов промежуточных частот радиотелескопа.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы LaTeX

Подписано к печати 14.04.2000 Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Печ.л. 1
Уч.-изд.л. 1 Тираж 110 Заказ бесплатно

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН
(188350 Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща).

Институт прикладной астрономии РАН, 197110, С.-Петербург, Ждановская ул., 8.