

## БЛОКИ УСИЛЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ

© 2011 г. Н. Е. Кольцов, Д. А. Маршалов, В. В. Мардышкин, Л. В. Федотов

*Институт прикладной астрономии РАН  
Россия, 191187, С.-Петербург, наб. Кутузова, 10*

Поступила в редакцию 22.03.2011 г.

Для радиоастрономических приемников диапазонов волн 3.5/13 см и 6 см разработаны широкополосные блоки усиления и преобразования частот сигналов со встроенными гетеродинами. Использование блоков позволяет расширить полосу приема до 900 МГц в диапазоне волн 6 см и до 2 ГГц в диапазоне волн 3.5 см, увеличить динамический диапазон приемников на 12–15 дБ, повысить помехозащищенность в диапазоне волн 13 см и улучшить ряд параметров, влияющих на качество данных, получаемых при радиоастрономических наблюдениях. Установка блоков на радиотелескопах комплекса “Квазар-КВО” позволила повысить надежность и сократить состав приемной аппаратуры.

### ВВЕДЕНИЕ

Широкополосные блоки усиления и преобразования частот (б.п.ч.) служат для приема сигналов сверхвысоких частот, усиления и фильтрации высокочастотного (в.ч.) сигнала в рабочей полосе частот, модуляции коэффициента усиления канала и преобразования принимаемого сигнала к базовой полосе промежуточных частот, в которой работают радиоастрономические системы регистрации сигналов [1–3]. До последнего времени на радиотелескопах еще использовались разработанные более 20 лет назад б.п.ч., не в полной мере соответствующие возросшим требованиям в части широкополосности, динамического диапазона, минимизации искажений принимаемых сигналов, эксплуатационной надежности, габаритов и массы.

В данной статье представлены результаты разработки двух типов б.п.ч. для радиоастрономических приемников, выполненной Институтом прикладной астрономии РАН в кооперации с ЗАО “Радиоэлектронная технологическая аппаратура” (С.-Петербург). Один из них (БПЧ-3.5/13) обеспечивает усиление и преобразование частот сигналов одновременно в двух диапазонах волн – 3.5 и 13 см, в которых регулярно проводятся наблюдения методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (р.с.д.б.) по международным и национальным программам в интересах координатно-временного и эфемеридного обеспечения, астрометрии и геодезии [4]. Другой блок (БПЧ-6) предназначен для усиления и преобразования частот сигналов двух поляризаций в диапазоне волн 6 см, в котором активно ведутся астрофизические исследования.

### КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ Б.П.Ч.

Оба б.п.ч. выполнены в одинаковых конструктивах и содержат по две интегрально-гибридных микросборки широкополосных приемных каналов, микросборку гетеродина с двумя выходами, а также платы управления гетеродином (Р4300) и электропитания микросборок (Р6209-М). Блоки различаются микросборками приемных каналов и гетеродинов: двухдиапазонный БПЧ-3.5/13 (рис. 1) содержит микросборки приемных каналов диапазонов волн 3.5 см (ПК-3.5) и 13 см (ПК-13) и микросборку гетеродина Г-8.08/2.02, работающего на двух частотах – 8.08 и 2.02 ГГц, а двухканальный БПЧ-6 имеет две одинаковые микросборки приемных каналов диапазона волн 6 см (ПК-6) и микросборку гетеродина Г-4.5, работающего на частоте 4.5 ГГц.

Каждая микросборка приемного канала содержит широкополосные усилители и фильтры соответствующего диапазона волн, модулятор коэффициента усиления, используемый в режиме модуляционного радиометра, двойной балансный смеситель, усилитель и фильтр выходного сигнала промежуточной частоты. Первые экспериментальные образцы интегрально-гибридных микросборок приемных каналов разработаны в 2007 г. [5], но по результатам их исследования в схему и конструкцию микросборок внесены изменения, позволившие существенно улучшить ряд основных параметров и повысить их стабильность в условиях длительной эксплуатации. Позднее для рассматриваемых б.п.ч. были разработаны и микросборки гетеродинов.

Микросборки и платы питания и управления размещены в типовом термостатируемом блоке с

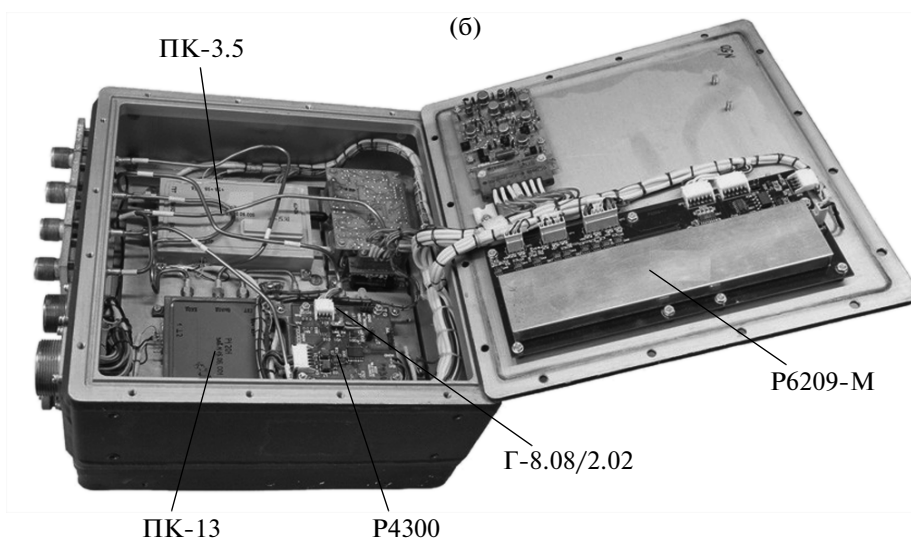
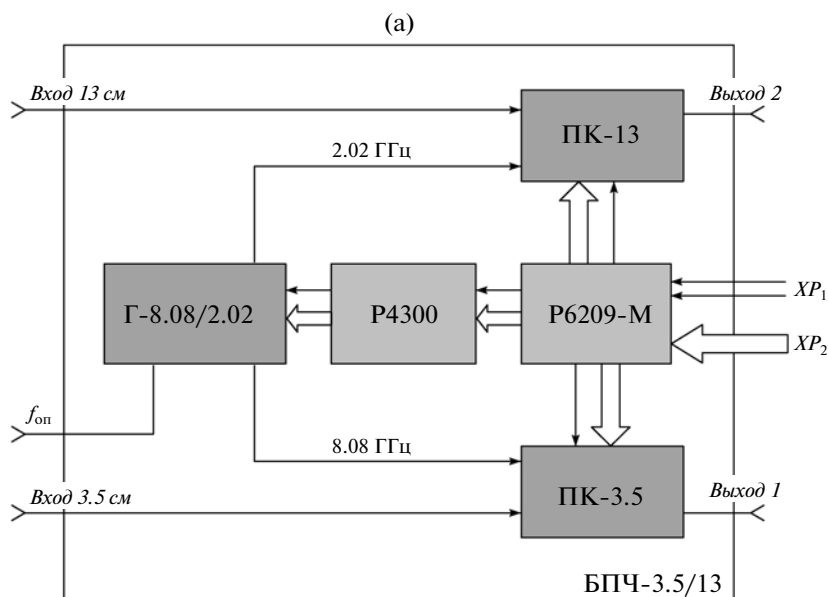


Рис. 1. Функциональная схема (а) и общий вид (б) двухдиапазонного блока БПЧ-3.5/13.

габаритами  $250 \times 255 \times 120$  мм, внутри которого с помощью элементов Пельтье поддерживается температура  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$  [1]. На боковой стенке блока установлены герметичные в.ч.-разъемы с сечением канала  $7/3$  мм. Через эти разъемы вводятся в.ч.-сигналы *Вход 3.5 см* и *Вход 13 см* и сигнал высокостабильной опорной частоты  $f_{\text{оп}}$ , выводятся сигналы промежуточных частот *Выход 1* и *Выход 2*. Входные и выходные разъемы блока соединены с микросборками полужестким коаксиальным кабелем РК-50–2–25 с малыми потерями.

Для подключения к общей системе управления и электропитания радиотелескопа на боковой стенке б.п.ч. имеются разъемы  $XP_1$  (2РМГ22510Ш1Е2Б) и  $XP_2$  (2РМГ30532Ш1Е2Б). Входные разъемы используются для подключения блока к охлаждае-

мым малошумящим усилителям соответствующих диапазонов волн, установленным рядом с облучателями антенны радиотелескопа. К выходным разъемам подключаются системы преобразования и регистрации сигналов [2, 3].

#### Микросборка приемного канала ПК-3.5

Микросборка приемного канала ПК-3.5 содержит входной в.ч.-усилитель  $УВЧ_1$  с низким уровнем собственных шумов и усилитель  $УВЧ_2$  с большим динамическим диапазоном. Между ними включен модулятор коэффициента усиления и в.ч.-фильтр на заданную полосу пропускания  $\Delta f$  (рис. 2). При этом рационально разрешаются противоречивые требования по уменьшению темпе-

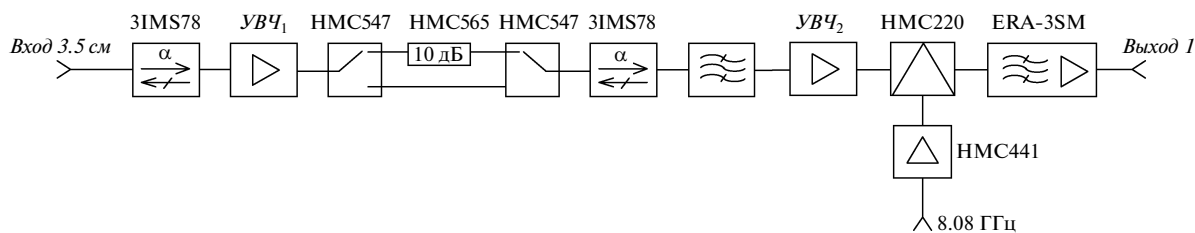


Рис. 2. Функциональная схема микросборки ПК-3.5.

ратуры собственного шума  $T_{ш}$  и расширению динамического диапазона приемного канала.

Чтобы полностью исключить влияние собственного шума б.п.ч. на чувствительность радиотелескопического приемника, температуру  $T_{ш}$  этого шума необходимо снизить, по крайней мере, до 400 К, так как коэффициент усиления предшествующего охлаждаемого малошумящего усилителя ограничен и (с учетом коаксиального кабеля между этим усилителем и б.п.ч.) не превышает 26–29 дБ. За счет использования в  $УВЧ_1$  микросхемы FMA219 с коэффициентом шума 1.4 и установки на входе микросборки ферритового вентиля 3IMS78, обеспечивающего согласование в широкой полосе частот с предшествующим охлаждаемым усилителем, шумовая температура б.п.ч. в диапазоне волн 3.5 см снижена до 380 К. Коэффициент стоячей волны (к.с.в.) напряжения на входе микросборки определяется, в основном, входным коаксиально-полосковым переходом СРГ-50–751ФВ и не превышает 1.35.

$УВЧ_2$  собран на микросхемах усилителей HMC462LP5 и HMC441LP3 с допустимыми выходными мощностями до 25 и до 32 мВт соответственно. Это обеспечивает линейность переходной амплитудной характеристики приемного канала (компрессия характеристики  $<1$  дБ) в динамическом диапазоне 58 дБ относительно уровня собственных шумов. Поскольку минимальный уровень входного шумового сигнала устанавливается выше уровня собственного шума канала, по крайней мере, на 20 дБ, допустимый динамический диапазон входных сигналов составляет 38 дБ при  $\Delta f = 900$  МГц и 34.5 дБ при  $\Delta f = 2$  ГГц. Этого вполне достаточно для решения большинства радиотелескопических задач.

Для диапазона волн 3.5 см разработаны микросборки приемного канала двух модификаций: микросборка ПК-3.5 с полосой пропускания  $\Delta f = 900$  МГц (8.18–9.08 ГГц), используемая на радиотелескопах комплекса “Квazar-КВО”, и аналогичная микросборка ПК-3.5Ш с  $\Delta f = 2$  ГГц (8.18–10.18 ГГц). Расширение полосы пропускания б.п.ч. при достаточной широкополосности облучателя антенны и охлаждаемого усилителя позволяет улучшить точность определения временных задержек сигнала на базе радиоинтерфе-

рометра за счет использования синтеза полосы частот при обработке результатов р.с.д.б.-наблюдений [6]. Расширение полосы частот  $\Delta f$  позволяет повысить также чувствительность радиотелескопа в режиме радиометрических измерений в континууме.

В.ч.-фильтр должен иметь достаточно равномерную амплитудно-частотную характеристику (а.ч.х.) в полосе пропускания  $\Delta f$  и эффективно ослаблять шумы и радиопомехи в зеркальной полосе частот приемного канала. В описываемой микросборке установлен полосковый фильтр на подложке из материала RO3010, состоящий из 7-звенного полосового фильтра на связанных полуволновых резонаторах и 2-звенного режекторного фильтра на низкочастотном краю полосы пропускания. Неравномерность а.ч.х. фильтра меньше 0.3 дБ.

Шумы зеркального канала ослаблены на  $\geq 30$  дБ и практически не влияют на шумовую температуру  $T_{ш}$ . Поскольку фильтр установлен между  $УВЧ_1$  и  $УВЧ_2$ , внеполосные шумы с выхода  $УВЧ_1$  не попадают на  $УВЧ_2$  и далее на смеситель. Внеполосные шумы самого  $УВЧ_2$  при этом попадают на смеситель, но они пренебрежимо малы по сравнению с усиливаемым шумовым сигналом.

При работе приемной аппаратуры в режиме радиометра с “пилот-сигналом” коэффициент усиления приемного канала должен модулироваться с глубиной  $\sim 10$  дБ. Основным требованием к модулятору является стабильность коэффициента модуляции в течение времени между очередными калибровками приемного тракта. Для повышения стабильности своих параметров модулятор собран из двух транзисторных коммутаторов HMC547LP3 и резисторного аттенюатора HMC656 с низким температурным коэффициентом ослабления ( $-0.007$  дБ на  $1^\circ\text{C}$ ).

Нестабильность ослабления сигнала в модуляторе при возможных изменениях окружающей температуры и управляющих напряжений не превышает 0.002%. При радиометрических измерениях шумовой температуры сигнала нестабильность параметров модулятора можно не учитывать. Неравномерность а.ч.х. в рабочей полосе частот модулятора не превышает 0.4 дБ, а время переключения его состояний  $<10$  нс.

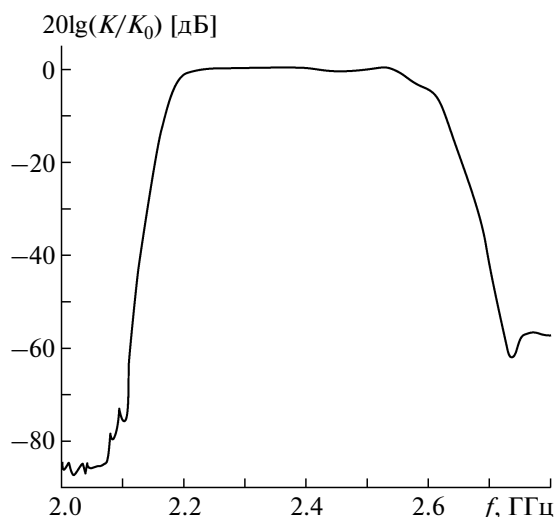


Рис. 3. А.ч.х. микроборки ПК-13.

Усиленный шумовой сигнал поступает на двойной балансный смеситель НМС220MS8, на который подается также гетеродинный сигнал на частоте  $f_{Г1} = 8.08$  ГГц (см. рис. 2). Усилитель гетеродинного сигнала на микросхеме НМС441LP3, установленной в микроборке приемного канала, позволяет снизить мощность гетеродина до 10 мВт и обеспечивает хорошее согласование смесителя с гетеродином. Достоинство смесителя — слабая зависимость его коэффициента передачи от мощности гетеродина в пределах 7–16 мВт. Как показано далее, реальные изменения мощности гетеродина Г-8.08/2.02, установленного в термостатированном блоке, не превышают 2.5% от номинала 10 мВт и практически не влияют на коэффициент передачи приемного канала.

Выходной сигнал промежуточной частоты усиливается микросхемой ERA-3SM. Полоса пропускания 0.1–1 ГГц (в микроборке ПК-3.5) или 0.1–2.1 ГГц (в микроборке ПК-3.5 Ш) формируется LC-фильтром верхних частот пятого порядка и керамическим фильтром нижних частот LFCN-900 (LFCN-1800 для ПК-3.5 Ш). В усилитель промежуточной частоты введена двухконтурная Т-образная цепь коррекции наклона а.ч.х. Крутизна низкочастотного и высокочастотного скатов а.ч.х. — 0.7 и 0.3 дБ/МГц соответственно. Внеполосное ослабление >40 дБ.

Сквозная а.ч.х. микроборки ПК-3.5 имеет неравномерность в полосе пропускания <2 дБ. Коэффициент передачи канала 35 дБ устанавливается с погрешностью 1 дБ. При установке микроборки в термостатированном блоке коэффициент передачи изменяется на  $\leq 0.12$  дБ (0.03%) в течение длительного времени работы. В диапазоне температур 10–30°C (при работе без термостатирования) нестабильность коэффициента передачи может увеличиваться до 1.2 дБ (0.3%), но и это в ряде случа-

ев допустимо, поскольку приемный канал радиотелескопа регулярно калибруется.

Все элементы схемы ПК-3.5, кроме в.ч.-фильтра и ферритовых вентиляей, собраны на подложках из материала RO3003 толщиной 0.254 мм и установлены в корпусе рамочного типа с габаритами 130 × 85 × 24 мм. Конструкция микроборки подобна рассмотренной в [5], но сейчас все микроплаты и ферритовые вентили установлены на общую металлическую пластину, прикрепленную винтами к рамочному корпусу. За счет повышения интеграции микроплат уменьшено их число и число соединительных в.ч.-перемычек. Это позволило повысить качество монтажа и надежность микроборки, улучшить согласование элементов схемы и уменьшить неравномерность а.ч.х.

### Микроборка приемного канала ПК-13

Микроборка приемного канала ПК-13 собрана по той же функциональной схеме, что и микроборка ПК-3.5, но на других элементах. В этой микроборке в УВЧ<sub>1</sub> применены два каскада малошумящих усилителей SPF-5122, которые хорошо согласованы по входу (к.с.в. <1.5) и устойчиво работают без входных ферритовых вентиляей. Эквивалентная шумовая температура канала составляет  $T_{ш} \approx 110$  К. УВЧ<sub>2</sub>, собранный на двух микросхемах ERA-51SM, обеспечивает расширение динамического диапазона канала до 58 дБ.

В диапазоне волн 13 см (2.2–2.55 ГГц) предъявляются более жесткие требования к ослаблению внеполосных помех, так как в этом диапазоне увеличивается число передатчиков систем радиосвязи и других источников радиопомех. Поэтому здесь между каскадами УВЧ<sub>2</sub> установлены два полосно-пропускающих в.ч.-фильтра ВР156 и один фильтр верхних частот HFCN-2100. За счет этого достигнуто ослабление шумов и радиопомех в полосе частот зеркального канала на  $\geq 73$  дБ. При этом коэффициент передачи канала  $K$  в пределах полосы пропускания канала отклоняется от номинала  $K_0$  на  $\leq 1$  дБ (рис. 3).

Модулятор коэффициента усиления в микроборке ПК-13 собран на двух транзисторных коммутаторах НМС347LP3 и резисторном аттенюаторе НМС656LP2. Смеситель и усилитель гетеродинного сигнала выполнены на микросхемах НМС213MS8 и ERA-51SM соответственно, а усилитель промежуточной частоты — на микросхеме ERA-3SM. Выходной фильтр промежуточной частоты с полосой пропускания 0.18–0.53 ГГц ослабляет внеполосные помехи на 40 дБ. Фильтр собран аналогично фильтру промежуточной частоты в микроборке ПК-3.5, но здесь используется фильтр нижних частот LFCN-400, а у фильтра верхних частот частота среза равна 0.18 ГГц.

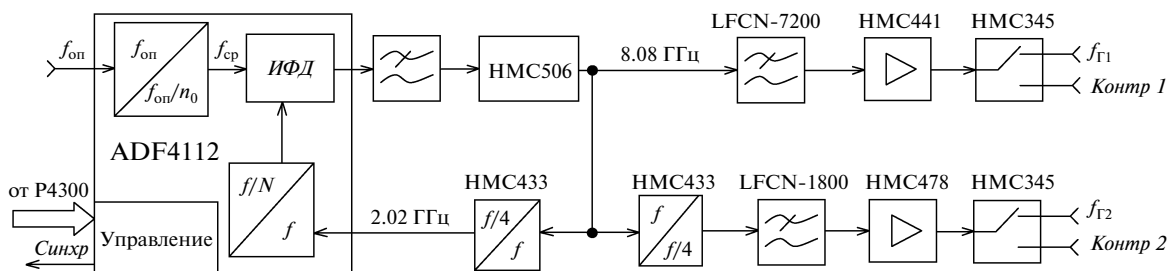


Рис. 4. Функциональная схема двухчастотного гетеродина Г-8.08/2.02. ИФД – импульсно-фазовый детектор.

Коэффициент передачи приемного канала такой же, как в диапазоне волн 3.5 см. Температурный коэффициент усиления (–0.024) дБ/°С. Микросборка ПК-13 имеет габариты 110 × 84 × 16 мм.

*Микросборка приемного канала диапазона волн 6 см*

Микросборка приемного канала диапазона волн 6 см (4.6–5.5 ГГц) построена аналогично рассмотренным выше микросборкам (см. рис. 2).

Здесь УВЧ<sub>1</sub> собран на микросхеме HMC717, хорошо согласованной по входу (к.с.в. <1.5), а УВЧ<sub>2</sub> – на микросхемах ERA-1SM с допустимой выходной мощностью 5 мВт. Динамический диапазон приемного канала – 55 дБ. Полосковый в.ч.-фильтр, выполненный на подложке из материала RO3010 толщиной 0.635 мм, обеспечивает ослабление внеполосных помех >30 дБ. Топология фильтра аналогична используемой в фильтре микросборки ПК-3.5. В микросборке ПК-6 установлен такой же модулятор коэффициента усиления, как в микросборке ПК-13.

Смеситель на микросхеме HMC488MS8G переносит спектр в.ч.-сигнала 4.6–5.5 ГГц в полосу промежуточных частот 0.1–1 ГГц. Выходной усилитель с фильтром промежуточной частоты такой же, как в микросборке ПК-3.5. Коэффициент передачи микросборки – 32 ± 1 дБ. Неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания не превышает 2 дБ. Габариты микросборки ПК-6 – 120 × 99 × 20 мм.

*Микросборка гетеродина Г-8.08/2.02*

Микросборка гетеродина Г-8.08/2.02 выполнена по однокольцевой схеме фазовой автоподстройки частоты, работающей на частоте  $f_{Г1} = 8.08$  ГГц, используемой в смесителе диапазона волн 3.5 см. Кольцо фазовой автоподстройки частоты включает в себя автогенератор HMC506LP4, малошумящий делитель частоты HMC433 и специализированную микросхему ADF4112, которая содержит делитель опорной частоты с коэффициентом деления  $n_0$ , импульсно-фазовый детектор ИФД, делитель генерируемой частоты с коэффициентом деления  $n$  и вспомогательные элементы управле-

ния (рис. 4). Автогенератор HMC506LP4 содержит встроенный буферный усилитель и имеет малые фазовые шумы (–103 дБ/Гц при отстройке 100 кГц).

Для получения гетеродинного сигнала с частотой  $f_{Г2} = 2.02$  ГГц, необходимого для микросборки ПК-13, используется делитель частоты на 4, собранный на микросхеме HMC433. На выходах гетеродинных сигналов с частотами 8.08 ГГц и 2.02 ГГц использованы усилители средней мощности HMC441LP3 и HMC478MP8 с керамическими фильтрами LFCN-7200 и LFCN-1800 соответственно. Фильтры обеспечивают подавление второй и третьей гармоник рабочей частоты 8.08 ГГц на 30 и 63 дБ соответственно. Все гармоники рабочей частоты 2.02 ГГц подавлены на ≥70 дБ. В микросборке гетеродина для сигналов обеих частот предусмотрены контрольные выходы *Контр1* и *Контр2*, которые используются при настройке б.п.ч. и регламентных работах на радиотелескопе.

Гетеродин выполнен в виде герметизированной микросборки в корпусе рамочного типа с габаритами 94 × 68 × 15 мм (рис. 5). Кольцо фазовой автоподстройки частоты выделено стенками рамочного корпуса в отдельный отсек, что исключает влияние других узлов микросборки на управляющие цепи автогенератора и ИФД. Выходные усилители гетеродинных сигналов размещены в отсеках с размерами 10 × 5 мм, благодаря чему в широком диапазоне частот (до 15 ГГц) исключены объемные резонансы конструкции, ухудшающие спектральные характеристики гетеродина.

Гетеродин синхронизируется сигналом опорной частоты  $f_{оп}$ , равной: 100 МГц (при коэффициенте деления  $n_0 = 5$ ), 10 МГц (при  $n_0 = 1$ ) или 5 МГц (при  $n_0 = 1$ ). Фазовые шумы гетеродинного сигнала и, соответственно, фазовые искажения принимаемого сигнала минимальны при  $f_{оп} = 100$  МГц и частоте сравнения ИФД

$$f_{ср} = f_{оп}/n_0 = 20 \text{ МГц.}$$

При этом спектральная плотность мощности фазовых шумов гетеродина на частоте 8.08 ГГц при отстройках от несущей  $\nu = 100$  Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц и 1 МГц составляет соответственно –85, –84, –84, –83 и –118 дБн/Гц, а на частоте 2.02 ГГц –

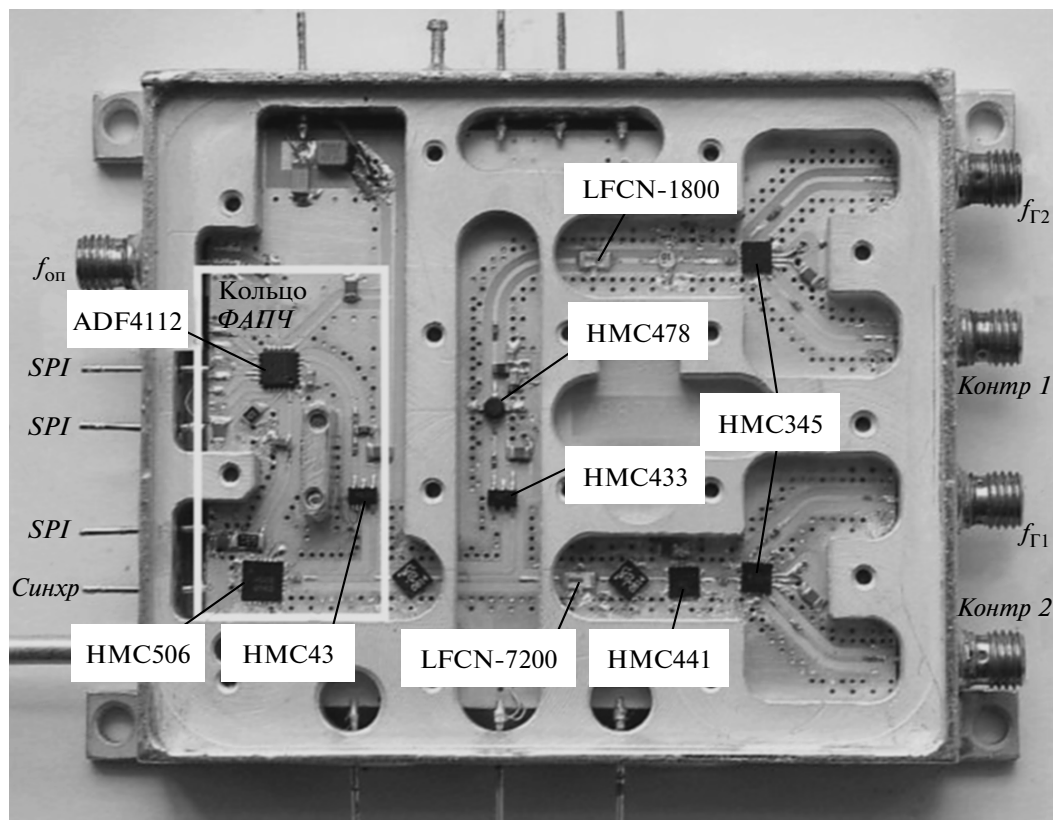


Рис. 5. Микросборка Г-8.08/2.02. ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты.

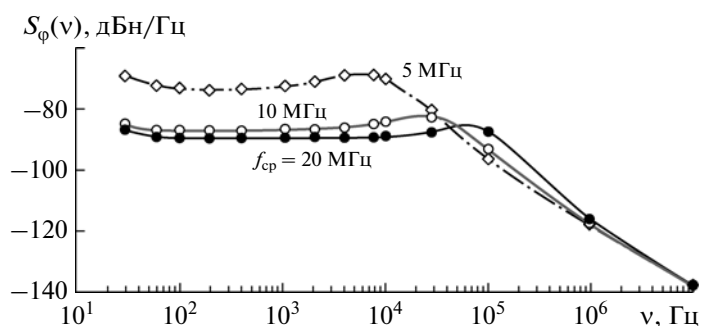


Рис. 6. Спектры мощности фазовых шумов гетеродина  $S_{\varphi}(\nu)$  на частоте 8.08 ГГц при разных опорных частотах  $f_{оп}$ .

–95, –94, –95, –94 и –130 дБн/Гц. Среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) фазовых шумов в полосе частотных отстроек 30 Гц–30 МГц на частоте  $f_{Г1} = 8.08$  ГГц не превышает 1.1 град. Близкие результаты получаются и при  $f_{оп} = f_{сп} = 10$  МГц. При синхронизации сигналом опорной частоты 5 МГц ( $f_{оп} = f_{сп} = 5$  МГц) с.к.о. фазовых шумов увеличивается до 2.9 град, но и в этом случае фазовые шумы на 8–10 дБ меньше, чем гетеродинов, установленных ранее на радиотелескопах. На частоте 2.02 ГГц спектральная плотность фазовых шумов на ~10–12 дБ меньше, чем на частоте 8.08 ГГц (рис. 6).

Частота среза фильтра нижних частот в кольце фазовой автоподстройки частоты выбрана равной 20 кГц, чтобы ослабить на 90 дБ дискретные компоненты спектра при отстройках  $\nu$ , равных частоте сравнения  $f_{сп}$  и ее гармоникам. Дискретные составляющие спектра при отстройках, равных и кратных частоте сети, ослаблены на 70 дБ за счет эффективной фильтрации пульсаций напряжений электропитания цепей управления частотой гетеродина. Фазовые шумы и дискретные компоненты спектра гетеродинного сигнала практически не влияют на качество приема сигналов при р.с.д.б.: снижение пика корреляционного откли-

ка не превышает 0.4% для диапазона волн 3.5 см и 0.14% для диапазона волн 13 см. Температурные коэффициенты мощности сигналов гетеродина на частотах 8.08 и 2.02 ГГц не превышают 0.12 и 0.048 мВт/°С соответственно.

#### *Микросборка гетеродина Г-4.5*

Микросборка гетеродина Г-4.5, используемого в двухканальном БПЧ-6, также построена по однокольцевой схеме фазовой автоподстройки частоты. Микросборка работает на выходной частоте 4.5 ГГц и имеет выходы для подключения к двум приемным каналам. При частоте сравнения в ИФД  $f_{cp} = 25$  МГц с.к.о. фазовых шумов гетеродина на частоте 4.5 ГГц минимально и составляет 0.28 град в полосе частотных отстроек 30 Гц–30 МГц. Частоту сравнения 25 МГц легко получить делением опорной частоты 100 МГц. Когда гетеродин Г-4.5 синхронизируется сигналом опорной частоты  $f_{оп} = 5$  МГц, спектральная плотность мощности фазовых шумов составляет –74, –83 и –111 дБ/Гц при отстройках 100 Гц, 1 кГц и 100 кГц соответственно, а с.к.о. фазовых шумов увеличивается до 0.68 град в той же полосе отстроек. Это также допустимо для радиоинтерферометра, поскольку расчетное снижение корреляционного отклика из-за фазовых шумов гетеродина не превышает 0.13%.

#### *Плата управления Р4300*

Плата управления Р4300, собранная на базе 8-битного микроконтроллера ATtiny2313, предназначена для установки и контроля режима работы микросборки гетеродина. После включения электропитания эта плата формирует и по последовательному интерфейсу SPI передает в микросборку гетеродина управляющий код (три слова по 24 бит), по которому устанавливаются режимы работы микросхемы ADF4112 – коэффициенты деления частот  $n$  и  $n_0$ , крутизна и направление наклона характеристики управления частотой автогенератора, вид (двоичный или аналоговый) выходного сигнала *Синхр* (см. рис. 4) подтверждения синхронизма в кольце фазовой автоподстройки частоты. Плата Р4300 транслирует этот сигнал в управляющий компьютер радиотелескопа, служащий для оперативного контроля работы всей приемно-региструющей аппаратуры.

Кроме того, для повышения помехозащищенности в состав платы Р4300 включены линейный стабилизатор напряжения LT1763CS8-3 и LC-фильтр, которые из исходного напряжения 5 В с пульсациями до 0.3 мВ, поступающего от платы электропитания Р6209-М, формируют высокостабильное напряжение 3 В (0.01%) с пульсациями <0.1 мВ. Это напряжение необходимо для

питания цепей управления частотой автогенератора и для микросхемы ADF4112.

Плата Р4300, собранная на подложке из материала FR4 толщиной 1 мм, имеет компактные размеры (60 × 48 мм), что позволяет крепить ее непосредственно на корпусе микросборки гетеродина.

#### *Плата Р6209-М*

Плата Р6209-М электропитания обеспечивает подключение б.п.ч. к единой системе электропитания приемной аппаратуры радиотелескопа. В блоке БПЧ-3.5/13 плата Р6209-М формирует из входного напряжения электропитания +24 В напряжения +5, –5 и +9 В для электропитания микросборки ПК-3.5, напряжения +5 и +9 В для микросборки ПК-13 и два отдельных номинала +5 В для микросборки Г-8.08/2.02, а также два номинала +5 В для аналоговых и цифровых цепей платы управления Р4300. Для микросборок приемных каналов и двух выходных усилителей гетеродина питающие напряжения формируются отдельно, что обеспечивает возможность независимого отключения приемных каналов и выходов гетеродина. Эта же плата применяется и для электропитания микросборок ПК-6 и Г-4.5 в блоке БПЧ-6.

Входное постоянное напряжение +24 В с пульсациями 10–15 мВ понижается двумя импульсными преобразователями напряжения с гальванической изоляцией AM6TW-2407SZ до напряжения 7.2 В, из которого после фильтрации LC-фильтрами, пятью линейными малощумящими стабилизаторами LT1763CS8-5, формируются все высокостабильные (<0.01%) напряжения +5 В с пульсациями <0.1 мВ для микросборок. Напряжение –5 В формируется отдельным преобразователем AM6TW-2407SZ с выходом, подключенным в обратной полярности, к линейному стабилизатору LT1175IS8-5. Для создания двух напряжений +9 В использован импульсный преобразователь напряжения WP06R24S12 с выходным напряжением 12 В и два регулируемых линейных малощумящих стабилизатора LT1763CS8.

Напряжение +5 В, используемое для электропитания цифровых цепей платы управления Р4300, снимается с LC-фильтров, расположенных на выходе импульсного преобразователя напряжения WP06R24S05NC.

Применение импульсных преобразователей напряжения позволило повысить коэффициент полезного действия платы Р6209-М до 50%, улучшить тепловой режим и повысить надежность б.п.ч.

Отдельные части б.п.ч. отключаются дистанционно по командам управляющего компьютера радиотелескопа. Для этого на управляющие входы линейных стабилизаторов подаются напряжения от системы управления приемной аппарату-

Характеристики	Блоки усиления и преобразования частот	
	БПЧ-3.5/13	БПЧ-6
Диапазоны волн, см	3.5/13	6
Диапазоны частот входных сигналов, ГГц	8.18–9.08(или 8.18–10.18)/2.2–2.55	4.6–5.5
Выходные частоты, ГГц	(0.1–1)(0.1–2.1)/0.18–0.53	0.1–1
Полосы пропускания, МГц	900(или 2 ГГц)/350	900
Шумовая температура, К	380/110	250
Коэффициент передачи, дБ	(35±1)/(35±1)	(32±1)
Неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания, дБ	2/1.5	2
Ослабление помех зеркального канала, дБ	30/72	30
Температурный коэффициент усиления, дБ/°С	–0.06/–0.024	–0.04
Фазовый шум гетеродина, не более дБн/Гц		
при отстройке 100 Гц	–85/–95	–84
при отстройке 100 кГц	–83/–94	–111
Ослабление дискретных компонентов спектра гетеродинного сигнала, не менее дБ	92/92	81
Ослабление сетевых компонентов спектра, не менее дБ	70/80	70
С.к.о. флюктуаций фазы сигнала в полосе частотных отстроек 30 Гц–30 МГц, менее град	1.1/0.3	0.28
Частоты сигналов гетеродинов, ГГц	8.08/2.02	4.5

ры радиотелескопа через микросхемы четырехканальной оптической развязки HCPL6400.

Все элементы схемы платы Р6209-М размещены на подложке 200 × 80 мм из материала FR4 толщиной 2 мм. Для снижения уровня электромагнитного поля, создаваемого импульсными преобразователями напряжения, последние на плате закрыты металлическим экраном.

#### *Характеристики б.п.ч.*

Характеристики разработанных БПЧ-3.5/13 и БПЧ-6 приведены в таблице.

Динамический диапазон приемного канала во всех диапазонах волн  $\geq 58$  дБ, а при полосе частот 2 ГГц (ПК-3.5Ш) – 54.5 дБ. Динамический диапазон входных сигналов –  $\geq 33$  дБ. Частоты опорных сигналов синхронизации гетеродинов: 100 МГц (рекомендуемая частота), или 10 МГц, или 5 МГц. Суммарное энергопотребление микросборки приемных каналов и гетеродина и плат питания управления не превышает 8.5 Вт, а полное энергопотребление термостатируемого б.п.ч. – 58 Вт. Габариты б.п.ч. 250 × 255 × 120 мм, масса б.п.ч. не превышает 5.4 кг.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ Б.П.Ч.

Разработанные двухдиапазонные БПЧ-3.5/13 и двухканальные БПЧ-6 введены в состав двухканальных приемников радиотелескопов комплексов “Квазар-КВО”.

С использованием БПЧ-3.5/13 регулярно проводятся р.с.д.б.-наблюдения по международным и национальным программам (например, IVS-R4, IVS-R1, Ru-UT, Ru-EOP) и радиометрические наблюдения по программам Ru-Flicker, Ru-GRB, Ru-Integral. Эффективность применения разработанного б.п.ч. можно оценить по параметру SEFD (System Equivalent Flux Density), который определяется международным р.с.д.б.-центром IVS (International VLBI Service) для каждого радиотелескопа по результатам р.с.д.б.-наблюдений (см. официальный сайт IVS: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>). Этот параметр наиболее полно характеризует реальную чувствительность радиотелескопа в режиме р.с.д.б., так как учитывает не только температуру шумов радиотелескопа, но и потери, связанные с несовершенством аппаратуры и искажениями принимаемого сигнала, а также с воздействием радиопомех.



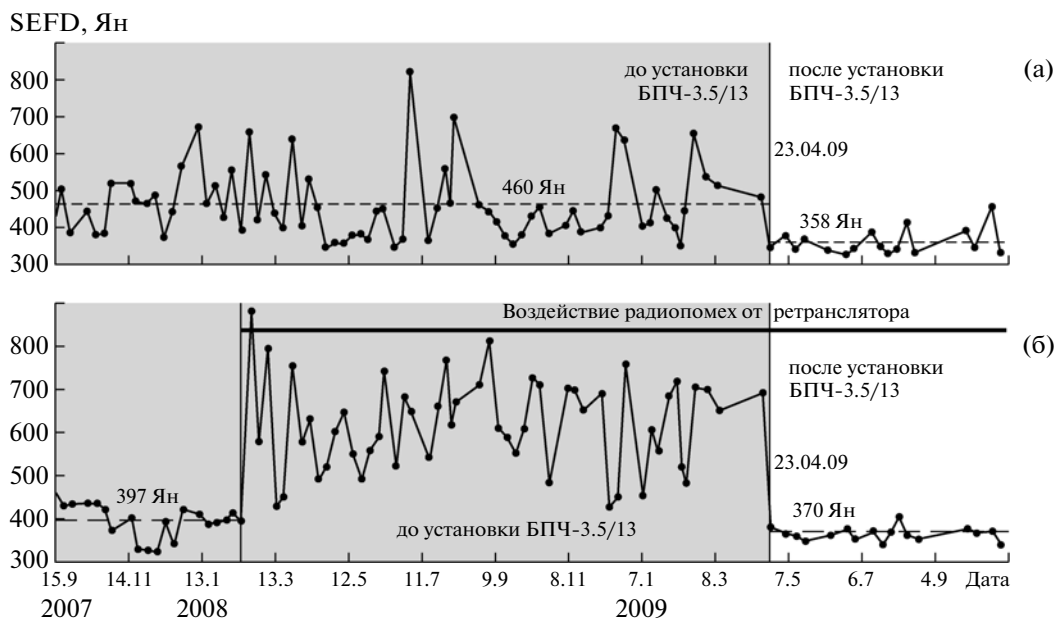


Рис. 7. Значения определенного по результатам р.с.д.б.-наблюдений параметра SEFD ( $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{Гц} \cdot \text{м}^2)$ ) для диапазонов волн 3.5 см (а) и 13 см (б).

Значения SEFD, полученные для обсерватории “Светлое” в результате р.с.д.б.-наблюдений по программам серий IVS-R1 и IVS-R4, показывают снижение среднего значения и разброса параметра SEFD после установки блоков БПЧ-3.5/13 (апрель 2009 г.). В диапазоне волн 3.5 см среднее по ансамблю наблюдений значение SEFD снизилось с 460 до 358 Ян ( $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/\text{Гц} \cdot \text{м}^2$ ), а разброс параметра SEFD уменьшился в  $\sim 3$  раза (рис. 7а). Это свидетельствует об улучшении реальной чувствительности радиотелескопа в режиме р.с.д.б. и повышении точности регистрируемых данных за счет улучшения параметров приемных каналов и гетеродинов. Остаточный разброс параметра SEFD связан с изменениями условий р.с.д.б.-наблюдений – влиянием облаков и изменениями уровня шумов антенны при различных положениях антенны радиотелескопа относительно поверхности Земли.

Аналогичный эффект получен и в диапазоне волн 13 см, где первоначально (до февраля 2008 г.) значения SEFD были в пределах 330–480 Ян, а после февраля 2008 г., когда недалеко от обсерватории начал действовать ретранслятор сотовой системы связи стандарта IMT-2000/UMTS, значения SEFD увеличились до неприемлемого уровня (600–900 Ян). После установки блоков БПЧ-3.5/13 влияние внеполосных помех от ретранслятора было исключено, а значения SEFD уменьшились и стали достаточно стабильными – 320–410 Ян. Среднее по ансамблю наблюдений SEFD равно 370 Ян, а среднеквадратический разброс SEFD не превышает 18 Ян.

Установка БПЧ-6 на радиотелескопах комплекса “Квазар-КВО” позволила расширить частотную полосу приема в диапазоне волн 6 см с 500 до 900 МГц и проводить радиометрические и р.с.д.б.-наблюдения по сигналам двух поляризаций волн одновременно. Это расширило возможности астрофизических исследований, проводимых методами р.с.д.б. и радиометрии. С использованием этих блоков в 2009 г. успешно проведены первые наблюдения совместно с Европейской р.с.д.б.-сетью EVN (сеансы N10C1 и N10C2), а с ноября 2009 г. ведутся регулярные р.с.д.б.-наблюдения по программам EVN.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатация разработанных БПЧ-3.5/13 и БПЧ-6 на радиотелескопах комплекса “Квазар-КВО” подтвердила их эффективность и стабильность параметров. Использование этих блоков позволило сократить состав приемной аппаратуры радиотелескопов: число термостатированных блоков в диапазонах волн 3.5 и 13 см уменьшено с 5 до 2, а в диапазоне 6 см – с 3 до 1. Значительно повышена надежность приемных устройств: за время эксплуатации блоков (около двух лет) не было ни одного отказа. С применением новых блоков повысилась точность данных, получаемых при р.с.д.б. и радиометрических наблюдениях.

Конструкция блоков позволяет использовать их на разных радиотелескопах. Планируется, например, оснащение блоками БПЧ-3.5/13 70-метрового радиотелескопа в Уссурийске.

Авторы благодарят А.М. Финкельштейна, А.В. Ипатова и И.А. Рахимова за внимание и поддержку работ по созданию б.п.ч. и введению их в эксплуатацию на радиотелескопах комплекса “Квазар-КВО”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Ипатова И.А. и др.* // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С. 242.
2. *Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Федотов Л.В.* // ПТЭ. 2009. № 1. С. 52.
3. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е., Носов Е.В. и др.* // ПТЭ. 2010. № 5. С. 60.
4. *Финкельштейн А.М.* // Вестник РАН. 2007. Т. 77. № 7. С. 608.
5. *Маршалов Д.А., Кольцов Н.Е.* // ПТЭ. 2007. № 6. С. 132.
6. *Томпсон А.Р., Моран Д.М., Свенсон Д.У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Под. ред. Л.И. Матвеевко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 2-е изд.