

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ УРАН

В статье описан способ измерения плотности потока излучения радиоисточников, применяемый в интерферометрической сети декаметрового диапазона радиоволн УРАН. Изложена методика калибровки коэффициента передачи антенн радиотелескопов сети по излучению мощных радиоисточников с использованием радиоастрономических средств. Для учета пространственного усреднения большими антеннами-решетками фазовых флуктуаций поля, вызванных влиянием ионосферы, определена экспериментальная зависимость измеряемой плотности потока от индекса мерцаний.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, плотность потока, калибровка, индекс мерцаний

1. Введение

Измерение плотности потока радиоизлучения космических источников считается первичной задачей любого радиотелескопа. Наиболее важным вопросом при этом является калибровка инструмента. Различают два основных способа определения плотности потока [1]. Первый способ заключается в сравнении мощности сигнала, принятого антенной радиотелескопа от исследуемого радиоисточника, с мощностью сигнала калибровочного шумового генератора, замещающего антенну на входе приемника. При неполяризованном сигнале, принимаемом радиотелескопом, регистрирующим одну из ортогональных поляризации, равенство этих мощностей определяет плотность потока излучения источника как $S_{\text{и}} = \frac{2P_{\text{г}}\eta_{\text{к}}}{A_{\text{з}}\eta_{\text{а}}}$, где $A_{\text{з}}$ – эффективная площадь антенны, $P_{\text{г}}$ – спектральная мощность калибровочного генератора, $\eta_{\text{к}}$ и $\eta_{\text{а}}$ – КПД антенны и цепей калибровки. Для использования этого способа необходимо определить мощность шумового генератора и осуществить абсолютную калибровку антенной системы до входа приемника. Подчеркивая последнее обстоятельство, его часто называют методом абсолютного измерения плотности потока.

Второй способ заключается в сравнении мощности сигнала $P_{\text{г}}$, принятого радиотелескопом от

исследуемого радиоисточника, с сигналом $P_{\text{з}}$ от эталонного калибровочного радиоисточника с известной плотностью потока $S_{\text{з}}$ на частоте наблюдения:

$$S_{\text{и}} = \frac{P_{\text{и}}}{P_{\text{з}}} S_{\text{з}}.$$

В этом случае отношение $P_{\text{з}}/S_{\text{з}}$ представляет собой относительный коэффициент передачи антенны и при близком расположении исследуемого и калибровочного радиоисточников или незначительном изменении параметров антенны при смене ее ориентации позволяет определить плотность потока излучения исследуемого радиоисточника. В противном случае необходимо учитывать изменение параметров антенны при переходе к эталонному источнику и/или использовать большое число калибраторов.

2. Особенности декаметрового диапазона

В декаметровом диапазоне радиоволн процедура измерения плотности потока имеет ряд особенностей, обусловленных как существенным влиянием среды распространения радиоволн, так и применяемыми антеннами. Сеть интерферометров УРАН [2], работающая на декаметровых волнах, использует в качестве антенн радиотелескопов фазированные решетки, характерис-

тики которых существенно зависят от частоты и направления фазирования. Определение параметров таких антенн – достаточно сложная процедура, затрудняющая применение первого метода. Однако использование на этих волнах метода сравнения с эталонным источником требует установления зависимости параметров антенны от направления фазирования, поскольку коэффициент передачи антенной системы в направлениях на исследуемый и калибровочный источник могут значительно отличаться. Следовательно, в этом диапазоне волн оба способа измерения плотности потока требуют определения характеристик антенны телескопа во всем диапазоне используемых частот и направлений ориентировки луча.

В наблюдениях на радиотелескопе УТР-2 [3], центральном инструменте сети УРАН, традиционно использовался абсолютный метод измерения плотности потока. Для определения характеристик антенной системы, их зависимости от частоты и направления фазирования была проведена большая серия прямых измерений η_a [4], а для определения A_3 разработана специальная электродинамическая методика [5, 6], основанная на расчете коэффициента направленного действия (КНД) решетки путем двумерного интегрирования ее диаграммы направленности, полученной с учетом отражений сигнала от подстилающей поверхности. Были разработаны также стабильные генераторы шума, и проведено их эталонирование методом охлаждаемой нагрузки.

Интерферометр, если говорить об амплитуде определяемой им функции видности, по сути, измеряет часть плотности потока излучения исследуемого радиоисточника, коррелированную на данной базе. Поэтому здесь могут быть применены оба упомянутых выше способа с некоторыми ограничениями. Для создания сигнала на выходе коррелятора калибровочные генераторы в двух пунктах интерферометра должны быть когерентны, а в случае использования калибровочного источника последний должен быть достаточно компактным, чтобы не разрешаться на данном инструменте. В интерферометрах, работающих на более коротких волнах, как правило, применяют способ измерения функции видности с использованием калибровочного источника, который менее требователен к знанию

характеристик антенных систем и к тому же позволяет определять фазу функции видности. Для сети интерферометров УРАН, как указано выше, определение характеристик антенн необходимо при любом способе измерения коррелированного потока. Проведение таких работ требует специального оборудования и соответствующей квалификации персонала телескопов. Затруднительно также проводить регулярное эталонирование калибровочных генераторов во всех пунктах сети. Поэтому в первых исследованиях угловой структуры радиоисточников в сети УРАН применялась нормированная функция видности γ_0 , определение которой было основано на одновременном измерении среднего значения мощности сигнала на выходе коррелятора интерферометра $\overline{P_{\text{кор}}}$ и полных мощностей сигналов $\overline{P_1}$ и $\overline{P_2}$, принятых от исследуемого источника каждой из антенн интерферометра [7] и измеренных радиометрами:

$$\gamma_0 = \frac{\overline{P_{\text{кор}}}}{\sqrt{\overline{P_1 P_2}}}. \quad (1)$$

Функция видности при этом определялась как коэффициент корреляции излучения радиоисточника, принятого антеннами интерферометра. В этом случае не требовалось знание параметров антенных систем, хотя и сохранялась необходимость в калибровочных генераторах, служащих для градуировки радиометров и коррелятора, однако требования к их стабильности были значительно ниже. Основным недостатком такой методики была ее чувствительность к спутыванию при измерении $\overline{P_1}$ и $\overline{P_2}$, особенно заметному в антеннах УРАН, имеющих существенно меньшие размеры, чем УТР-2, что ограничивало ее применимость небольшим количеством относительно мощных радиоисточников. Для устранения этого ограничения реальная запись мощности сигналов для антенн УРАН заменялась расчетной величиной

$$P = \frac{1}{2} \Delta\nu S_u A_3(l_0, m_0) \eta_a(l_0, m_0), \quad (2)$$

где $\Delta\nu$ – полоса частот; l_0, m_0 – направляющие косинусы ориентации антенны в направлении на источник; $A_3(l_0, m_0)$ и $\eta_a(l_0, m_0)$ – эффективная площадь и КПД антенны в этом направлении.

При этом предполагалось, что спектральная плотность потока источника S_{ν} измерена в декаметровом диапазоне без спутывания с помощью радиотелескопа УТР-2.

Такой подход позволяет проводить наблюдения потоков вплоть до значений, ограниченных флуктуационной чувствительностью интерферометра, однако снова появляется необходимость в определении параметров антенн и их зависимости от направления приема. В то же время измерения и расчеты, подобные проделанным для УТР-2, были выполнены лишь для радиотелескопа УРАН-2 – второго по величине инструмента сети [8], а для трех остальных радиотелескопов сети они не проводились. Вместо этого для определения коэффициента передачи каждой антенны УРАН использовались зависимости эффективной площади антенны и КПД от направления приема, определенные для УРАН-2. Пересчет этих зависимостей к абсолютным величинам для каждой из антенн УРАН осуществлялся с помощью их калибровки по излучению наиболее мощного эталонного радиисточника ЗС405.

Очевидно, что методика наблюдений, использовавшаяся в сети УРАН, была смешанной. В основе ее лежали определение видности как коэффициента корреляции, калибровка антенн УРАН по эталонному источнику и измерение плотности потока исследуемого объекта на УТР-2 способом сравнения с калибровочным генератором. Следует также отметить, что наблюдения радиисточников в сети УРАН проводятся в широком диапазоне часовых углов – порядка трех часов в обе стороны от меридиана. При этом проявляется влияние множителя диаграммы направленности излучателей антенной решетки на ее коэффициент передачи. Для решетки УТР-2, в которой оси вибраторов расположены вдоль линии запад–восток, такое влияние не велико. В антеннах УРАН для учета влияния дифференциального эффекта Фарадея на измерение функции видности используются турникетные вибраторы [2], повернутые на угол 45° относительно меридиана. В этом случае зависимость коэффициента передачи антенны от направления фазирования в значительной мере определяется диаграммой направленности вибратора, плохо учитываемой в приведенной выше методике расчета эффективной площади антенны A_3 .

3. Методика определения плотности потока

При модернизации оборудования сети [9] были изменены также методики проведения наблюдений и способ определения плотности потока и функции видности на инструментах УРАН. Увеличение чувствительности интерферометров за счет более чем десятикратного расширения полосы приема дало возможность получать надежные интерферометрические отклики не только в парах УТР-2–УРАН, но и между радиотелескопами УРАН, эффективная площадь которых существенно меньше, чем у УТР-2. В этом случае при определении значения функции видности в соответствии с (1) обе мощности на выходах антенн для устранения спутывания нужно определять расчетным методом по формуле (2). Отметим также, что радиотелескоп УТР-2 является синтезирующим инструментом и представляет собой интерферометр, состоящий из решеток Север–Юг (С–Ю) и Запад–Восток (З–В), и логично было и для этого мини-интерферометра использовать приемно-регистрирующее оборудование и методику, аналогичные применяемым в интерферометрах УРАН. Поэтому при разработке описанной ниже методики измерений был принят единый подход: определение полного потока излучения радиисточника на УТР-2 и его коррелированных потоков на интерферометрах УРАН методом сравнения с плотностью потока излучения калибровочного радиисточника.

Запишем напряжение сигнала, создаваемое радиисточником с потоком излучения S на единичной нагрузке, подключенной к выходу приемника радиотелескопа, как $U = \sqrt{S_{\nu} G(l_0, m_0) \Delta\nu} K/2$, где K – коэффициент передачи приемника, $G(l_0, m_0) = A_3(l_0, m_0) \eta_a(l_0, m_0)$ – коэффициент передачи антенны. Мощность сигнала на выходе коррелятора интерферометра можно записать как ковариацию его входных напряжений $P_{\text{корр}} = \overline{U_1 U_2}$, следовательно

$$P_{\text{корр}} = \gamma_0 \Delta\nu S_{\nu} \sqrt{G_1(l_0, m_0) G_2(l_0, m_0) K_1 K_2}, \quad (3)$$

где γ_0 – коэффициент корреляции входных напряжений, т. е. нормированное значение функции видности.

Отсюда для любой пары антенн сети может быть определена коррелированная часть полного потока источника, или функция видности:

$$\gamma_0 S_{\text{и}} = \frac{P_{\text{кор}}}{\Delta\nu \sqrt{G_1(l_0, m_0) G_2(l_0, m_0) K_1 K_2}}. \quad (4)$$

Если эта пара – решетки С–Ю и З–В УТР-2, то при наблюдении компактных радиоисточников, исследуемых с помощью УРАН, $\gamma_0 = 1$ и формула (4) определяет полную плотность потока излучения источника. Очевидно, что для измерения потока необходимо определить коэффициенты усиления приемников, коэффициенты передачи антенн в направлении на источник и измерить мощность сигнала на выходе коррелятора. Подход к определению этих величин в процессе наблюдений и калибровки и обуславливает способ измерения плотности потока. Рассмотрим, как эти задачи решаются в модернизированной интерферометрической сети УРАН.

4. Калибровка антенн интерферометра

Для определения коэффициента передачи антенны $G(l, m)$ отобрано пять источников космического радиоизлучения (см. табл. 1), достаточно мощных для минимизации эффекта спутывания. Их спектры на декаметровых волнах измерены ранее в наблюдениях на УТР-2. Склонения этих опорных источников таковы, что их треки, полученные за счет вращения Земли, достаточно равномерно покрывают небесную полусферу. Измеряя в достаточно широком диапазоне часовых углов мощность сигнала, принятого радиотелескопом от этих радиоисточников, можно построить сетку опорных значений коэффициентов передачи антенны и определить по ним поверхность, аппроксимирующую зависимость коэффициента передачи антенны от направления.

Радиотелескопы, используемые в сети УРАН, содержат антенны различных видов. Решетки

УТР-2 с асинхронным фазированием, вытянутые вдоль направлений С–Ю и З–В, состоят из линейных вибраторов, оси которых ориентированы вдоль параллели. Поскольку эти решетки существенно различаются по размерам и ориентации, наблюдения опорных источников были проведены отдельно для каждой из них. В антеннах радиотелескопов УРАН использованы скрещенные турникетные вибраторы, образующие решетки для приема сигналов двух ортогональных поляризаций. Эти антенны расположены вдоль параллели и сходны по конструкции: имеют синхронное фазирование, схема которого для субрешетки из 128 элементов, входящей в состав каждой из антенн, идентична. Для определения зависимости $G(l, m)$ этих антенн используется радиотелескоп УРАН-2, обладающий наибольшим КНД. При этом предполагается, что форма этой зависимости для всех телескопов УРАН одинакова и отличается лишь абсолютной величиной, пропорциональной эффективной площади.

Наблюдения опорных источников проводились в режиме корреляционного радиометра, что устраняло влияние галактического фона, весьма существенное на декаметровых волнах. При этом антенная решетка телескопа делилась на две равные части с коэффициентами передачи G_1 и G_2 и использовался приемно-регистрирующий аппаратный комплекс [9], применяемый в интерферометрических наблюдениях. С его помощью регистрировались сигналы на выходах половин антенны, которые затем перемножались в программном корреляторе УРАН. Наблюдение каждого источника проводилось сеансами продолжительностью до восьми часов (± 4 ч относительно меридиана), состоящими из отдельных сканов, длительность которых согласована с шириной диаграммы направленности антенны. В результате наблюдений и последующей обработки для каждого из опорных источников определялась зависимость принятой мощности от часового угла $P_n(T)$ (здесь и далее индекс n означает номер опорного источника). Аналогично (3), учитывая что $\gamma_0 = 1$, можно записать $P_n(T) = 0.5 \Delta\nu S_n G_n(T) \sqrt{K_1 K_2}$, где $G_n(T) = 2\sqrt{G_1(T)G_2(T)}$ – суммарный коэффициент передачи антенны. Для учета изменения коэффициентов усиления приемников каждый сеанс наблюдений сопровождался регистрацией на выходе

Таблица 1. Координаты и потоки излучения опорных радиоисточников

Источник	Прямое восхождение (J2000.0)	Склонение (J2000.0)	Плотность потока, Ян	
			20 МГц	25 МГц
3С123	4 ч 37 мин 4 с	29°40′	1000	970
3С144	5 ч 31 мин 30 с	21°58′	3020	3030
3С274	12 ч 28 мин 17 с	12°40′	6000	5000
3С405	19 ч 57 мин 45 с	40°36′	29000	29500
3С461	23 ч 21 мин 10 с	58°33′	39500	37500

каждого канала сигнала $H = K\Delta\nu P_r/2$, создаваемого калибровочным шумовым генератором, подключаемым к входам приемников. Это позволяло получать калиброванные значения принятой мощности, не зависящие от изменений коэффициентов передачи приемников,

$$M_n(T) = P_n(T) / \sqrt{H_1 H_2} = G_n(T) S_n / P_r. \quad (5)$$

Результаты наблюдений одного из опорных радиисточников на радиотелескопе УРАН-2 на частоте 25 МГц показаны на рис. 1. Экспериментальные точки, полученные за семь дней наблюдений, отображают зависимость $M_n(T)$ для решетки одной из линейных поляризаций антенны. Следует отметить несимметричность этой зависимости относительно точки пересечения меридиана ($T = 0$), которая определяется влиянием диаграммы направленности излучателя решетки, повернутого на 45° по отношению к направлению меридиана. Аналогичная зависимость для решетки с ортогональной поляризацией зеркально отображается относительно оси $T = 0$.

Сплошной кривой на рисунке показана интерполяция экспериментальных данных полиномом четвертой степени. Такие усредненные зависимости $\overline{M}_n(T)$ были получены для каждого из опорных радиисточников и их квантованные с интервалом в 20 мин отсчеты преобразованы к координатам l, m . С учетом стабильности калибровочного генератора нормировка на плотность потока излучения соответствующего источника позволила привести эти зависимости к одному масштабу и определить семейство се-

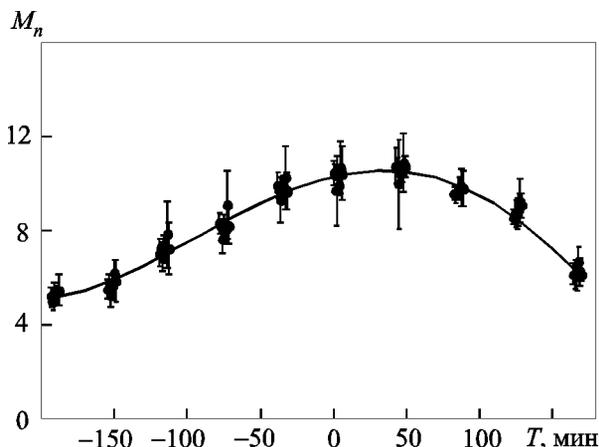


Рис. 1. Зависимость $M_n(T)$ для источника 3C405, полученная на радиотелескопе УРАН-2 на частоте 25 МГц

чений коэффициента передачи антенны $G_n(l, m) = P_r M_n(l, m) / S_n$. При этом за счет симметрии $G(l, m) = G(-l, -m)$, присущей горизонтальным антеннам, заполнение плоскости (l, m) было улучшено — каждая экспериментальная точка зависимостей $G_n(l, m)$ учитывалась дважды. Дальнейшей задачей было определение по этим экспериментальным точкам интерполированной зависимости $G(l, m)$, нормированной на значение в зенитном направлении $G_n(0, 0)$. Для этого использовалась двумерная кубическая сплайн интерполяция [10], с помощью которой формировалась аппроксимирующая поверхность G_A , заданная на $N \times N$ узловых точках. Далее, численно решалась задача минимизации ошибок вписывания аппроксимирующей поверхности в набор экспериментальных отсчетов $G_n(l, m)$, т. е. изменением значения G_A в узловых точках минимизировалась среднеквадратичная сумма разностей экспериментальных данных $G_n(l, m)$ и значений $G_A(l, m)$, полученных интерполяцией к тем же точкам. Найденная аппроксимирующая поверхность нормировалась к зенитному направлению.

На рис. 2 показаны изофоты поверхности $G_A(l, m)$, полученные на частоте 25 МГц описанным выше способом, для радиотелескопа УТР-2 и одной из линейных поляризаций УРАН-2. Для УТР-2 здесь приведена зависимость в случае “полного” телескопа, $G_A(l, m) = \sqrt{G_{C-Ю} G_{З-В}}$.

Нормированные зависимости $G_A(l, m)$ позволяют учесть изменение коэффициента передачи антенны при слежении за источником. Однако при вычислении плотности потока по формуле (4) необходимо знать абсолютное значение коэффициента передачи каждой антенны интерферометра. Для этого на УТР-2 и на всех радиотелескопах УРАН проводятся наблюдения мощного эталонного калибровочного радиисточника с известной плотностью потока S_3 . Таким калибратором в широком диапазоне частот служит радиогалактика Лебедь А (3C405). Наблюдения и обработка проводятся по приведенной выше методике в режиме корреляционного радиометра, а их результатом являются данные, подобные показанным на рис. 1. После получения усредненных аппроксимирующих зависимостей $\overline{M}_3(T)$, представляющих собой отношения мощностей сигналов источника и калибровки (5), для каждой антенны из этих зависимостей определяется зна-

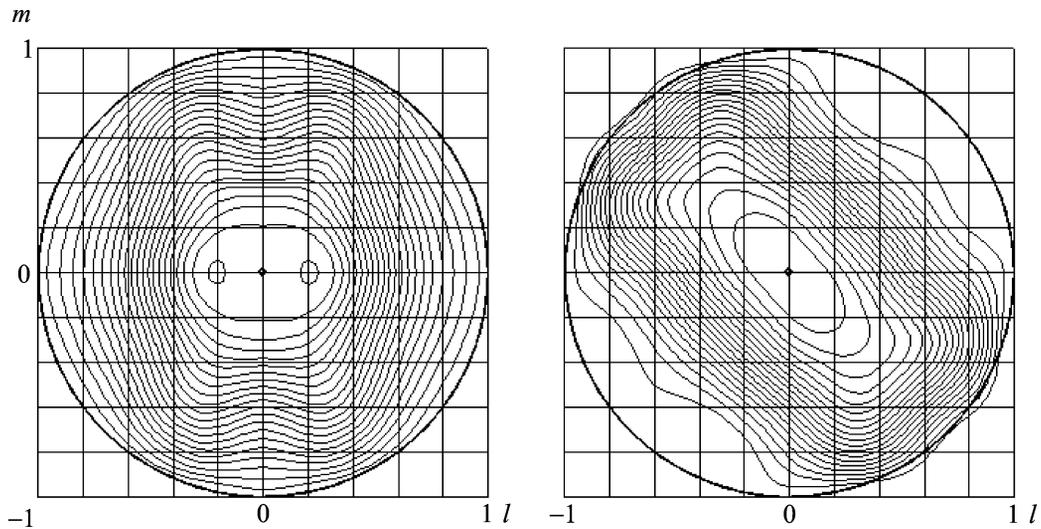


Рис. 2. Нормированная зависимость коэффициента передачи антенны УТР-2 (слева) и УРАН-2 (справа) от направления фазирования: интервал между изофотами 0.05, жирная окружность – граница видимой области $l^2 + m^2 = 1$

чение M_0 при $T = 0$, и вычисляется значение коэффициента передачи данной антенны в направлении пересечения источником местного меридиана

$$G_s = M_0 P_T / S_s.$$

При наличии на радиотелескопе эталонированного калибровочного генератора эта величина представляет собой значение коэффициента передачи антенны в данном направлении. Она может быть использована для привязки нормированных зависимости $G_A(l, m)$ каждой из антенн сети УРАН к абсолютной шкале, что позволит определить $G(l_0, m_0)$ в выражении (4).

Полученные зависимости $M_s(T)$ позволили также проверить справедливость предположения о том, что форма поверхности $G_A(l, m)$ для всех радиотелескопов УРАН одинакова, и подтвердить правомерность использования определенных на УРАН-2 зависимостей для остальных решеток с подобной конструкцией. На рис. 3 различными линиями показаны кривые $M_s(T)$, полученные на радиотелескопах УРАН-1, УРАН-3 и УРАН-4, в сравнении с зависимостью для УРАН-2, которая отображена точками с доверительными интервалами. Так как эффективные площади антенн телескопов существенно отличаются и в наблюдениях использованы различные калибровочные генераторы, данные мас-

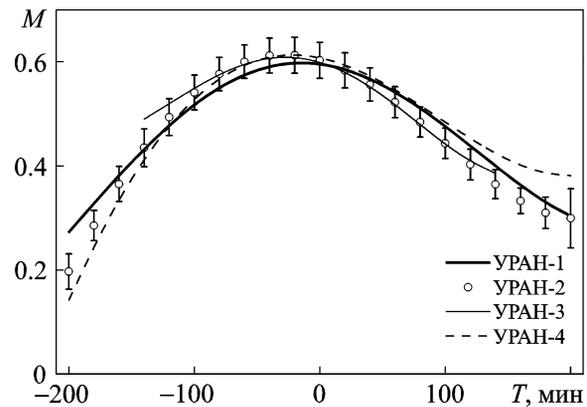


Рис. 3. Сравнение зависимостей коэффициента передачи антенны от часового угла при наблюдении источника 3С405 на радиотелескопах УРАН на частоте 25 МГц

штабированы таким образом, чтобы кривые совместились в точке $T = 0$. Очевидно, что в пределах ошибок эти зависимости совпадают.

Следует отметить, что описанные выше калибровочные наблюдения для определения зависимости $G_A(l, m)$ также достаточно трудоемки, однако проводятся с помощью тех же оборудования, программного обеспечения и методик, которые используются в интерферометрических наблюдениях в сети УРАН. Такие измерения и расчеты были осуществлены на УТР-2 и УРАН-2 лишь один раз. Наблюдения калибровочного источника 3С405 для измерения M_0 проводятся в каждом пункте УРАН один раз в год.

5. Калибровка приемников и определение плотности потока в наблюдениях

При наблюдении исследуемого радиоисточника на интерферометрах сети для каждого скана определены направляющие косинусы луча каждой антенны l_0, m_0 , для которых можно вычислить $G_A(l_0, m_0)$. Значение $G_A(l_3, m_3)$ определяет нормированный коэффициент передачи соответствующей антенны для направления, в котором по наблюдениям эталонного источника найдена величина G_3 . Из отношения этих величин, $A = G_A(l_0, m_0)/G_A(l_3, m_3)$, и выражения (5) можно определить калиброванное значение коэффициентов передачи антенн в направлении на исследуемый источник $G_{и} = AM_0P_r/S_3$. Наблюдение источника сопровождается регистрацией на выходе приемников мощности сигнала H , созданного теми же калибровочными генераторами, которые использовались при наблюдениях эталонного источника. Это позволяет получить коэффициенты передачи приемников в момент наблюдений $K = H/P_r \Delta v$ и, подставив эти величины в (4), определить значение функции видности для источника в данном скане

$$\gamma_0 S_{и} = \frac{S_3 P_{кор}}{\sqrt{A_1 M_{01} A_2 M_{02} H_1 H_2}}. \quad (6)$$

В этом выражении мощность сигнала от источника на выходе коррелятора $P_{кор}$ и мощности калибровочных сигналов H определяются непосредственно в наблюдениях, а величины A и M_0 найдены при калибровке антенн. Хотя на различных этапах наблюдений используются калибровочные генераторы, их эталонирование не требуется. Необходимо лишь, чтобы мощность генерируемых ими сигналов оставалась неизменной между наблюдениями эталонного и исследуемого радиоисточников. В этом случае их мощность P_r не входит в выражение (6). В формулу не входят также абсолютные величины коэффициентов передачи антенн, а безразмерные величины M_0 и A предназначены для учета различия размеров антенн и изменения их свойств со сменной ориентации луча. Следовательно, хотя в данной методике и используются калибровки аппаратуры и антенн, тем не менее она полностью

соответствует способу определения плотности потока посредством сравнения с калибровочным источником. Напомним, что (6) определяет как функцию видности для любой интерферометрической пары сети УРАН, так и плотность потока излучения источника, если интерферометр образуют решетки С–Ю и З–В радиотелескопа УТР-2, поскольку в этом случае для исследуемых в сети УРАН компактных радиоисточников $\gamma_0 = 1$. Очевидно, что эквивалентная (1) нормированная функция видности γ_0 может быть найдена как отношение коррелированной плотности потока для данного интерферометра к полному потоку, измеренному с помощью УТР-2. Поскольку обе величины определяются в соответствии с (6), общая для обоих выражений величина S_3 сокращается, и ошибка измерения потока излучения эталонного источника не влияет на точность определения γ_0 .

6. Учет влияния ионосферы

Другая особенность определения потоков на декаметровых волнах связана с эффектами распространения радиоволн в плазме, которые существенно затрудняют проводимые наблюдения на низких частотах, влияют на методику наблюдений и обработки. Наиболее существенным фактором, влияющим на определение потока излучения источника, является ионосфера Земли. Случайные вариации электронной концентрации в плазме, изменяющие показатель преломления среды относительно его среднего значения, искажают волновой фронт проходящей электромагнитной волны, что приводит к формированию на земной поверхности интерференционной картины – к фазовым и амплитудным флуктуациям поля. Интерференционная картина флуктуаций, возникающая на поверхности земли, перемещается из-за взаимного движения луча зрения и неоднородностей, что приводит к временным флуктуациям принятого сигнала, которые называют мерцаниями. Обычно их характеризуют индексом мерцаний, определяемым как нормированная дисперсия флуктуаций потока:

$$m^2 = \frac{\overline{(S^2)} - (\overline{S})^2}{(\overline{S})^2}.$$

Как известно, в режиме слабых мерцаний характерный масштаб дифракционной картины флуктуаций на поверхности Земли определяется масштабом первой зоны Френеля на рассеивающем слое ионосферы $\sqrt{\lambda Z/2\pi}$ [11]. Если принять расстояние до слоя $Z = 350$ км (область F ионосферы), то на частоте 25 МГц ($\lambda = 12$ м) характерный размер пространственных флуктуаций составит ≈ 800 м. Временной масштаб флуктуаций принятого излучения определяется этим размером и скоростью движения ионосферных неоднородностей и в декаметровом диапазоне составляет $10 \div 30$ с.

Если размеры антенны существенно меньше характерного размера дифракционной картины флуктуаций на поверхности земли, то радиотелескоп оказывается чувствительным только к амплитудным изменениям поля, что справедливо для антенн радиотелескопов УРАН. Чтобы получить правильное значение потока излучения источника при усреднении этих флуктуаций, нужно наблюдать его достаточно длительное время. Поскольку в радиотелескопах сети применено дискретное управление диаграммой направленности, для корректной оценки плотности потока в каждом скане период переключений положения диаграммы (длина скана) должен быть много больше характерного времени амплитудных флуктуаций.

Однако размеры антенн-решеток УТР-2 сравнимы с пространственным масштабом дифракционной картины мерцаний на поверхности земли. В этом случае фазовые флуктуации поля обуславливают несинфазное суммирование сигналов, принятых различными частями антенны. Это явление приводит к уменьшению измеренного потока, и оно тем больше, чем сильнее выражена турбулентность ионосферы, характеризуемая индексом мерцаний. Этот эффект иллюстрируется приведенной на рис. 4 экспериментальной зависимостью плотности потока излучения квазара 3С47 от индекса мерцаний, полученной при наблюдениях на УТР-2 на частоте 20 МГц. Значения плотности потока и погрешности их определения, полученные в отдельных семиминутных сканах, показаны за несколько дней наблюдений, проведенных при разной степени турбулентности ионосферы.

На рисунке видно, что измеренный поток уменьшается при увеличении индекса мерцаний,

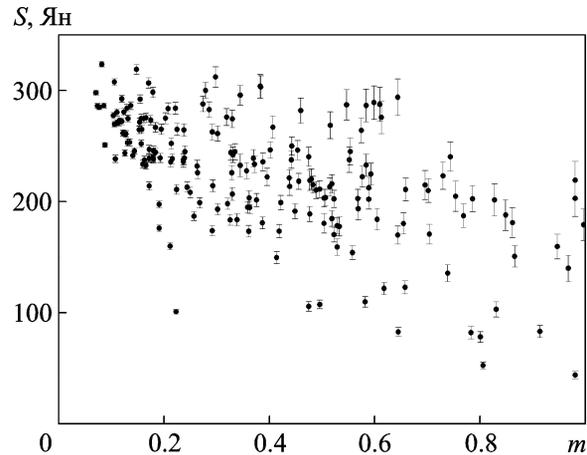


Рис. 4. Зависимость плотности потока от индекса мерцаний для источника 3С47 на частоте 20 МГц

и для правильного определения плотности потока необходимо корректировать измеренные значения. Для нахождения корректирующей зависимости можно воспользоваться базой данных наблюдений на УРАН, поскольку для каждого из исследуемых радиоисточников с помощью УТР-2 определялась не только плотность потока, но и индекс мерцаний в каждом скане. Эта база содержит около 100 радиоисточников, для каждого из которых имеется не менее 200 экспериментальных точек-сканов. Большое количество данных, полученных за несколько лет наблюдений, позволяет определить устойчивую статистическую зависимость даже при большом разбросе значений, вызванном влиянием помех и погрешностей в отдельных наблюдениях.

Поскольку потоки излучения источников существенно различаются, их необходимо привести к одному масштабу. Анализ данных, подобных приведенным на рис. 4, показал, что значения плотностей потоков, определенные при индексах мерцаний $m < 0.25$, не подвержены влиянию рассматриваемых искажений. Соответственно, измеренные значения для каждого из наблюдавшихся источников были нормированы на его плотность потока, полученную усреднением данных в интервале значений индекса мерцаний от 0 до 0.2. На рис. 5. показаны эти значения для всех источников, наблюдавшихся в период с 2008 по 2012 г. Они включают около 20000 индивидуальных сканов, для каждого из которых получена оценка потока и определен индекс мерцаний, характеризующий состояние ионосферы.

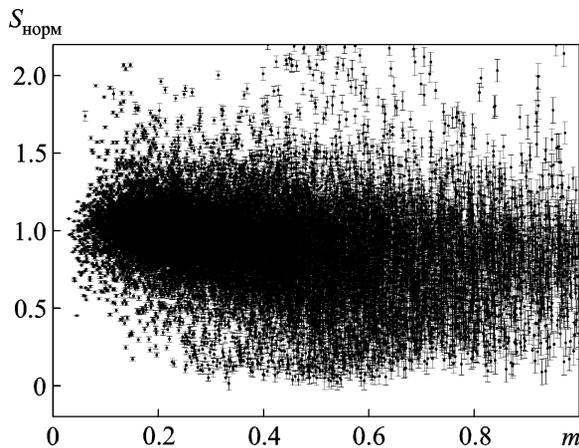


Рис. 5. Суммарная зависимость нормированного потока от индекса мерцаний

Для нахождения усредненной зависимости измеренной плотности потока от условий наблюдения вся совокупность данных была разбита на группы, лежащие в интервалах изменения m шириной 0.05, и в каждой из них было определено среднее значение нормированного потока и его ошибка. Эта зависимость и ее интерполяция кубическим полиномом, полученная методом наименьших средних квадратов, показана на рис. 6.

Из полученной зависимости видно что, поток в интервале значений индекса мерцаний $0.10 \div 0.25$ практически не изменяется с увеличением индекса мерцаний, что подтверждает правильность выбранного интервала при определении нормирующих потоков. Эта зависимость используется для коррекции измерений плотности потока

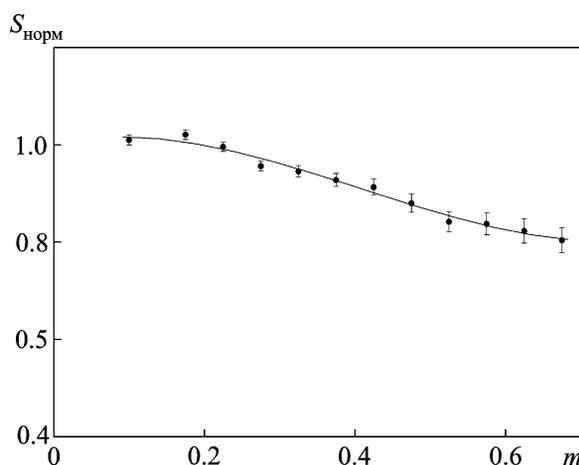


Рис. 6. Усредненная зависимость измеренного потока излучения источника от индекса мерцаний для радиотелескопа УТР-2

излучения исследуемого радиисточника, осуществленных с помощью радиотелескопа УТР-2, а также учитывается при определении функции видности, когда одна из антенн интерферометрической пары является решеткой С-Ю этого радиотелескопа.

7. Заключение

Для обновленной сети интерферометров УРАН разработан метод измерения плотности потока излучения и функции видности исследуемых радиисточников. В отличие от ранее применявшегося комбинированного способа в новом методе принят единый подход: определение полного потока излучения радиисточника на УТР-2 и его коррелированного потока на интерферометре посредством сравнения с плотностью потока излучения калибровочного радиисточника. При этом в отличие от методики, использующейся на более коротких волнах, в предложенном методе эталонный источник не должен быть неразрешенным и сопровождать наблюдения исследуемого объекта. Он используется только для калибровки коэффициента передачи антенн интерферометров.

В новом методе учитывается зависимость коэффициентов передачи антенн радиотелескопов от направления фазирования, которая весьма существенна для используемых в декаметровом диапазоне антенн-решеток с электрическим управлением лучом. Для ее определения использованы радиоастрономические методы, позволившие по наблюдениям ряда опорных радиисточников установить двумерные зависимости коэффициентов передачи от направления для антенн УРАН и УТР-2.

Для учета влияния фазовых флуктуаций поля, вызванных ионосферными мерцаниями, на плотность потока, измеряемого большими антеннами, проведена обработка данных, полученных в наблюдениях на УТР-2. Определена статистическая зависимость измеряемой плотности потока от индекса мерцаний, которая используется для корректировки измеренных значений потока. Описанные в статье методики измерений и обработки менее подвержены эффекту спутывания, чем применявшиеся ранее, и дают возможность более точно определять плотности потоков излучения и функции видности исследуемых радиисточников в условиях декаметрового диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкий В. С., Цейтлин Н. М. Радиоастрономические методы абсолютных измерений интенсивности сигналов, калибровки антенн и радиотелескопов на сантиметровых волнах (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1961. – Т. 4, № 3. – С. 393–414.
2. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Булацен В. Г., Браженко А. И., Кошевой В. В., Романчев Ю. В., Цесевич В. П., Галанин В. В. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. I). Основные принципы. Обзор // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 4. – С. 385–401.
3. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–15.
4. Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К., Брук Ю. М., Мельяновский П. А., Инютин Г. А., Гончаров Н. Ю. Принципы построения и характеристики радиотелескопа УТР-2 // Антенны. – М.: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 15–57.
5. Содин Л. Г. Параметры антенн, размещенных над полупроводящей поверхностью раздела // Изв. вузов. Радиофизика. – 1968. – Т. 11, № 1. – С. 101–109.
6. Содин Л. Г. Экспериментальные характеристики антенн, расположенных вблизи границы раздела // Антенны. – М.: Связь. – 1974. – Вып. 20. – С. 74–84.
7. Бовкун В. П., Мень А. В. Интерферометрические наблюдения на декаметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. – 1983. – Т. 26, № 7. – С. 1357–1370.
8. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В., Булацен В. Г., Браженко А. И., Ващишин Р. В. Радиотелескоп декаметрового диапазона длин волн УРАН-2 // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 345–357.
9. Рашковский С. Л., Белов А. С., Иванов А. С., Лозинский А. Б., Шепелев В. А. Новый аппаратно-программный комплекс УРАН // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 207–217.
10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
11. Гочелашвили К. С., Шишов В. И. Волны в случайно-неоднородных средах // Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1981. – Т. 1. – 144 с.

С. Л. Рашковський¹, В. О. Шепелев¹, Г. А. Інютин¹, Р. В. Ващишин²

¹Радиоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36029, Україна

ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ РАДІОДЖЕРЕЛ У ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ УРАН

У роботі описано спосіб вимірювання густини потоку випромінювання радіоджерел, що застосовується у інтерферометричній мережі декаметрового діапазону радіохвиль УРАН. Викладено методику калібрування коефіцієнту передачі антен радіотелескопів мережі за випромінюванням потужних радіоджерел з використанням радіоастрономічних засобів. Для урахування просторового усереднення великими антенами-решітками фазових флуктуацій поля, зумовлених впливом іоносфери, визначено експериментальну залежність вимірюваної густини потоку від індексу мерехтін.

S. L. Rashkovskiy¹, V. A. Shepelev¹, G. A. Inyutin¹, and R. V. Vashchishin²

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²Poltava Gravimetric Observatory, S. Subotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36029, Ukraine

MEASUREMENTS OF RADIO SOURCE FLUX DENSITY WITH THE INTERFEROMETER NETWORK UРАН

A method of measurements of radio source flux density used with the decameter wavelength interferometer network UРАН. The procedure of antenna gain calibration of radio telescopes by using the emission of powerful radio sources and radio astronomy technique is suggested. An experimental dependence of the measured flux on scintillation index is used to account for spatial averaging by large arrays of phase fluctuations of the field which are caused by the influence of the ionosphere.

Статья поступила в редакцию 15.08.2013