



ВВЕДЕНИЕ

На радиотелескопах РТ-32, начиная с 2002 г., регулярно проводятся радиометрические измерения переменностей широкополосного радиоизлучения космических источников и плотностей потоков радиоизлучения (ППР) в диапазоне дециметровых – сантиметровых волн. Программы радиометрических наблюдений направлены на исследование физической природы и эволюции наблюдаемых космических объектов, а также на мониторинг и уточнение шкалы потоков радиоизлучения [1], [2]. Высокочувствительные радиометрические приёмные устройства (РПУ) радиотелескопов РТ-32 обеспечивают измерения ППР в диапазонах волн 18 см (диапазон L), 13 см (S), 6.2 см (C), 3.5 см (диапазон X) и 1,35 см (Ka).

До 2009 г. мощности и шумовые температуры сигналов, принятых антенной радиотелескопа, измерялись радиометром, выполненным по классической схеме с аналоговым квадратичным детектором (АКД) широкополосного шумового сигнала [3]. Но в 2009 г. вследствие ухудшения помеховой обстановки из-за быстрого развития систем связи и управления в диапазонах волн L, S и C [4], [5], радиометрические измерения в этих диапазонах волн крайне затруднились, а наблюдения с целью мониторинга шкалы потоков в диапазонах волн L и S были прерваны. Известные методы борьбы с радиопомехами (например, высокочастотные фильтры [3], фильтрация во временной области по амплитудному критерию [5]) не могли обеспечить эффективную защиту радиотелескопов РТ-32 от воздействия радиопомех. Чтобы выполнять программу 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 [6], [7]. Это позволило в 2012 г. возобновить в полном объёме программу наблюдений по исследованию небольших переменностей радиоизлучения и мониторингу шкалы потоков [2].

Чтобы регистрировать небольшие переменности радиоизлучения космических источников и уточнять шкалы потоков, необходима очень высокая точность измерения ППР. В работах по исследованию спектров космического радиоизлучения обычно указывается точность измерения ППР, но достаточно полного анализа реальной точности с учётом всех инструментальных потерь ещё не проведено. В первую очередь это относится к помехозащищённой спектрально-селективной радиометрической системе, принцип действия которой отличается от применявшихся ранее систем.

Представленный в данной докладе анализ реальной точности измерения ППР спектрально-селективным радиометром необходим для рационального планирования объёмов радиометрических наблюдений на радиотелескопах РСДБ комплекса «Квазар-КВО», которые заняты в основном радиоинтерферометрическими наблюдениями. Оценка реальной точности необходима для исследования переменностей радиоизлучения. Она может быть полезной также для выяснения причин неполного совпадения стандартов шкал потоков, сформированных по результатам наблюдений на разных радиотелескопах [2], [8]–[11].

Основные ошибки измерения спектров радиоизлучения

ППР S_p потока радиоизлучения на частоте ν определяется по измеренной радиотелескопом мощности P_s (или шумовой температуры T_s) принимаемого антенной сигнала:

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

где $A = 0.25\pi D^2 \chi$ – эффективная площадь антенны; D – диаметр рефлектора антенны; χ – коэффициент использования поверхности антенны (КИП); W – полоса пропускания РПУ; k – постоянная Больцмана. Номинальные значения параметров радиотелескопа РТ-32 в четырёх диапазонах волн [2], [12] представлены в таблице 1

Таблица 1

Номинальные значения основных параметров приемных систем радиотелескопа РТ-32 для четырёх диапазонов волн

Параметр системы	Диапазон L	Диапазон S	Диапазон C*	Диапазон X
Полоса W , МГц	340	350	900(500)	900
Средняя частота, МГц	1550	2370	5050(4850)	8630
КИП антенны χ	0,6	0,48	0,6	0,56
Эффективная площадь антенны, м ²	482,5	385,8	482,5	450,4
Шумовая температура системы T_n , К	48	50	33	39

* - в скобках указаны параметры до модернизации приемника.

При воздействии радиопомех (например, в диапазонах волн 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, $W_1 = W$.

Из (1) следует, что при одноразовом радиометрическом измерении ППР S_p наблюдаемого сигнала определяется с ошибкой

$$S_p \approx S_p + S_{cal} + S_A, \quad (2)$$

где $S_p = 2 \cdot 10^{26} P_s / AW_1$ – ошибка, определяемая погрешностью P_s измерения мощности сигнала радиометром; S_{cal} – ошибка калибровки ППР по выбранному стандарту шкалы потоков; S_A – ошибка, обусловленная отклонением ΔA эффективной площади антенны A от номинального значения при изменении угла подъёма θ . Кроме того, в диапазонах волн X и Ka, где диаграммы направленности 32-метровой антенны весьма узкие, могут быть ошибки измерения ППР из-за погрешности наведения антенны на источник. Здесь эти погрешности не рассматриваются, так как их можно свести к минимуму путём сканирования источника по двум ортогональным направлениям и измерения мощности сигнала в пике отклика радиометра. Аналогично сканируют и такие источники радиоизлучения, угловые размеры которых соизмеримы с шириной диаграммы направленности антенны [1].

Составляющие общей ошибки (2) не зависят одна от другой, но на усреднение результатов серии измерений они реагируют по-разному. Погрешность S_p определяется шумовыми флуктуациями измеренной радиометром мощности и её значения в последовательности повторяющихся измерений являются независимой случайной величиной со среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_p . При усреднении M отсчётов ППР только СКО этой составляющей общей ошибки уменьшается в \sqrt{M} раз. Погрешности S_{cal} и S_A , в отличие от шумовой погрешности S_p , определяются не зависящими от точности радиометра факторами и имеют некоторые фиксированные (не случайные) значения. Ошибки S_{cal} и S_A , появляющиеся при пересчёте измеренной радиометром мощности P_s в значение ППР, являются систематическими. При простом усреднении результатов радиометрических измерений систематические ошибки S_{cal} и S_A не устраняются. Отсчёты ППР S_p измеряемого потока радиоизлучения при наличии систематических ошибок будут взаимно коррелированными, что следует учитывать при обработке результатов наблюдений.

Суммарная систематическая ошибка $S_{cal} + S_A$ не увеличивает разброс измеренных мощностей сигнала и потому остаётся незаметной для наблюдателя, но она смещает по уровню вычисленные значения ППР. Измерить каждую из систематических ошибок с высокой точностью очень сложно, но можно оценить их влияние расчётным способом.

Ошибка калибровки S_{cal} появляется в результате сравнения мощности исследуемого сигнала P_s и мощности $P_{v,ст}$ сигнала от выбранного стандарта шкалы потоков. При калибровке по стандартному потоку, определённому с точностью 2%, относительная ошибка калибровки ППР принимаемого сигнала будет в пределах $\pm 6\%$ согласно часто применяемому в измерительной технике "правилу трёх сигма". Если используется первичный стандарт потока, определённый с точностью 1%, то диапазон возможных относительная ошибка калибровки ППР сужается до $\pm 3\%$.

Отклонения эффективной площади антенны от номинала A при изменении углов подъёма антенны θ определяют другую составляющую общей ошибки измерения ППР – систематическую ошибку S_A . Она обусловлена детерминированными (не случайными) зависимостями эффективной площади A от углов подъёма антенны θ . Систематическая ошибка S_A увеличивается при повышении частоты. В диапазонах волн X и C применяется аппроксимация зависимости $A(\theta)$ линейно-ломаными функциями, что позволяет определять эффективную площадь антенны с точностью 5% [1]. Для принятой на радиотелескопе РТ-32 аппроксимации функции $A(\theta)$ относительная систематическая ошибка S_A/S_p находится в пределах $\pm 5\%$ [1]

Точность измерения мощности принимаемого сигнала

Чувствительность и точность радиометра обычно оценивают по СКО измеренной мощности шумового сигнала

$$\sigma_{p,min} \approx b P_n \sqrt{2/\tau W} \quad (3)$$

или по СКО $\sigma_{T,min} = \sigma_{p,min} / kW$ шумовой температуры T_s . Здесь b – коэффициент, определяемый режимом работы радиометра ($b = 2,2$ для модуляционного радиометра с глубиной модуляции РПУ 10 дБ); P_n – мощность собственных шумов радиотелескопа в полосе W ; τ – время накопления сигнала [3]. Значения $\sigma_{p,min}$ и $\sigma_{T,min}$ при регистрации слабого сигнала, для которого отношение сигнал/шум $q_s = T_s/T_n \ll 1$, определяются уровнем собственных шумов радиотелескопа и практически не зависят от принимаемого сигнала. Для радиометра с полосой 900 МГц при отсутствии радиопомех $\sigma_{p,min} \approx 10^{-4} P_n$. При измерениях мощностей сигналов, уровни которых на 1–3 порядка ниже уровня шумов радиотелескопа, относительные погрешности составляют $\delta_{p,min} = 100(\sigma_{p,min}/P_s)\% = 0,1\text{--}10\%$.

Формула (3), полученная для идеальной радиометрической системы с точно известными и абсолютно стабильными параметрами, характеризует потенциальную чувствительность и точность системы. Реальную точность измерения мощности сигнала характеризует СКО $\sigma_p > \sigma_{p,min}$. СКО σ_p должно учитывать потери точности конкретной радиометрической системы в процессе измерений ППР источника, включая воздействие радиопомех.

В спектрально-селективном модуляционном радиометре с полосой приёма W методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) вычисляются в реальном времени спектры мощностей шумовых сигналов для разных полупериодов модуляции РПУ, по которым определяется приведенная мощность P_s (квадрат напряжения) исследуемого широкополосного сигнала на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [7]. Для определения абсолютного значения мощности P_s принятого антенной сигнала в спектрально-селективном радиометре, как и в традиционном радиометре с квадратичным детектором, на вход РПУ вводятся шумовые импульсы калибровки мощностью $P_{имп}$. При этом мощность сигнала $P_s = P_{имп} P_s / P_{имп}$, где $P_{имп}$ – амплитуда отклика радиометра на шумовые импульсы калибровки.

Если на радиотелескоп воздействуют узкополосные помехи от систем радиосвязи, то из широкополосного спектра принимаемого сигнала вырезаются занятые помехами частотные каналы, а вычисление ρ_s , P_s и T_s выполняются в полосе W_1 , свободной от помех. Число радиопомех и занятая ими полоса частот W_x меняются в широких пределах в зависимости от времени суток, дней недели и месяцев [4]. При расчёте СКО σ_p в первом приближении можно принять в диапазоне С используемую полосу $W_1 \approx 0,95 W$ (5% полосы приёма занято помехами), в диапазонах S и L, где помехи занимают в среднем 40% полосы, $W_1 = 0,6 W$ и в диапазонах волн X и Ka, где нет радиопомех, $W_1 = W$. В обсерватории «Светлое» в диапазонах волн S и L радиопомехи со средним уровнем мощности на 10^{+15} дБ (в 10^{+32} раз) выше спектра мощности собственного шума радиотелескопа наблюдаются в среднем одновременно в 5–20 частотных зонах. В «часы-пики» число помех может увеличиться в 1,5–3,7 раза.

Мощность P_x меняется случайным образом и достаточно быстро, что даёт основание считать её случайной величиной даже в течение одного сеанса наблюдений подобно собственным шумам радиотелескопа. Расчётное значение суммарной мощности помех $P_x \approx 32N_x P_n / N_1$, где N_1 – число частотных каналов в полосе W_1 , N_x – число частотных каналов, занятых радиопомехами. Для диапазонов S и L можно принять $N_x/N_1 = (W - W_1)/W_1 \approx 0,66$ и, соответственно, $P_x \approx 21,2 P_n$. Частотные каналы с помехами вырезаются из спектра мощности, вычисленного для всей полосы приёма W . При этом в используемую полосу W_1 проникает часть мощности помех из-за эффекта «утечки мощности» дискретного преобразования Фурье [13]. При БПФ с окном Хэмминга спектр утечки почти равномерно распределяется по полосе частот W_1 , но нигде не превышает уровень $3,98 \cdot 10^{-4} P_x$ [13]. В диапазонах волн S и L это соответствует увеличению уровня шумов радиотелескопа примерно в $1 + 3,98 \cdot 10^{-4} (P_x/P_n) \approx 1,0084$ раз. Потери точности измерений из-за утечки БПФ меньше чем 0,9%. С учётом всех указанных выше факторов можно принять для всех диапазонов волн коэффициент аппаратных потерь $\mu \approx 2\sqrt{2}$.

Реальную оценку точности измерения мощности сигнала даёт СКО

$$\sigma_p \approx b \mu P_n \sqrt{2/\tau W_1} \approx 8,8 P_n / \sqrt{\tau W_1}. \quad (4)$$

Потенциальная чувствительность и точность спектрально-селективного радиометра при отсутствии радиопомех такая же, как у традиционного радиометра с детектированием аналогового шумового сигнала [14], но аппаратные потери снижены и немного улучшена реальная точность. Здесь нет свойственных традиционному радиометру потерь, связанных с нелинейностью амплитудной характеристики и недостаточно широким динамическим диапазоном узкополосного канала радиометра и с асимметрией аналогового синхронного детектора. 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.

Влияние радиометра на точность измерения спектров радиоизлучения характеризует СКО шумовой составляющей общей ошибки одноразового измерения ППР (в янских)

$$\sigma_{SP} = \frac{\delta S}{\delta P_s} \sigma_p = \frac{2 \cdot 10^{26}}{AW_1} \sigma_p \approx \frac{17,6 \cdot 10^{26} k T_n}{A \sqrt{\tau W_1}}$$

При $\tau=1$ с и отсутствии перегрузки приемно-усилительного тракта радиопомехами спектр определяется с ошибкой $\sigma_{SP} \approx 71$ мЯн в диапазоне волн X, $\sigma_{SP} \approx 55$ мЯн при полосе 900 МГц и $\sigma_{SP} \approx 74$ мЯн при полосе 500 МГц для диапазона C, $\sigma_{SP} \approx 173$ мЯн в диапазоне S и $\sigma_{SP} \approx 134$ мЯн в диапазоне L. В диапазонах волн S и L шумовые ошибки больше чем в диапазонах волн X и C вследствие повышенного уровня собственных шумов радиотелескопа T_n и более узких полос пропускания W_1 . Шумовая составляющая относительной среднеквадратической погрешности вычисляемой СПМ потока $\delta S_p = 100(\sigma_{SP}/S_p)\%$ в диапазонах волн X и C при относительно сильных сигналах ($S_p > 5$ Ян) слабо влияет на результаты измерений ППР ($\delta S_p < 1\%$). При сравнительно слабых потоках излучения ($1 + 2$ Ян) эта погрешность достигает (4+5)%. В диапазонах волн S и L погрешность δS_p при достаточно сильных сигналах не превышает 5,5%, а при слабых сигналах возрастает до (12–15)%. Снижение углов подъёма антенны θ ведёт к дополнительному увеличению ошибки δS_p до 1,5 раз вследствие повышения уровня шумов антенны. Применяв режим работы спектрально-селективного радиометра с несимметричным накоплением сигнала и шумов при модуляции РПУ меандром [15], [16], можно снизить СКО σ_{SP} и относительную ошибку δS_p примерно в 1,4 раза. Кроме того, ошибку δS_p можно снизить в 1,4–2 раза, увеличив время накопления τ до 2+4 с. Шумовая составляющая общей ошибки измерения ППР может быть уменьшена до требуемого уровня (например, до 2%) в результате усреднения необходимого числа отсчётов ППР в серии радиометрических измерений.

Заключение

Использование спектрально-селективного радиометра позволило в сложной помеховой обстановке проводить высокоточные измерения ППР и обеспечить возможность исследования переменностей радиоизлучения источников и продолжить мониторинг шкалы потоков во всех диапазонах волн. Даже в условиях незначительного воздействия радиопомех спектрально-селективный радиометр позволил в несколько раз уменьшить разброс результатов измерений и повысить точность определения ППР. В часы сильного воздействия радиопомех использовать традиционный радиометр было невозможно, а спектрально-селективный радиометр выполнял свои функции. Радиометр обеспечил выполнение программ радиометрических измерений во всех диапазонах волн, включая диапазоны L и S, где исследования были прерваны из-за радиопомех от систем радиосвязи и управления. С использованием спектрально-селективного радиометра были уточнены шкалы потоков «искусственная луна» на эпохи 2013.5 и 2015.5 [2] и продолжаются серии радиометрических измерений с целью уточнения шкалы потоков на очередную эпоху.

Проведенный анализ точности радиотелескопа РТ-32 со спектрально-селективным радиометром хорошо согласуется с результатами измерений ППР.

Результаты измерений ППР содержат не зависящие от точности радиометра систематические ошибки, которые смещают по уровню мощности отсчёты ППР, не увеличивая их разброс. Поэтому для исследования малых переменностей радиоизлучения и для мониторинга шкал потоков необходима особо строгая организация программ радиометрических наблюдений.

Систематическая ошибка S_{cal} , связанная с калибровкой ППР сигнала по спектру выбранного стандарта шкалы потоков, зависит только от точности определения спектра мощности этого стандарта и может быть в пределах $\pm 6\%$. Систематическая ошибка S_A , связанная с отклонениями эффективной площади антенны A от номинала, определяется только точностью описания зависимости $A(\theta)$ и находится в пределах ± 5 . Наличием систематических ошибок, по-видимому, объясняется взаимное смещение спектров радиоизлучений в шкалах потоков, сформированных по результатам наблюдений на разных радиотелескопах [1], [2], [8]–[11].

Интерес представляют спектры некоторых стандартных источников шкалы потоков «искусственная луна», у которых выявлены изломы (изгибы) с изменением спектральных индексов а скачком [2]. Детально исследовать спектры потоков в областях изломов в настоящее время невозможно, так как облучатели и РПУ радиотелескопа РТ-32 имеют фиксированную настройку и в диапазоне частот 1,5–9,2 ГГц ППР измеряются только на 4 частотах (диапазоны волн L, S, C и X). Антенные облучатели радиотелескопа РТ-13 также настроены на фиксированные частоты [17]. Исследования потоков на частотах в областях перегибов спектров будут возможными после ввода в действие на радиотелескопе сверхширокополосных антенных облучателей [18] и перестраиваемых по частоте широкодиапазонных РПУ.

Чтобы уменьшить влияние систематических ошибок при анализе небольших изменений ППР потока исследуемого источника за определённый период времени (например, годовой), следует сравнивать значения ППР, измеренные при примерно одинаковых углах подъёма антенны и откалиброванные по спектру одного и того же стандарта шкалы потоков.

Литература

- Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г., Станкевич К. С., Финкельштейн А. М. Эталонирование источников с секундными угловыми размерами в качестве стандартов современной радиоастрономической шкалы потоков. Труды ИПА. 2006. Вып. 14. С. 20 – 32.
- Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А., Гренков С. А., Андреева Т. С. Спектры стандартных радиоисточников в современную эпоху // Астрономический журнал, 2018. Т. 95, № 9. С. 609 – 618.
- Есепкина А. Н., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры / под ред. Д. В. Королькова. – М.: Наука, 1973. 416 с.
- Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н. и др. Защита от помех радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» // Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н., Рахимов И. А. // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2009. – № 19. – С. 152–163
- Кратов Д. В., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбульке И. Г., Удовичий П. Ю. Помеховая обстановка на радиотелескопе РАТАН-600 и перспективные методы подавления помех // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2012. – № 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.
- Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Спектрально-селективный модуль радиометра с защитой от радиопомех // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. LVIII, № 7. С. 577–586
- Иванов В. П., Станкевич К. С. Радиоастрономическая шкала потоков // Известия вузов. Радиофизика. – 1986. – Т. 29, № 1. – С. 3 – 27.
- Vaars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A. Setting the radio astronomy flux density scale // Astronomy and Astrophysics, 1977, vol. 61, – P. 99 – 106
- Ott M., Witzel A. et al. An updated list of radio flux density calibrators / Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T. P., Standke K. J., Schalinski C. J., and Hummel C. A // Astronomy and Astrophysics. – EDP sciences, 1994. – V. 284. – P. 331 – 339.
- 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
- СВЧ-приемный комплекс РТ-32. [Электронный ресурс] URL: http://iaaras.ru/quasar/rt-32/uhf/ (дата обращения: 25.03.2021).
- Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Винно-Пресс», 2006 г. – 656 с.
- Кольцов Н. Е. Спектротрическая система регистрации космического радиоизлучения // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 2. С. 59–69
- Bremer J. C. Improvement of scanning radiometer performance by digital reference averaging // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1979. Vol.im-28, № 1. P. 46–54.
- Кольцов Н. Е. Эффективность несимметричной модуляции спектрально-селективного радиометра. // Труды ИПА РАН, 2020. Вып. (в печати)
- Иванов Д. В., Мардышкин В. В., Лавров А. С., Евстигнева А. А. Трёхдиапазонная приёмная система для радиотелескопов с малыми антеннами. // Труды ИПА РАН. – СПб.: 2013. Вып. 27. С. 197–203.
- Роев А. А., Чернов В. К. Сверхширокополосный облучатель радиотелескопа глобальной сети VGOS // Труды ИПА РАН. СПб.: 2015. Вып. 32. С. 59–64.