

Оценка точности спектрально-селективного радиометра

© А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов, Т. С. Андреева

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

На радиотелескопах РТ-32 обсерватории «Светлое» проводятся регулярные измерения значений плотности потока радиоизлучения (ППР) космических источников с целью исследования переменностей их радиоизлучения и уточнения шкалы потоков, формируемой по методу «искусственная Луна». Длительное время исследования ППР проводились в четырёх диапазонах частот (L, S, C и X), но с 2009 г. в диапазонах L и S они были приостановлены из-за значительного увеличения радиопомех, создаваемых системами мобильной связи, вплоть до 2013 г., когда был создан цифровой широкополосный спектрально-селективный радиометр с защитой от радиопомех, который заменил традиционный радиометр с амплитудным квадратичным детектором широкополосных шумовых сигналов.

Исследования переменности излучения и мониторинг шкалы потоков требуют измерений ППР с точностью не хуже 2–3 %. Достижение такой точности — достаточно сложная задача, которую можно решить только с помощью радиометрической аппаратуры, измеряющей мощность и шумовую температуру принимаемого широкополосного сигнала с предельно высокой точностью. От точности радиометрической системы зависит разброс результатов измерений ППР и, соответственно, необходимый объём повторных измерений. Это имеет первостепенное значение для радиометрических исследований, выполняемых в условиях воздействия радиопомех. Наряду со случайными ошибками измерений ППР, зависящих от точности радиометра, могут быть систематические ошибки, которые зависят от точности определения эффективной площади антенны, а также от точности определения ППР используемого опорного источника (стандарта шкалы потоков).

Цель работы — анализ точности измерения значений шумовой температуры и мощности принимаемых помехозащищённым спектрально-селективным радиометром сигналов и определение объёма наблюдений, необходимого для получения заданной точности радиометрических измерений. Это позволит оптимизировать программы радиометрических наблюдений, выполняемых на радиотелескопе РТ-32 с целью исследования переменностей радиоизлучения источников.

При оценках случайной ошибки измерения шумовой температуры, точности широкополосного сигнала и ППР принимаемого радиоизлучения в условиях воздействия радиопомех используются обычные для радиометрии и измерительной техники методы. Данные по систематическим ошибкам измерений ППР определены на основе опубликованных материалов о параметрах РТ-32 и о точностях шкал потоков. Случайная ошибка одиночного измерения ППР, при времени накопления 1 с, составляет (4–15) % в зависимости от диапазона частот и уровня сигнала, но она уменьшается в серии повторных измерений. Для радиотелескопа РТ-32 с помехозащищённым спектрально-селективным радиометром определены объёмы измерений (время накопления — τ и число повторных измерений — M). В диапазонах частот C и X для получения среднеквадратической погрешности около 1 % нужно накапливать сигнал с ППР 5 Ян в течение $\tau M \geq 4\text{--}5$ с, а сигнал с ППР 1 Ян — 36 с. В диапазонах частот L и S для сигнала с уровнем 5 Ян нужно $\tau M \geq 22$ с, а для сигнала на уровне 2 Ян — не менее 144 с.

В спектрально-селективном радиометре с модуляцией приёмного устройства меандром спектры сигнала и шумов накапливаются раздельно, что позволяет реализовать режим с накоплением сигнала и шумов на разных временных интервалах (режим несимметричного накопления), благодаря чему можно повысить точность радиометра на 29 %. При мониторинге шкалы потоков «искусственная Луна» и при исследованиях небольших переменностей широкополосного радиоизлучения космических источников используется РТ-32 с помехозащищённым спектрально-селективным радиометром.

Ключевые слова: спектры широкополосного радиоизлучения, помехозащищённый спектрально-селективный радиометр, точность радиометрических измерений, спектральная плотность потока излучения.

Контакты для связи: Гренков Сергей Александрович (grenkov@iaaras.ru).

Для цитирования: Ипатов А. В., Рахимов И. А., Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Андреева Т. С. Оценка точности спектрально-селективного радиометра // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 44–52.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.61.44-52>

Estimated Accuracy of Spectral-Selective Radiometer

A. V. Ipatov, I. A. Rahimov, S. A. Grenkov, N. E. Kol'tsov, T. S. Andreeva

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The regular measurements of broadband radio emission flux densities (FD) are carried out on the RT-32 radio telescopes of the “Svetloe” observatory. The main aim of these measurements is to study the variability of cosmic sources emission and refine the flux scale formed by the “artificial moon” method. The FD studies were carried out in four frequency bands (L, S, C and X), but in 2009 they were suspended in the L and S frequency bands due to a significant increase in radio interference generated by mobile communication systems. The observations were resumed in 2013 after the creation of a digital broadband spectral-selective radiometer with protection against radio interference which replaced the traditional radiometer with an amplitude quadratic detector of broadband noise signals.

Radiation variability study and flux scale monitoring require measurements with an accuracy of no worse than 2–3 %. Achieving such accuracy is a rather complicated task that can only be solved with the help of radiometric equipment that measures the power and noise temperature of the received broadband signal with extremely high accuracy. The accuracy of a radiometric system determines the scatter of the FD measurement results and, accordingly, the required amount of repeating measurements. The accuracy is supreme important for radiometric studies performed in the presence of radio interference. Along with random errors in FD measurements which depend on the radiometer accuracy there can be systematic errors that depend on the accuracy of determining the effective antenna area as well as the accuracy of determining the reference source FD used (flux scale standard).

The purpose of the article is to analyze the accuracy in measuring noise temperatures and radio emission power by a spectral-selective radiometer. Besides, the article determines observations volume necessary to obtain a given accuracy of radiometric measurements. This will allow optimizing programs for radiometric observations performed by the RT-32 radio telescope in order to study the variability of radio emission from sources.

When estimating the random error in measuring noise temperature, broadband signal accuracy and received radio emission FD under the influence of radio interference, methods common for radiometry and measuring technology are used. Data on systematic errors of FD measurements are determined on the basis of published materials on the RT-32 parameters and the flux scale accuracy. The random (noise) error in the FD measurement with an accumulation time of 1 s is (4–15) % depending on the frequency band and signal level and it decreases in a series of repeated measurements.

For the RT-32 radio telescope with a spectral-selective radiometer the measurement volumes (accumulation time τ and the number of repeated measurements M) are determined. In the frequency bands C and X in order to obtain a root-mean-square error of about 1 % it is necessary to accumulate a signal with an FD of about 5 Jy for $\tau M \geq 4\text{--}5$ s, and a signal with an FD of 1 Jy for 36 s. In the L and S frequency bands a signal with a level of 5 Jy needs $\tau M \geq 22$ s, and a signal at a level of 2 Jy — at least 144 s.

In a spectral-selective radiometer with square-wave modulation of the receiving device the signal and noise spectra are accumulated separately. This allows implementing a mode with signal and noise accumulation at different time intervals (asymmetric accumulation mode). In this case it is possible to increase the accuracy of the radiometer by 29 %. The RT-32 radio telescope with a spectral-selective radiometer is used to monitor the “artificial moon” flux scale and to study the variability of broadband radio emission from space sources.

Keywords: broadband radio spectrum, broadband radio spectrums calibration, accuracy of radiometric measurements, estimation of the monitoring accuracy of flux scale, spectral interference rejection, spectral-selective radiometer.

Contacts: Sergey A. Grenkov (grenkov@iaaras.ru).

For citation: Ipatov A. V., Rahimov I. A., Grenkov S. A., Kol'tsov N. E., Andreeva T. S. Estimated accuracy of spectral-selective radiometer // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 61. P. 44–52.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.61.44-52>

Введение

С 2002 г. на радиотелескопах РТ-32 регулярно проводятся радиометрические измерения переменности широкополосного радиоизлучения космических источников и плотности потоков радиоизлучения (ППР) в диапазонах частот L (длина волны 18 см), S (13 см), C (6.2 см) и X (3.5 см). Наблюдения проводятся с целью исследования физической природы наблюдаемых космических объектов и мониторинга шкалы потоков радиоиз-

лучения «искусственная Луна» ([Иванов, 2006](#); [Иванов, 2018](#)).

До 2009 г. значения мощности и шумовой температуры сигналов, принятых антенной радиотелескопа, измерялись радиометром, выполненным по классической схеме с аналоговым квадратичным детектором (АКД) широкополосного шумового сигнала ([Есепкина, 1973](#)). Но в 2009 г. вследствие ухудшения помеховой обстановки, связанной с быстрым развитием систем связи в диапазонах частот L, S и C ([Ильин, 2009](#); [Кратов,](#)

2012), радиометрические измерения стали крайне затруднительными, а наблюдения с целью мониторинга шкалы потоков в диапазонах частот L и S были прерваны. Известно много способов борьбы с радиопомехами: использование высокочастотных фильтров (Есепкина, 1973), фильтрация во временной области по амплитудному критерию (Кратов, 2012) и другие способы (Fridman, 2001; Fridman, 2008; Dou, 2009; Gary, 2010). Но ни один из них не может обеспечить эффективную защиту радиотелескопов РТ-32 с высокочувствительными широкополосными радиометрами от воздействия радиопомех. Чтобы выполнять программы радиометрических измерений во всех диапазонах волн, в ИПА РАН был разработан и введён в эксплуатацию цифровой спектрально-селективный радиометр, обеспечивший возможность работы радиометра в условиях воздействия радиопомех (Кольцов, патент 2011; Гренков, 2015). Это позволило в 2013 г. возобновить в полном объёме программы наблюдений по исследованию небольших переменностей радиоизлучения и мониторингу шкалы потоков «искусственная Луна» (Иванов, 2018).

Чтобы регистрировать небольшие переменности радиоизлучения космических источников и уточнять шкалы потоков, радиометрическая система должна обеспечивать достаточно высокую точность измерения мощности и температуры принимаемых сигналов. На радиотелескопе РТ-32 ППР наблюдаемого источника обычно определяется относительным методом, основанным на сравнении измеренных значений мощности исследуемого сигнала и сигнала от одного из стандартов шкалы потоков (Иванов, 1986). Поскольку принцип действия помехозащищённой спектрально-селективной радиометрической системы существенно отличается от применявшихся ранее радиометрических систем, полезно детальнее исследовать её точность и возможности измерений спектров радиоизлучения в условиях воздействия радиопомех. Это позволит более рационально планировать объёмы радиометрических наблюдений при исследо-

ваниях переменности радиоизлучения космических источников. Оценка точности радиометрической системы может быть полезной при анализе результатов измерения ППР относительно стандартов из разных шкал потоков (Иванов, 2018; Иванов, 1986; Baars, 1977; Ott, 1994; Kuhr, 1981).

Основные ошибки измерений плотности потока радиоизлучения

ППР S_ν на частоте ν обычно определяются по измеренной радиотелескопом мощности P_s (или шумовой температуре T_s) принимаемого антенной сигнала:

$$S_\nu = 10^{26} \cdot 2P_s/AW = 10^{26} 2k T_s/A, \quad (1)$$

где $A = 0.25\pi D^2\chi$ — эффективная площадь антенны; D — диаметр рефлектора антенны; χ — коэффициент использования поверхности антенны (КИП); W — полоса пропускания радиоастрономического приёмного устройства (РПУ); k — постоянная Больцмана. Множитель 10^{26} переводит единицу измерения Вт/(м²Гц) в янские, а коэффициент 2 учитывает распределение энергии шумового сигнала по двум ортогональным поляризациям волн. КИП и эффективная площадь антенны РТ-32 изменяются в зависимости от угла места θ . Меняется при перемещениях антенны и уровень шумов, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности, что влияет на шумовую температуру радиотелескопа T_n . В первом приближении при расчётах ППР можно использовать представленные в таблице типовые (номинальные) параметры радиотелескопа РТ-32 (Иванов, 2018), (ИПА РАН, СВЧ — приёмный комплекс РТ-32).

При воздействии радиопомех (например в диапазонах частот S, L и C) в спектрально-селективном радиометре исключаются занятые помехами частотные каналы, и при расчётах вместо полосы W используется свободная от помех полоса частот $W_1 = W - W_{RFI}$, где W_{RFI} — суммарная полоса частот, занятая помехами. В диапазоне частот, где нет радиопомех, $W_1 = W$.

Таблица

Номинальные значения основных параметров приемных систем радиотелескопа РТ-32 для четырех диапазонов частот

Параметр системы	Диапазон L	Диапазон S	Диапазон C	Диапазон X
Полоса W , МГц	340	350	900	900
Средняя частота, МГц	1550	2370	5050	8630
КИП антенны (номинал)	0.6	0.48	0.6	0.56
Эффективная площадь антенны (номинал), м ²	482.5	385.8	482.5	450.4
Шумовая температура системы T_n (номинал), К	48	50	33	39

При радиометрическом измерении наблюдаемого сигнала ППР S_v определяется с ошибкой

$$\Delta S_v \approx \Delta S_P + \Delta S_{\text{сист}},$$

где $\Delta S_P = 2 \cdot 10^{26} \Delta P_s / AW_1$ — случайная ошибка, которая учитывает погрешность ΔP_s измерения мощности сигнала, принятого антенной; $\Delta S_{\text{сист}}$ — возможная систематическая ошибка.

Ошибка ΔS_P определяется шумовыми флуктуациями измеренной радиометром мощности P_s , СКО σ_P которой при усреднении M повторяющихся измерений уменьшается в \sqrt{M} раз. Расчёт случайной ошибки приводится ниже.

Ошибка $\Delta S_{\text{сист}}$, в отличие от случайной погрешности ΔS_P , не зависит от точности радиометра, является систематической и не устраняется при простом усреднении результатов радиометрических измерений. Причинами появления систематических ошибок $\Delta S_{\text{сист}}$ могут быть ошибки ΔS_A определения эффективной площади антенны A , а также погрешности калибровки ΔS_{cal} , зависящие от точности используемых при калибровке стандартов шкалы потоков.

Относительная систематическая ошибка $\delta S_A = \Delta S_A / S_v$, обусловленная зависимостью эффективной площади антенны A от углов места θ , при прямом измерении ППР на радиотелескопе РТ-32 (Иванов, 2006) была бы в пределах $\pm 5\%$. Но при определении ППР методом относительных измерений и рациональным подбором стандартов шкалы потоков ошибка δS_A уменьшается примерно на порядок и обычно не превышает 0.5% .

Ошибка калибровки ΔS_{cal} появляется вследствие того, что значение ППР $S_{v.st}$ выбранного стандарта шкалы потоков может отличаться от истинного значения ППР $S_{v.st}^*$ на некоторую величину $\Delta S_{v.st} = S_{v.st} - S_{v.st}^*$, зависящую от точности шкалы потоков. Измеряемая мощность P_s исследуемого сигнала пропорциональна истинному значению ППР S_v^* , но мощность $P_{v.st}$ сигнала от стандарта калибруется не по истинному значению ППР $S_{v.st}^*$, а по значению ППР $S_{v.st}$, взятому из шкалы потоков. При этом искомое значение ППР сигнала будет определено как

$$S_v = \frac{S_{v.st} P_s}{P_{v.st}} = \frac{S_{v.st}^* P_s}{P_{v.st}} + \frac{\Delta S_{v.st} P_s}{P_{v.st}}. \quad (2)$$

Второе слагаемое является ошибкой калибровки ΔS_{cal} . Поскольку измеренные мощности P_s и $P_{v.st}$ пропорциональны принимаемым потокам S_v^* и $S_{v.st}^*$ соответственно, из (2) следует, что при достаточно высокой точности шкалы потоков ($S_{v.st}^* \approx S_{v.st}$) ошибка калибровки ППР $\Delta S_{\text{cal}} \approx \Delta S_{v.st} S_v / S_{v.st}$. Относительная ошибка калибровки ППР исследуемого источника $\delta S_{\text{cal}} = \Delta S_{\text{cal}} / S_v$ равна относительному отклонению $\Delta S_{v.st} / S_{v.st}^*$ ППР используемого стандарта от его истинного значения на частоте приёма. Относительная ошибка калибровки спек-

тра δS_{cal} не зависит от соотношения уровней потоков исследуемого сигнала и стандарта, но абсолютная ошибка ΔS_{cal} меняется пропорционально отношению $S_v / S_{v.st}$. Для современного радиотелескопа РТ-32, линейность амплитудной характеристики которого гарантируется в динамическом диапазоне 60 дБ, даже при большом отношении сравниваемых ППР исключаются нелинейные ошибки измерений мощности сигналов.

Шкалы потоков в современную эпоху определяют ППР стандартов с погрешностью не более 3% , а отдельных первичных стандартов (например CasA) — около 1% (Иванов, 2018). Следовательно, относительная ошибка калибровки ППР принимаемого сигнала будет в пределах $\pm 3\%$, а суммарная относительная систематическая ошибка $\delta S_{\text{сист}} = \delta S_{\text{cal}} + \delta S_A$ не превышает $3.5\text{--}4\%$. Эта оценка даёт приблизительное представление о вкладе систематической ошибки в общую погрешность измерений ППР. Систематическая ошибка не увеличивает случайные флуктуации выходного сигнала радиометра и потому остаётся незаметной для наблюдателя, но она смещает по уровню вычисленные значения ППР.

Кроме указанных выше, могут быть ошибки измерения ППР, связанные с погрешностями наведения антенны на источник, особенно в диапазонах частот X и Ka (длина волны ~ 1.35 см), где диаграммы направленности 32-метровой антенны весьма узкие. Эти ошибки можно свести к минимуму путём сканирования источника по двум ортогональным направлениям и измерения мощности сигнала в пике отклика радиометра. Аналогично измеряются и ППР таких источников радиоизлучения (например 3C274, 3C348, 3C353, 3C405), угловые размеры которых соизмеримы с шириной диаграммы направленности антенны (Иванов, 2006).

Точность измерения мощности принимаемого сигнала

Точность измерения шумовой температуры и мощности принимаемого сигнала зависит от чувствительности и точности радиометра. Для радиометрической системы с полосой приёма W СКО измеренной мощности принимаемого антенной сигнала

$$\sigma_{P,\text{min}} \approx b P_n \sqrt{2/\tau W}$$

и СКО шумовой температуры T_s сигнала в антенне

$$\sigma_{T,\text{min}} \approx b T_n \sqrt{2/\tau W}. \quad (3)$$

Здесь b — коэффициент, соответствующий режиму работы радиометра ($b = 2.2$ для модуляционного радиометра с глубиной модуляции РПУ 10 дБ); P_n и T_n — мощность и температура шумов радиотелескопа в полосе W ; τ — время накопле-

ния сигнала (Есепкина, 1973). Формула (3), полученная для идеальной радиометрической системы с точно известными и абсолютно стабильными параметрами (при отсутствии радиопомех), характеризует потенциальную чувствительность и точность системы. При регистрации слабого сигнала, для которого отношение сигнал/шум $q_s = T_s/T_n \ll 1$, значения $\sigma_{P,\min}$ и $\sigma_{T,\min}$ определяются уровнем шумов радиотелескопа и практически не зависят от принимаемого сигнала. В случае отсутствия радиопомех для радиотелескопа РТ-32 можно принять $\sigma_{T,\min} \approx 10^{-4}T_n$ при полосе $W = 900$ МГц и времени накопления $\tau = 1$ с (Финкельштейн, 2004). При уровнях принимаемых сигналов на $1 \div 3$ порядка ниже шумов радиотелескопа, и времени накопления $\tau = 1$ с относительное СКО измеряемой шумовой температуры

$$\delta_{T,\min} = 100 (\sigma_{T,\min}/T_s) \% = (0.1 \div 10) \%$$

Такая точность идеальной радиометрической системы достигается при отсутствии радиопомех. Реальная точность измерений будет ниже, так как имеются инструментальные потери в конкретной радиометрической системе и, кроме того, могут быть радиопомехи.

Температура T_n шумов радиотелескопа и отношение сигнал/шум q_s меняются при перемещении антенны, сопровождающей источник излучения. При уменьшении угла места от 70° до 15° температура шумов радиотелескопа РТ-32 может увеличиться в $1.5 \div 2$ раза. При оценке точности измерений значение шумовой температуры T_n радиометрической системы и СКО σ_T разумно увеличить примерно в 1.7 раза.

На РТ-32 измерения в условиях воздействия радиопомех выполняются спектрально-селективным радиометром, работающим в режиме с модуляцией РПУ ($b = 2.2$). При этом спектр мощности принимаемого шумового сигнала с полосой $W \leq 1$ ГГц вычисляется конвейерным способом (без потерь времени приёма) методом быстрого преобразования Фурье. Вычисленные дискретные спектры накапливаются и усредняются отдельно для разных полупериодов модуляции РПУ: при приёме смеси принимаемого сигнала и шумов РПУ и при приёме только шумов (Гренков, 2015). Из усреднённых спектров удаляются компоненты на частотах радиопомех, которые чётко просматриваются в виде выбросов на фоне гладких спектров широкополосных шумов. После этого сравниваются усреднённые спектры и определяется приведённая мощность ρ_s (квадрат напряжения) исследуемого широкополосного сигнала в полосе W_1 , свободной от радиопомех. Это даёт значения мощности $P_{s1} = \rho_s/zG$ в полосе W_1 и шумовой температуры $T_s = P_{s1}/kW_1$ сигнала в антенне, где z — волновое сопротивление широкополосного приёмного кана-

ла; G — коэффициент усиления мощности в приёмном канале.

Точность спектрально-селективного радиометра можно оценить по формуле (3), заменив W на W_1 (Кольцов, 2011). Поскольку ППР определяют путём сравнения измеренных шумовых температур исследуемого сигнала и стандарта, СКО $\sigma_{T,\min}$ следует увеличить в $\sqrt{2}$ раз. С учётом изложенного СКО случайной ошибки одиночного измерения шумовой температуры принимаемого сигнала будет

$$\sigma_T \approx 7.5\mu T_n / \sqrt{\tau W_1}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент инструментальных потерь в радиометре. В традиционном радиометре к небольшим инструментальным потерям ($\mu \approx 1.01 \div 1.04$) могут привести отклонения от идеальной квадратичной характеристики широкополосного детектора и недостаточная симметрия характеристики аналогового синхронного детектора в узкополосном канале радиометра, а также ограниченный динамический диапазон каналов на аналоговых элементах. Таких потерь в радиометрической системе РТ-32 нет, и измерения могут проводиться без нелинейных искажений в динамическом диапазоне 60 дБ, что достигнуто за счёт проведённой в 2011 г. модернизации приёмно-усилительных каналов и применения цифрового спектрально-селективного радиометрического модуля. Причинами очень небольших потерь ($\mu \approx 1.01$) здесь могут быть недостаточная линейность и смещение нуля характеристики аналого-цифрового преобразователя широкополосных сигналов. В обоих радиометрах инструментальные потери малы, и их небольшое различие почти не влияет на результаты радиометрических измерений. Поэтому в диапазонах частот X и Ka, где нет радиопомех и $W_1 = W$, радиометры имеют практически одинаковые чувствительности и точности измерений шумовых температур сигналов, что подтверждено расчётами (Кольцов, 2011) и результатами сравнительных радиометрических измерений в обсерватории «Светлое». В диапазонах частот L, S и C, где много что в условиях воздействия радиопомех надёжные результаты радиометрических измерений обеспечивает, как показали наблюдения, только спектрально-селективный радиометр.

Число радиопомех и занятая ими полоса частот W_x меняются в широких пределах в зависимости от времени суток, дней недели и месяцев (Ильин, 2009). В диапазонах волн S и L помеховая обстановка в обсерватории «Светлое» быстро ухудшалась с 2006 по 2014 гг. В последующие годы существенных изменений сложившейся помеховой обстановки не наблюдается (см. рис. 1–3).

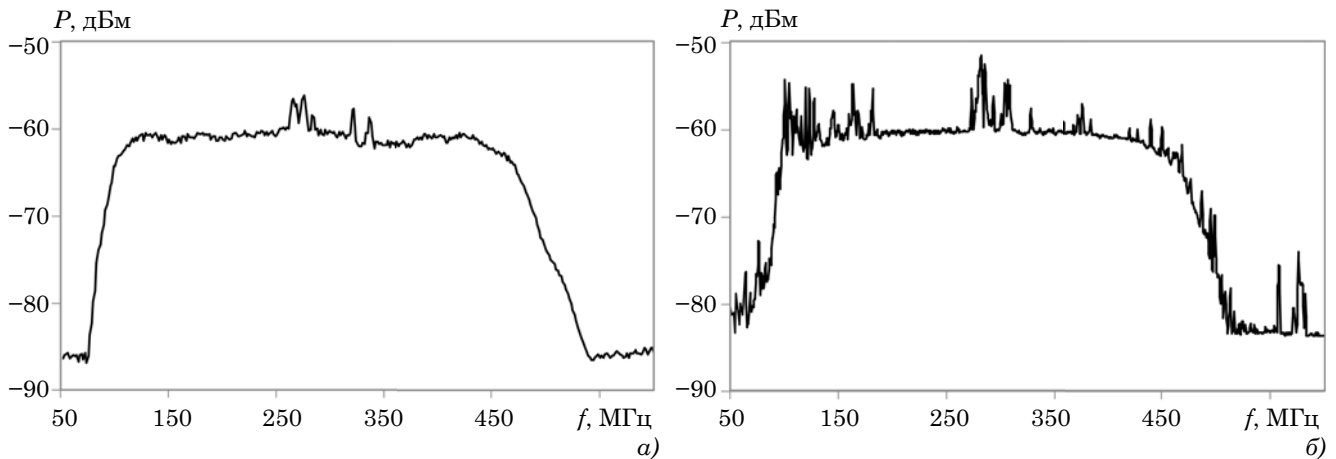


Рис. 1. Спектры шумового сигнала с радиопомехами в канале диапазона L obs. «Светлое»: *a* — в декабре 2006 г.; *б* — в июне 2018 г. Ориентация главного лепестка диаграммы направленности по азимуту — 180° , по углу места — 15°

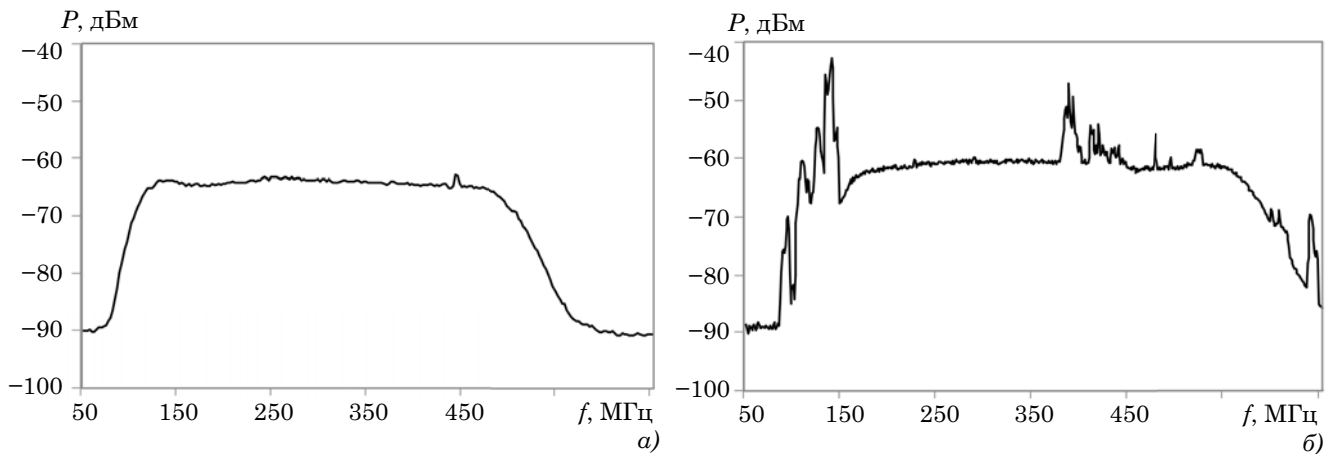


Рис. 2. Спектры шумового сигнала с радиопомехами в канале диапазона S obs. «Светлое»: *a* — в декабре 2006 г.; *б* — в июне 2018 г. Ориентация главного лепестка диаграммы направленности по азимуту — 180° , по углу места — 15°

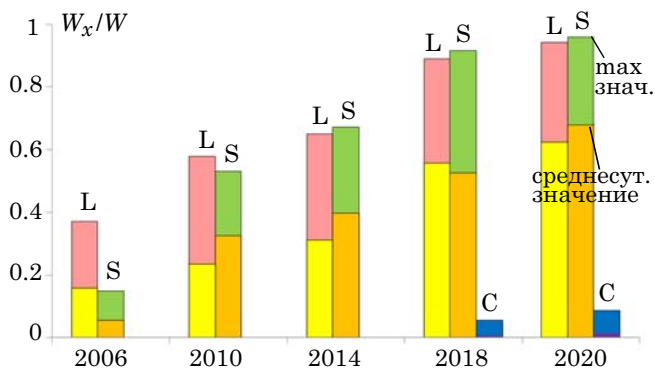


Рис. 3. Изменение полосы W_x , занятой помехами, с 2006 по 2021 гг. в диапазонах L, S и C

Данные исследований помеховой обстановки подтверждают радиометрические наблюдения с использованием спектрально-селективного радиометра, проводимые после 2013 г. При использовании режекторных фильтров на частотах мощных радиопомех, а также при применении администра-

тивных мер по сохранению помеховой обстановки в окрестностях обсерватории (при условии, что сотовые станции будут соблюдать заявленную мощность и частотные диапазоны), можно полагать, что радиометрические наблюдения в диапазонах частот L и S могут проводиться и в дальнейшем. Помехи в этих диапазонах частот в зависимости от ориентации главного лепестка диаграммы направленности радиотелескопа в среднем занимают от 30 % до 70 % полосы приёма и соответственно $W_1 \approx (0.7 \div 0.3)W$, причём в обсерватории «Светлое» радиопомехи могут наблюдаться одновременно на $5 \div 20$ частотах в полосе приёма W . Наибольшее количество и максимумы интенсивности помех в obs. «Светлое» регистрируются при направлении антенны по азимуту ($180\text{--}270^\circ$) при угле места ($15\text{--}30^\circ$), особенно в дневное и вечернее время, что следует учитывать при планировании наблюдений. Мощности помех меняются случайным образом и достаточно быстро, а их амплитуды, как правило, на $10 \div 15$ дБ (в $10 \div 30$ раз) выше спектра мощности шумов радиотелескопа. По-

сколькx спектр помехи (сигнала сотовой связи) не ограничивается вырезаемой полосой частот и имеет за ее пределами достаточно слабые (ниже уровня шумов) составляющие, несколько повышается уровень шумов в полосе W_1 . Этим эффектом можно пренебречь в диапазоне частот С, где помех немного и используемая полоса частот широкая ($W_1 \approx 855$ МГц). В диапазонах частот S и L уровень шумов в полосе W_1 может повыситься до 10 %, что можно учесть соответствующим увеличением коэффициента потерь μ . В диапазоне частот С в первом приближении можно принять $W_1 \approx 0.95W$ (5 % полосы приёма занято помехами). В ближайшие годы следует ожидать увеличения числа радиопомех в диапазоне частот С, но радиометрические наблюдения в обсерватории «Светлое» могут продолжиться. В диапазонах X и K радиопомех в настоящее время нет.

С учётом сложившейся в обсерватории «Светлое» помеховой обстановки можно принять в первом приближении $W_1 \approx 170$ МГц и $\mu \approx 1.11$ в диапазонах частот L и S, $W_1 \approx 855$ МГц и $\mu \approx 1.01$ в диапазоне частот С; $W_1 \approx 900$ МГц и $\mu \approx 1.01$ в диапазонах частот X и K.

Согласно (1) и (4) в серии из M измерений СКО случайной (шумовой) составляющей общей ошибки измерения спектральной плотности потока (в янских)

$$\sigma_S \approx \frac{2 \cdot 10^{26} k \sigma_T}{A \sqrt{M}} \approx \frac{20.7 \cdot 10^3 \mu T_n}{A \sqrt{M W_1}}. \quad (5)$$

По формуле (5) при $\tau = 1$ с спектр определяется с ошибкой $\sigma_S \approx 0.06$ Ян в диапазоне частот X, $\sigma_S \approx 0.049$ Ян в диапазоне С, $\sigma_S \approx 0.229$ Ян в диапазоне S и $\sigma_S \approx 0.176$ Ян в диапазоне L. В диапазонах частот S и L случайные ошибки больше, чем в диапазонах частот X и С, вследствие повышенного уровня собственных шумов радиотелескопа T_n и сужения полос пропускания W_1 из-за воздействия радиопомех. Случайная составляющая относительной ошибки вычислений ППР

$$\delta_S = 100(\sigma_S/S)\%.$$

При достаточно сильных сигналах ($S > 5$ Ян) точность даже одиночного измерения ППР в диапазонах частот X и С достаточно хорошая ($\delta_S < 1.2$ %). При сравнительно слабых потоках излучения (1–2 Ян) погрешность увеличивается до (5–6) %. В диапазонах частот S и L погрешность δ_S при сильных сигналах ($S > 5$ Ян) не превышает 4.6 %, а при слабых сигналах (1–2 Ян) возрастает до (12–23) %. Измерения весьма слабых сигналов (< 1 Ян) сопровождаются очень большим разбросом результатов, особенно в диапазонах частот S и L. Ошибку δ_S можно снизить в 1.4–2 раза, увеличив время накопления τ до 2–4 с.

В серии из M повторяющихся независимых измерений ППР усреднённые значения случай-

ных ошибок σ_S и δ_S уменьшаются в \sqrt{M} раз. Чтобы уменьшить ошибку δ_S до допустимого значения $\delta_{S\text{доп}}$ необходимо выполнить $M \geq (\delta_S/\delta_{S\text{доп}})^2$ измерений ППР. Для определения ППР потока с уровнем около 1 Ян в диапазонах частот X и С со случайной погрешностью $\delta_{S\text{доп}} \approx 1$ %, необходимо первичное время накопления τ и число M повторных измерений выбрать так, чтобы получить суммарное время накопления $\tau M \geq 36$ (например, 36 измерений при $\tau = 1$ с или 8 измерений при $\tau = 5$ с). При уровнях излучения больше 5 Ян вполне достаточно $\tau M \geq (4 \div 5)$ с. В диапазонах частот S и L для получения такой же точности нужно не менее $\tau M \geq 22$ с даже при приёме сигнала с уровнем 5 Ян. При уровне сигнала 2 Ян необходим такой режим наблюдений, при котором суммарное время накопления $\tau M \geq 144$ с. Для определения ППР весьма слабых сигналов (< 2 Ян) с высокой точностью ($\delta_{S\text{доп}} \approx 1$ %) потребовался бы нереально большой объём радиометрических измерений.

В отличие от традиционного радиометра с квадратичным детектором и аналоговым синхронным фильтром, в спектрально-селективном радиометре спектр шумов с сигналом и спектр шума без сигнала накапливаются и усредняются отдельно и только потом сравниваются. При этом время накопления $\tau_{\text{ш}}$ шумов, уровень которых меняется достаточно медленно, можно увеличить по сравнению со временем накопления сигнала τ (Bremer, 1979). В спектрально-селективном радиометре с модуляцией РПУ меандром такой режим несимметричного накопления легко реализовать, поскольку два шумовых сигнала (с исследуемым сигналом и без него) накапливаются отдельно по неодинаковым полупериодам модуляции РПУ. Теоретически при абсолютно стабильном уровне шумов радиотелескопа и весьма большом времени накопления шумов (без сигнала) можно повысить точность измерений в $\sqrt{2}$ раз. Реально при времени накопления шумов $\tau_{\text{ш}} = (4 \div 5)\tau$, можно уменьшить случайную ошибку δ_S на 29 % (Кольцов, 2021).

Оценить преимущества спектрально-селективного радиометра (ССР) при воздействии радиопомех по сравнению с традиционным радиометром на базе амплитудного квадратичного детектора (АКД) можно по относительным отклонениям измеренной мощности сигналов $[100(T_{\text{изм}} - T_{\text{ср}})/T_{\text{ср}}]$ %, где $T_{\text{ср}}$ — среднее значение измеренной шумовой температуры при одинаковых временах накопления τM . На рис. 4–6 представлены результаты наблюдений источников 3С123 и 3С295 с относительно стабильными излучениями в диапазонах волн L (средняя частота 1550 МГц) и S (2370 МГц). До 2009 г. наблюдения традиционным радиометром с АКД шумового сигнала. До конца 2003 г. помех практически не было, и радиометр с АКД

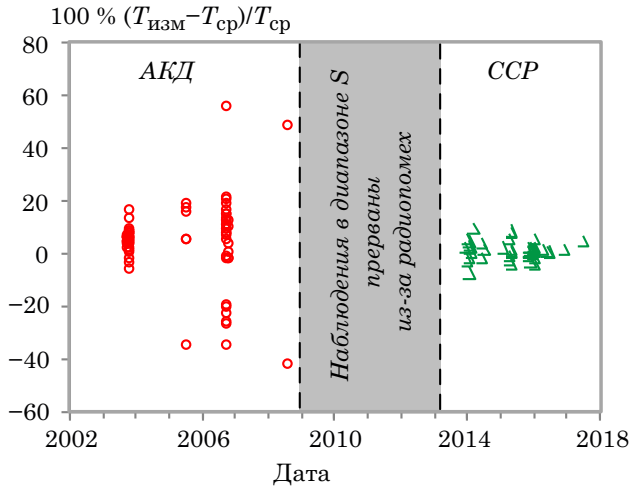


Рис. 4. Относительное отклонение измеренной мощности сигнала источника 3C123 (номинал 26.11 Ян на частоте 2370 МГц для эпохи 2015.5)

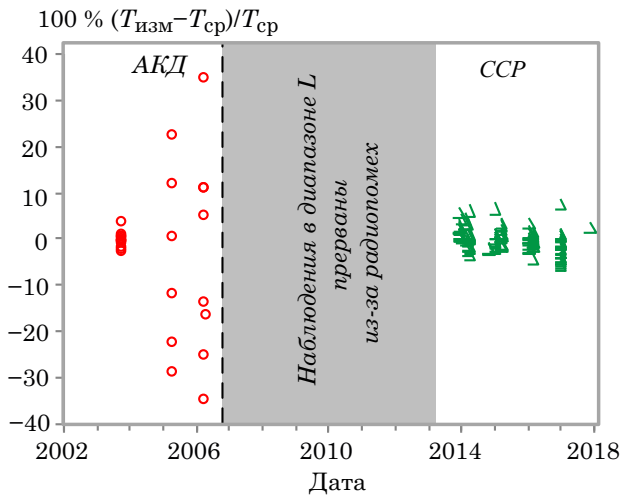


Рис. 5. Относительное отклонение измеренной мощности сигнала источника 3C295 (номинал 18.72 Ян на частоте 1550 МГц для эпохи 2015.5)

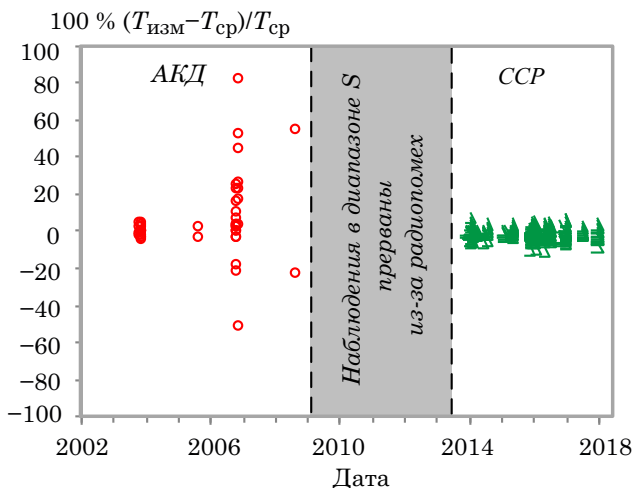


Рис. 6. Относительное отклонение измеренной мощности сигнала источника 3C295 (номинал 12.21 Ян на частоте 2370 МГц для эпохи 2015.5)

обеспечивал надёжные результаты измерений, но по мере развития систем сотовой связи разброс результатов измерений значительно увеличился, даже при наблюдениях только в те часы, когда интенсивность радиопомех была минимальной. В течение 2009–2013 гг. радиометрические наблюдения в обсерватории «Светлое» в диапазонах частот L и S не проводились из-за значительного ухудшения помеховой обстановки. Начиная с 2013 г. наблюдения проводились спектрально-селективным радиометром в любое время суток.

В отличие от результатов измерений шумовой температуры штатным радиометром с АКД (2005–2006 гг.), ССР даёт стабильные, хорошо повторяющиеся в течение ряда лет (2013–2018 гг.) результаты достаточно точных измерений. Такие же результаты получены и при мониторинге ППР источников, проводимых с 2019 г. до настоящего времени.

Разброс отсчётов шумовых температур, характеризующий точность радиометрических измерений при использовании ССР небольшая и удовлетворительно соответствует расчётам. Сравнивая результаты 2013–2018 гг. с результатами, полученными в 2002 г., когда ещё не было радиопомех, можно заметить небольшое увеличение разброса отсчётов измеренной шумовой температуры (рис. 5–6). Это обусловлено, в первую очередь, исключением части полосы приёма (использованием полосы $W1 < W$), а также влиянием слабых (ниже уровня шумов) помех и не исключённых внеполосных частей помеховых сигналов. На разброс отсчётов в какой-то мере влияет также зависимость шумов антенны от сезонных и климатических факторов. Но в любом случае только ССР обеспечивает возможность проведения радиометрических измерений в диапазонах частот L и S, где много радиопомех.

В диапазоне частот С, где помех в настоящее время ещё немного, существенного снижения точности не наблюдается. Есть тенденция постепенного ухудшения помеховой обстановки в этом диапазоне частот, но возможность радиометрических измерений безусловно сохраняется. В диапазоне частот Х, где нет радиопомех, точность измерений при использовании ССР и радиометра с АКД была практически одинаковой. В целом, СКО шумовой температуры сигнала от среднего значения составляет 1.5–3 %.

Заключение

Использование спектрально-селективного радиометра позволило в сложной помеховой обстановке в обсерватории «Светлое» проводить высокоточные измерения ППР, обеспечить возможность исследования даже небольших переменностей радиоизлучения источников и продолжить мониторинг шкалы потоков. Радиометр обеспечил вы-

полнение программ радиометрических измерений во всех диапазонах частот, включая диапазоны L и S, где исследования были прерваны из-за радиопомех от систем радиосвязи.

Для радиометра с защитой от радиопомех определены зависимости необходимого времени накопления от заданной точности измерений шумовой температуры и мощности принимаемых сигналов и их уровней. Проведённый анализ точности помехозащищённого спектрально-селективного радиометра на радиотелескопе РТ-32 хорошо согласуется с результатами радиометрических исследований в обсерватории «Светлое» в условиях воздействия радиопомех. Полученные результаты будут полезными для рационального планирования наблюдений.

С использованием спектрально-селективного радиометра были уточнены шкалы потоков «искусственная Луна» на эпохи 2013.5 и 2015.5 (Иванов, 2018) и продолжаются серии радиометрических измерений с целью уточнения шкалы потоков на очередную эпоху.

Авторы благодарят В. П. Иванова за полезные замечания по рукописи статьи.

Литература

- Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Спектрально-селективный модуль радиометра с защитой от радиопомех // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. LVIII, № 7. С. 577–586.
- Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры / под ред. Д. В. Королькова. М.: Наука, 1973. 416 с.
- Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А. и др. Спектры стандартных радиосточников в современную эпоху // Астрономический журнал, 2018. Т. 95, № 9. С. 609–618.
- Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А. и др. Эталонирование источников с секундными угловыми размерами в качестве стандартов современной радиоастрономической шкалы потоков // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 14. С. 20–32.
- Иванов В. П., Станкевич К. С. Радиоастрономическая абсолютная шкала потоков // Известия вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 1. С. 3–27.
- Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н., Рахимов И. А. Защита от помех радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 19. С. 152–163.
- ИПА РАН. Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО». СВЧ — приемный комплекс РТ-32 [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/rt-32/uhf/> (дата обращения 06.06.2022).
- Кольцов Н. Е. Спектрметрическая система регистрации космического радиоизлучения // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 2. С. 59–69.
- Кольцов Н. Е. Эффективность несимметричной модуляции спектрально-селективного радиометра // Труды ИПА РАН, 2020. Вып. 55. С. 10–15.
- Кратов Д. В., Берлин А. Б., Нижельский Н. А. и др. Помеховая обстановка на радиотелескопе РАТАН-600 и перспективные методы подавления помех // Труды ИПА РАН. ИПА РАН, 2012. Вып. 24. С. 222–227.
- Радиометрический способ регистрации слабого широкополосного радиоизлучения: пат. 2431852 С2 Российская Федерация, МПК G01R 23/16 / Кольцов Н. Е. Опубл. 20.10.11. Бюл. № 29.
- СВЧ-приемный комплекс РТ-32 [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/rt-32/uhf/> (дата обращения: 25.03.2022).
- Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Смоленцев С. Г. Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар» — научные задачи, техника и будущее // Земля и Вселенная. 2004. № 4. С. 12–27.
- Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A. Setting the radio astronomy flux density scale // Astronomy and Astrophysic. 1977. Vol. 61. P. 99–106.
- Bremer J. C. Improvement of scanning radiometer performance by digital reference averaging // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1979. Vol. 28, Issue 1. P. 46–54.
- Dou Y., Gary D. E., Liu Z., et al. The Korean Solar Radio Burst Locator (KSRBL) // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2009. № 121. P. 512–526.
- Fridman P. A. RFI excision using a higher order statistics analysis of the power spectrum // Astronomy & Astrophysics. 2001. № 368. P. 369–376.
- Fridman P. A. Statistically stable estimates of variance in radio-astronomy observations as tools for radio-frequency interference mitigation // The astronomical journal. 2008. № 135. P. 1810–1824.
- Gary D. E., Liu Z., Nita G. M. A Wideband Spectrometer with RFI Detection // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2010. № 122. P. 560–572.
- Kuhr H., Witzel A., Pauliny-Toth I. I. K., Nauber U. A catalogue of extragalactic radio sources having flux densities greater than 1 Jy at 5 GHz // Astron. Astrophys. S. S. 1981. Vol. 45. P. 367–430.
- Ott M., Witzel A. et al. An updated list of radio flux density calibrators // Astronomy and Astrophysics. EDP sciences, 1994. Vol. 284. P. 331–339.