

СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ РАДИОМЕТРЫ
С ПОЛОСАМИ ПРОПУСКАНИЯ ДО 1 ГГц

© 2013 г. Н. Е. Кольцов, С. А. Гренков, Л. В. Федотов

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

Поступила в редакцию 02.08.2012 г.

Даны описания спектрально-селективных радиометров, обеспечивающих высокоточные измерения в континууме в условиях воздействия узкополосных радиопомех, а также регистрацию радиоизлучений в спектральных линиях. Два параллельных канала радиометра обеспечивают одновременный прием сигналов двух поляризаций или сигналов двух диапазонов волн. Каналы радиометра, установленного в обсерватории “Бадары”, работают в полосах частот до 32 МГц и имеют разрешающую способность 62.5 кГц при максимальной полосе приема. Каналы радиометра в обсерватории “Светлое” имеют полосы приема 1024 МГц или 512 МГц и разрешающую способность 1 МГц или 0.5 МГц соответственно.

DOI: 10.7868/S0032816213040253

ВВЕДЕНИЕ

Для радиометрических измерений в континууме в настоящее время применяют радиометры, которые основаны на квадратичном детектировании шумовых сигналов в полосе пропускания Δf приемного канала и определении разности напряжений продетектированных сигналов, полученных при приеме исследуемого сигнала и при его отсутствии [1].

Чтобы повысить чувствительность радиотелескопа и точность радиометрических измерений, расширяют полосу пропускания Δf приемного канала до детектора. На радиотелескопах комплекса “Квazar-КВО”, например, при $\Delta f = 900$ МГц обеспечивается регистрация принимаемых сигналов с шумовой температурой $T_s \approx 10^{-4} T_{ш}$, где $T_{ш}$ — температура собственных шумов радиотелескопа [2, 3]. Но возможности использования высокочувствительных широкополосных радиометров в последние годы сужаются в связи с постоянным увеличением числа радиопомех, создаваемых, в основном, системами радиосвязи [4]. Радиопомехи, попадающие в полосу пропускания Δf приемного канала, детектируются вместе с собственными шумами радиотелескопа и принимаемым сигналом, после чего их уже невозможно отделить от измеряемого сигнала. Даже помехи небольшой мощности (на 3–4 порядка меньше мощности собственных шумов радиотелескопа) вносят ошибку, соизмеримую и даже превышающую значение шумовой температуры T_s исследуемого сигнала. Результаты измерений энергетических параметров космического излучения при воздействии радиопомех становятся недостоверными, а исследова-

ния малых нестационарностей излучения практически невозможными.

В [5] был предложен и теоретически обоснован способ радиометрических измерений в континууме без амплитудного квадратичного детектирования сигналов, который основан на аналого-цифровом преобразовании шумового сигнала в приемном канале в цифровую последовательность, вычислении энергетического спектра методом быстрого преобразования Фурье (б.п.Ф.) и исключении спектральных компонентов на частотах радиопомех. В данной статье представлены результаты разработки и экспериментального исследования таких радиометров, работающих в полосах частот до 1 ГГц.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНОГО РАДИОМЕТРА

Чтобы создать широкополосный радиометр спектрально-селективного типа, был разработан модуль вычисления спектров сигналов, работающий со штатным оборудованием радиотелескопа комплекса “Квazar-КВО” — радиоастрономическим приемным устройством (р.п.у.) с модуляцией коэффициента усиления в $M = 10$ раз, основным генератором шума ($ГШ_1$), имитирующим шумы антенны, дополнительным генератором шума ($ГШ_2$), используемым при амплитудной калибровке приемного тракта, и управляющим компьютером радиотелескопа (рис. 1). Модуль вычисления спектра подключается непосредственно к выходу сигнала промежуточных частот приемного устройства.

С выхода приемно-усилительного канала с полосой пропускания Δf шумовой сигнал, содержа-

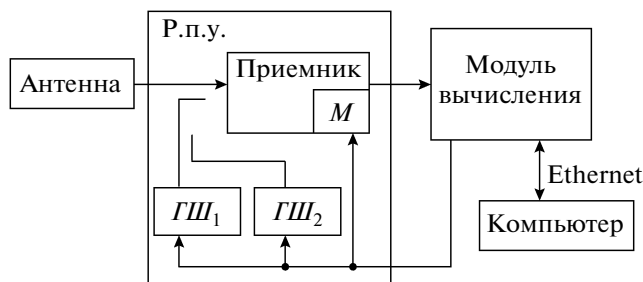


Рис. 1. Блок-схема спектрально-селективного радиометра.

ший собственные шумы радиотелескопа, широкополосный сигнал от исследуемого космического источника и принятые антенной помехи, поступает в модуль вычисления спектра. Аналого-цифровой преобразователь (а.ц.п.) на входе этого модуля непрерывно считывает выборки шумового сигнала с частотой $F_{сч} \geq 2\Delta f$.

Частота $F_{сч}$ считывания выборок сигнала выбирается с учетом требуемой полосы приема Δf и технических параметров а.ц.п. Обычно $F_{сч}$ выбирается равной степени 2 (в данном случае $F_{сч} = 1024$ МГц или 2048 МГц), а полоса частот шумового сигнала на входе а.ц.п. устанавливается в пределах одной из зон Найквиста, ограниченных частотами $(i-1)\Delta f$ и $i\Delta f$, где i – порядковый номер зоны. Приемные каналы комплекса “Квазар-КВО” в диапазонах волн 6, 3.5 и 1.35 см имеют полосу пропускания 100–1000 МГц, которая попадает в первую зону Найквиста при $F_{сч} = 2048$ МГц.

Разработанный модуль вычисления спектра можно использовать и с другими полосами промежуточных частот, например с полосой 1024–2048 или 1024–1536 МГц, которые применяются в разрабатываемых приемных каналах радиоинтерферометра на небольших антеннах [6]. Поскольку быстродействие современных а.ц.п. выше, чем у программируемых логических интегральных схем (п.л.и.с.), выполняющих б.п.Ф., применяется n -канальное демультимплексирование потока выборок сигнала, в результате чего этот поток распределяется в п.л.и.с. по n -каналам б.п.Ф., работающим параллельно с тактовой частотой $F_T = F_{сч}/n$. Последовательности выборок в каналах сдвинуты одна относительно другой на период считывания $1/F_{сч}$. При заданном числе N дискретных частот в искомом спектре сигнала для вычисления спектра в одном канале должен быть набран пакет выборок объемом $2N/n$. В каждом канале б.п.Ф. спектры вычисляются циклически с периодом $t_{ц} = 2N/nF_T$. За время $t_{ц}$ канал б.п.Ф. успевает вычислить спектр по предыдущему пакету выборок. Поэтому исключаются перерывы при считывании выборок сигнала и потери времени наблюдения источника излучения. Вычисленные спектры

накапливаются и суммируются на интервале $t_{нак}$. С каждого канала б.п.Ф. снимаются спектры прореженных в n раз выборок шумового сигнала, которые объединяются в устройстве накопления и усредняются на интервале $t_{нак}$.

Рассматриваемый спектрально-селективный радиометр может работать как в режиме с модуляцией р.п.у., так и без модуляции. При работе в режиме без модуляции после суммирования и усреднения спектров среднееквадратическое отклонение (с.к.о.) амплитуд спектральных компонентов уменьшается в $\sqrt{t_{нак}F_{сч}/2}$ раз. При этом принятые узкополосные помехи четко выделяются в виде выбросов на фоне гладкого спектра широкополосного шума. Усредненный спектр передается в компьютер, где после исключения спектральных компонентов на частотах радиопомех остается гладкий спектр смеси исследуемого сигнала и собственных шумов радиотелескопа. Чтобы определить шумовую температуру T_s сигнала, необходимо измерить шумовую температуру $T_{ш}$ радиотелескопа, отводя, например, антенну радиотелескопа от источника излучения в “чистое небо”.

При работе в модуляционном режиме отдельно вычисляются и усредняются спектры, полученные по выборкам сигнала, считанным в разные полупериоды модуляции р.п.у. В результате сравнения (взаимного вычитания) усредненных спектров формируется спектр, включающий в себя гладкий спектр исследуемого сигнала и узкополосные спектры воздействующих радиопомех. После исключения спектральных компонентов на частотах радиопомех остается спектр сигнала, по которому вычисляются искомая шумовая температура T_s и спектральная плотность потока мощности S принимаемого радиосигнала. В рассматриваемом режиме работы радиометра п.л.и.с. формирует меандр для модуляции ГШ₁ и управления модулятором приемно-усилительного канала, что гарантирует синхронную работу этих устройств и модуля вычисления спектров.

С.к.о. флуктуаций усредненных спектральных компонентов собственных шумов радиотелескопа определяет среднееквадратическую погрешность измерения энергетических параметров сигнала и минимальную шумовую температуру сигнала $T_{s\min}$, характеризующую чувствительность радиотелескопа. Чувствительность радиотелескопа и точность измерений энергетических параметров сигнала повышаются при увеличении времени накопления $t_{нак}$, пока оно не достигнет значения, при котором с.к.о. усредненных спектральных компонентов становится равным среднееквадратической погрешности вычислений. Дальнейшее увеличение времени $t_{нак}$ эффекта не дает, но точность измерений можно повысить, проведя несколько сеансов наблюдений и усредняя результаты по ансамблю наблюдений.

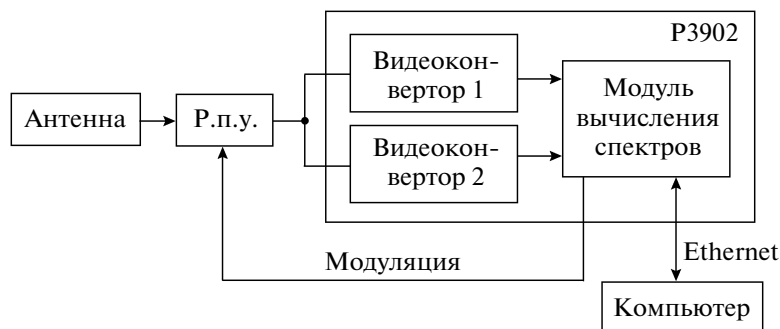


Рис. 2. Радиометр на базе спектрометра P3902.

Как показано в [7],

$$T_{s \min} = b T_{\text{ш}} \sqrt{\frac{2}{\Delta f (1 - \Delta f_{\text{пом}} / \Delta f) \eta_{\text{нак}}}},$$

где b – коэффициент, определяемый режимом работы р.п.у. (для модуляционных р.п.у. комплекса “Квазар-КВО” $b \approx 2.22$, для режима работы без модуляции $b = 1$); $\Delta f_{\text{пом}}$ – суммарная полоса частот, занятая радиопомехами. При отсутствии радиопомех эта формула совпадает с известной формулой для радиометров с квадратичными детекторами [1]. При наличии радиопомех $T_{s \min}$ увеличивается, но немного, так как обычно $\Delta f_{\text{пом}} \ll \Delta f$. Результаты измерений не зависят от мощностей воздействующих радиопомех, что отличает рассматриваемый радиометр от традиционных радиометров с амплитудными детекторами.

СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЙ РАДИОМЕТР С ПОЛОСОЙ ДО 64 МГц

Для радиометрических наблюдений в диапазоне волн 18–21 и 13 см, где из-за воздействия ра-

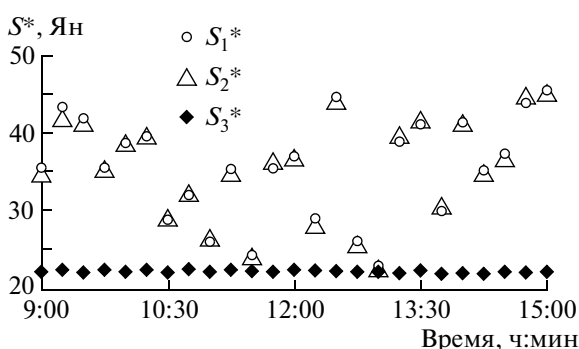


Рис. 3. Результаты наблюдений источника 3C295 при воздействии радиопомех. S_1^* – радиометр с квадратичным детектором; S_2^* – спектрально-селективный радиометр в режиме без исключения радиопомехи, S_3^* – в режиме с ее исключением.

диопомех проводить радиометрические измерения в континууме с помощью радиометров с амплитудными квадратичными детекторами крайне затруднительно, был собран спектрально-селективный радиометр с использованием цифрового двухканального спектрометра P3902 (рис. 2), созданного изначально для регистрации радиоизлучений в спектральных линиях [8]. Двухканальный модуль вычисления спектров подключается к выходу промежуточной частоты р.п.у. с помощью пары перестраиваемых видеоконверторов с полосами пропускания Δf .

С целью обеспечения радиометрических наблюдений в континууме с исключением узкополосных радиопомех программное обеспечение спектрометра P3902 было дополнено, а также соответствующим образом был изменен алгоритм управления генераторами шумов и модулятором в приемном канале. Радиометр способен проводить радиометрические измерения в континууме в полосах до 64 МГц (до 32 МГц на канал) при частотном разрешении $\nu = \Delta f / N$. В рассматриваемом радиометре $N = 1024$ для каждого канала, при $\Delta f = 32$ МГц частотное разрешение составляет 62.5 кГц.

Радиометрические наблюдения проводились в обсерватории “Бадары”. На рис. 3 приведены результаты наблюдений источника 3C295, сигнал которого на частоте 1.4 ГГц имеет спектральную плотность потока мощности $S = 22.5 \pm 0.3$ Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$).

В частотной полосе регистрации сигнала была радиопомеха, средняя мощность $P_{\text{пом}}$ которой составляла 8% от мощности $P_{\text{ш}}$ собственного шума радиотелескопа в полосе Δf , а ширина спектра помехи – 2.43 МГц ($\Delta f_{\text{пом}} = 0.076 \Delta f$). Для сравнения представлены результаты измерений спектральной плотности потока мощности в полосе $\Delta f = 32$ МГц радиометром с квадратичным детектором (S_1^*) и рассматриваемым спектрально-селективным радиометром в режимах без исключения радиопомехи (S_2^*) и с исключением помехи (S_3^*).

Результаты радиометрических измерений в континууме с помощью традиционного радиометра с амплитудным детектором при воздействии радиопомехи становились недостоверными. При многократно проведенных измерениях значения S_1^* имели большой разброс и отличались от истинного значения $S = 22.5$ Ян до 2.5 раз.

Практически такой же результат дает спектрально-селективный радиометр в режиме без исключения радиопомех: значения S_2^* и S_1^* расходятся не более чем на 1.5%. Результаты измерений спектрально-селективным радиометром в режиме с исключением помех отличаются высокой стабильностью и точностью: измеренные значения S_3^* отклоняются от истинного значения $S = 22.5$ Ян не более чем на 1.3%. При работе в полосах частот, где нет радиопомех, результаты измерений традиционным и рассматриваемым радиометром совпадают с точностью 1.5%.

При наблюдении источника 3C123 ($S = 48.6 \pm 0.2$ Ян на частоте 1.4 ГГц) воздействие радиопомехи даже сравнительно небольшой мощности ($P_{\text{пом}}/P_{\text{ш}} = 0.01$) на радиометр с квадратичным детектором приводило к ошибкам до 25%, а погрешность измерений радиометром с селекцией помех была не более 0.6%. В полосе частот, где не было помех, оценки S_1^* и S_3^* различались не более чем на 0.4%.

Результаты наблюдений подтвердили эффективность спектрально-селективного радиометра при радиометрических измерениях в континууме при воздействии узкополосных радиопомех. Эксперименты подтвердили возможность использования одного и того же прибора как для радиометрических измерений в континууме, так и для регистрации радиоизлучений в спектральных линиях, а также для исследования радиопомех.

Полученный опыт был использован при разработке спектрально-селективного радиометра с полосой до 1 ГГц.

РАДИОМЕТРЫ С ПОЛОСОЙ ДО 1024 МГц

Для высокоточных радиометрических измерений в континууме в диапазоне сантиметровых волн, где необходимы полосы до 1 ГГц, был разработан двухканальный модуль вычисления спектра на базе платы Neptune V5 VSX, на которой установлены два а.ц.п. AT84AS008, работающих на частотах до 2.2 ГГц, два 4-канальных демультимплексора AT84CS001 и две п.л.и.с. XC5VSX95T с достаточно высокой логической емкостью и предельными тактовыми частотами работы до 550 МГц (рис. 4).

А.ц.п. AT84AS008 на управляющем входе имеет встроенный высокостабильный компаратор напряжения, обеспечивающий стабильное считыва-

ние выборок при гармоническом управляющем сигнале с частотой $F_{\text{сч}}$. Этот сигнал вырабатывается генератором, синхронизированным сигналом опорной частоты 5 МГц, поступающим от водородного стандарта частоты, установленного на радиотелескопе. При приеме сигналов в полосе 1024 МГц устанавливается частота $F_{\text{сч}} = 2048$ МГц, а при полосе 512 МГц — $F_{\text{сч}} = 1024$ МГц.

А.ц.п. считывает 10-разрядные выборки шумового сигнала с частотой $F_{\text{сч}}$ и передает их в демультимплексор AT84CS001, где они распределяются по четырем последовательностям с частотой следования $F_{\text{сч}}/4$. Синхронно с этим демультимплексор вырабатывает меандр частоты $F_T = F_{\text{сч}}/8$, по фронту и спаду импульсов которого последовательности выборок переписываются в п.л.и.с. Каждая из последовательностей выборок, в свою очередь, распределяется по двум каналам б.п.Ф (в один из которых попадают выборки, записанные по фронтам импульсов меандра, а в другой канал — выборки, записанные по спадам импульсов).

В результате исходный поток выборок сигнала, считанных а.ц.п., оказывается распределенным по восьми каналам б.п.Ф., параллельно работающим с тактовой частотой $F_T = F_{\text{сч}}/8$.

Данные по полученным в результате суммирования и усреднения спектрам передаются через формирователь интерфейса Marvell Alaska PHY в компьютер радиотелескопа по каналу Ethernet.

Наличие на плате Neptune V5 VSX двух комплектов а.ц.п., демультимплексоров и п.л.и.с. позволяет одновременно вести радиометрические измерения радиосигналов двух поляризации или сигналов в двух диапазонах волн. Суммарная полоса частот регистрируемых сигналов в этом случае удваивается и может достигать 2048 МГц.

Ресурсы п.л.и.с. XC5VSX95T с логической емкостью 94308 (число логических вентилях) при $F_{\text{сч}} = 2048$ МГц позволили создать для нее конфигурацию, обеспечивающую получение $N = 1024$ спектральных компонентов в полосе приема и разрешающую способность по частоте $\nu = \Delta f/1024$. Для радиометрических измерений в континууме этого вполне достаточно как при отсутствии, так и при наличии узкополосных радиопомех.

При $\Delta f = 1024$ МГц, например, интервал частотного разрешения $\nu = 1$ МГц в большинстве случаев шире спектра узкополосной радиопомехи, и при определении шумовой температуры сигнала достаточно исключить полосу $\Delta f_{\text{пом}}$, равную ν или 2ν , т.е. сузить полосу анализа на 0.8% или на 1.6%. Такое сужение полосы приема соответствует снижению чувствительности радиометра на 0.4% или 0.8%, что практически не влияет на качество проводимых наблюдений.

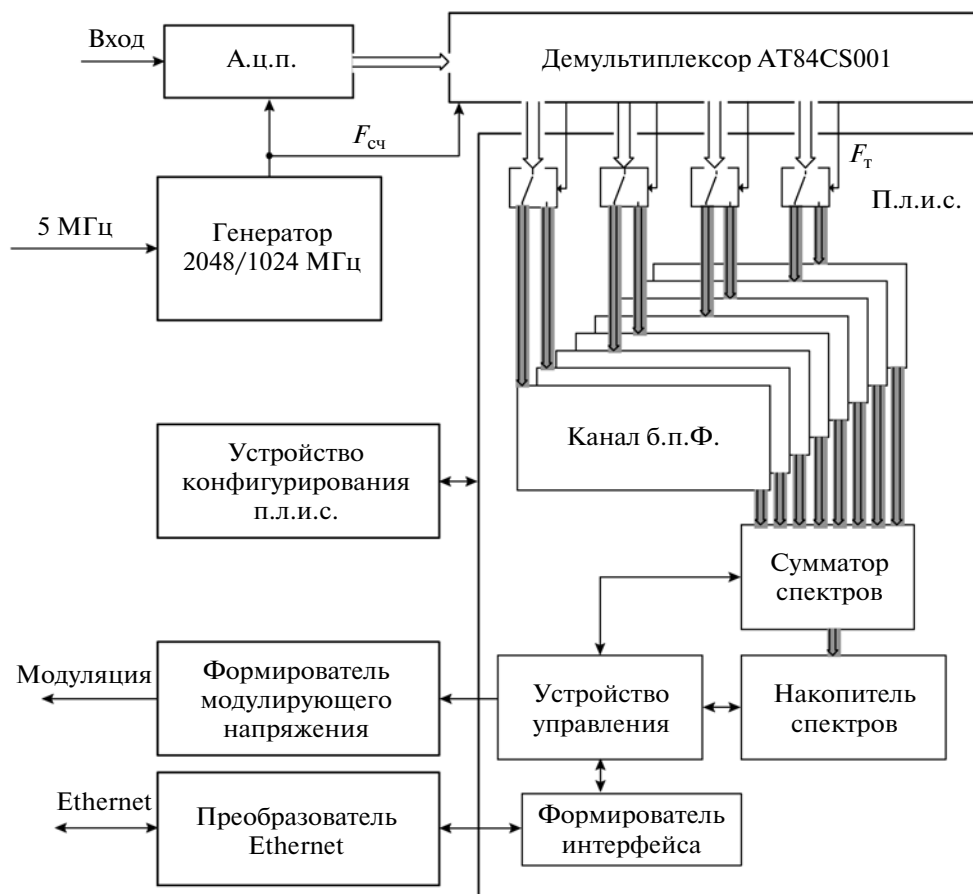


Рис. 4. Структурная схема одного канала модуля вычисления спектров в полосе до 1024 МГц.

Экспериментальные исследования радиометра на базе Neptune V5 VSX показали, что он является эффективным средством для высокоточных радиометрических измерений в континууме при воздействии узкополосных радиопомех.

Вместе с тем, радиометр на базе платы Neptune V5 VSX не следует рассматривать как универсальную систему, которая наряду с радиометрией обеспечивает еще и эффективный анализ космических радиоизлучений в спектральных линиях, поскольку разрешающая способность по частоте ограничена. Возможности повышения частотной разрешающей способности и увеличения числа спектральных компонентов $N = \Delta f / \nu$ в полосе приема Δf определяются параметрами п.л.и.с. — логической емкостью, наличием встроенных аппаратных модулей памяти, умножителей и других элементов, необходимых для вычисления б.п.Ф.

С использованием пакета программ ISE Design Suite 12 WebPack и разработанных для б.п.Ф.-вычислителя логических ядер и компонентов структуры, были определены зависимости необходимых ресурсов п.л.и.с. семейства Virtex-5 и Virtex-6 от числа спектральных компонентов N . Расчеты

показали, что применение п.л.и.с. XC6VSX315T с логической емкостью 314880 обеспечивает при $\Delta f = 1024$ МГц получение 32768 спектральных компонентов и разрешающую способность по частоте $\nu = 31.25$ кГц. При этом можно проводить не только радиометрические измерения в континууме, но и анализ радиоизлучений в спектральных линиях в сантиметровом диапазоне волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектрально-селективные системы обеспечивают высокоточные радиометрические измерения в континууме при воздействии узкополосных радиопомех, чем качественно отличаются от традиционных радиометров с квадратичным детектором. Эти системы надежны и удобны в эксплуатации.

При соответствующем выборе элементной базы, в частности п.л.и.с., спектрально-селективные системы способны совмещать функции радиометрии и радиоастрономической спектрометрии, которые в настоящее время выполняются разными техническими средствами.

Первая универсальная спектрально-селективная система, работающая в полосах частот до 64 МГц, введена в эксплуатацию в обсерватории “Бадары”. Двухканальный спектрально-селективный радиометр с полосами до 1024 МГц, изготовленный с использованием платы Neptune V5 VSX, испытан в лаборатории и установлен в обсерватории “Светлое”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973.
2. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Смоленцев С.Г.* // Земля и Вселенная. 2004. № 4. С. 12.
3. *Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Крохалев А.В.* // ПТЭ. 2005. № 4. С. 66.
4. *Pin G.* // Proceedings of 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. Bonn, 2011. P. 105.
5. *Кольцов Н.Е.* // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 2. С. 59.
6. *Гренков С.А., Ипатов А.В., Кольцов Н.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 9. С. 777.
7. *Кольцов Н.Е.* // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 15. С. 98.
8. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е.* // ПТЭ. 2009. № 3. С. 160.