

УДК 520.272.4

ШУМ ВИДА $1/f$ В РАДИОМЕТРЕ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ

© 2014 П. Г. Цыбулёв^{1*}, М. В. Дугин², А. Б. Берлин¹,
Н. А. Нижельский¹, Д. В. Кратов¹, Р. Ю. Удовицкий¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²НПФ «Микран», Томск, 634045 Россия

Поступила в редакцию 21 ноября 2013 года; принята в печать 19 февраля 2014 года

Представлены экспериментальные результаты по исследованию источников шума вида $1/f^\alpha$ (далее для краткости $1/f$) в радиометре полной мощности. Найдено, что основных источников данного шума в радиометре два: СВЧ усилители и квадратичный детектор на диоде с барьером Шоттки. Показаны пути значительного снижения шума $1/f$, позволяющие проводить измерения радиометром полной мощности с расчетной чувствительностью на масштабах времени до 10 секунд. На масштабах до 100 секунд чувствительность радиометра полной мощности остается выше, чем модуляционного.

Ключевые слова: *аппаратура: детекторы—радиоконтинуум*

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная цель данной работы — изучение составляющих шума вида $1/f$ в современном радиометре полной мощности.

Как известно [1, 2], основным источником шума вида $1/f$ в радиометре полной мощности являются флуктуации коэффициента усиления. Для их устранения R. Dicke в 1946 г. предложил схему модуляционного способа приема для проведения радиоастрономических наблюдений. На сегодняшний день элементная база радиометров полностью изменилась. Одна из целей данной работы — выяснить, изменился ли шум вида $1/f$ в современном радиометре полной мощности.

На РАТАН-600 введена в работу новая система регистрации данных для наблюдений в континууме [3]. Отличительной ее особенностью, важной для исследований шума вида $1/f$, является тот факт, что новая измерительная система (ИС) не вносит шума данного вида в результат измерений (точнее, этим шумом от измерительной системы можно пренебречь). Тогда измеренный шум вида $1/f$ полностью относится к самому радиометру (от его входа до квадратичного детектора включительно).

Новая система регистрации данных, описанная в работе [3], включает в себя предварительный усилитель низкой частоты (ПУНЧ, Preamplifier), установленный сразу после квадратичного детектора,

активный фильтр нижних частот (ФНЧ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В ПУНЧ и ФНЧ применены операционные усилители только одного типа: с предельно низкими шумами и с автокоррекцией нуля (auto-zero amplifier).

С помощью данной измерительной системы нами проведен лабораторный эксперимент, в результате которого обнаружено, что применение детектора на туннельном (обращенном) диоде приводит к резкому снижению шума вида $1/f$ по сравнению с применением детектора на диоде Шоттки.

2. СХЕМА ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

В лаборатории эксперимент проводился по схеме, показанной на рис. 1а, на трех разных неохлаждаемых радиометрах РАТАН-600, построенных по схеме «приемника прямого усиления» с усилителями модельного ряда MALN (НПФ «Микран», г. Томск, Россия):

- (1) центральная частота $f_0 = 11.2$ ГГц, ширина СВЧ-полосы $B = 1.15$ ГГц, эквивалентная шумовая температура приемника $T_r \approx 55$ К, усилители — два модуля MALN-109117;
- (2) $f_0 = 8.2$ ГГц, $B = 1.0$ ГГц, $T_r \approx 84$ К, усилители MALN-079087-12 и MALN-079084-4;
- (3) $f_0 = 4.8$ ГГц, $B = 0.8$ ГГц, $T_r \approx 50$ К, усилители — два модуля MALN-4450-11.

*E-mail: peter@sao.ru

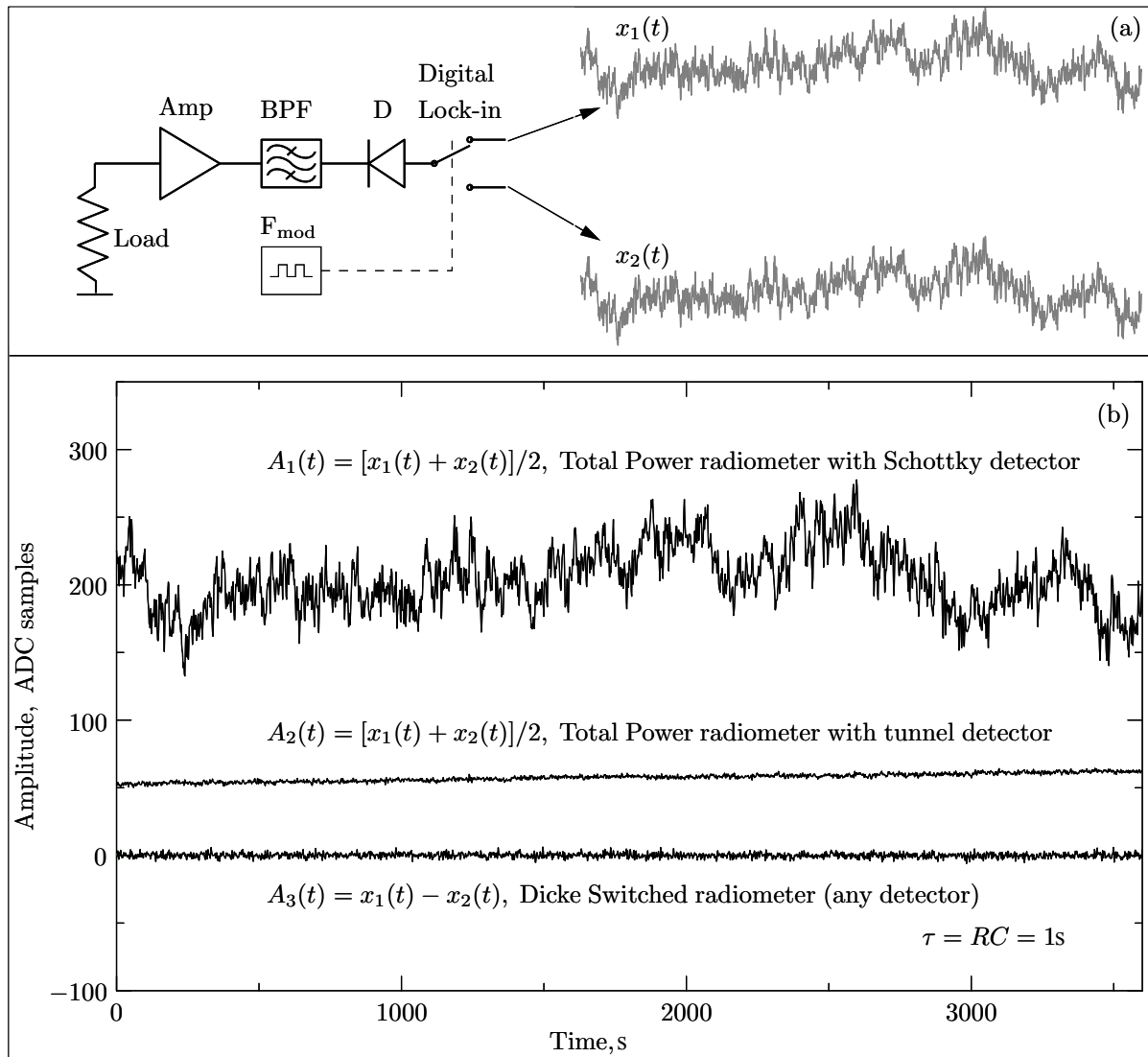


Рис. 1. Схема и результаты лабораторного эксперимента: (а) схема радиометра и сигналы, получаемые на выходе путем разделения времени измерений в цифровом синхронном детекторе (алгоритм RDL); (б) сравнение записей на выходе радиометра полной мощности с детектором Шоттки (кривая $A_1(t)$) и с туннельным детектором (кривая $A_2(t)$). Оба радиометра (с разными детекторами) в модуляционном режиме показывают сигнал, как на кривой $A_3(t)$.

В качестве детектора с диодом Шоттки взят широкополосный детектор КДК-26 (0.01–26.5 ГГц, ФГУП ННИПИ «Кварц», Нижний Новгород, Россия). Туннельные детекторы на основе обращенного туннельного диода MBD-1057-E28 (Aeroflex/Metelics) были изготовлены нами на РАТАН-600. Также применены коммерчески доступные туннельные детекторы АСТР-1625 (Aeroflex/Metelics).

Далее приводятся результаты лабораторных измерений и наблюдений радиисточников для радиометра 2.7 см ($f_0 = 11.2$ ГГц). Качественно результаты для других двух радиометров аналогичны.

Алгоритм RDL (Radiometric Digital Lock-In), детально описанный в [3], позволяет записывать

раздельно сигналы полупериодов модуляции модуляционного радиометра. Из этих сигналов в пост-обработке данных можно построить сигналы как модуляционного радиометра (вычитанием сигналов отдельных полупериодов), так и радиометра полной мощности (полусумма сигналов отдельных полупериодов). Это позволяет сравнивать работу одного и того же радиометра в двух различных режимах: в модуляционном режиме работы (Dicke switched) и в режиме радиометра полной мощности. При наличии существенного шума вида $1/f$ радиометр в режиме полной мощности будет давать всегда худший результат (больше шума), чем модуляционный радиометр.

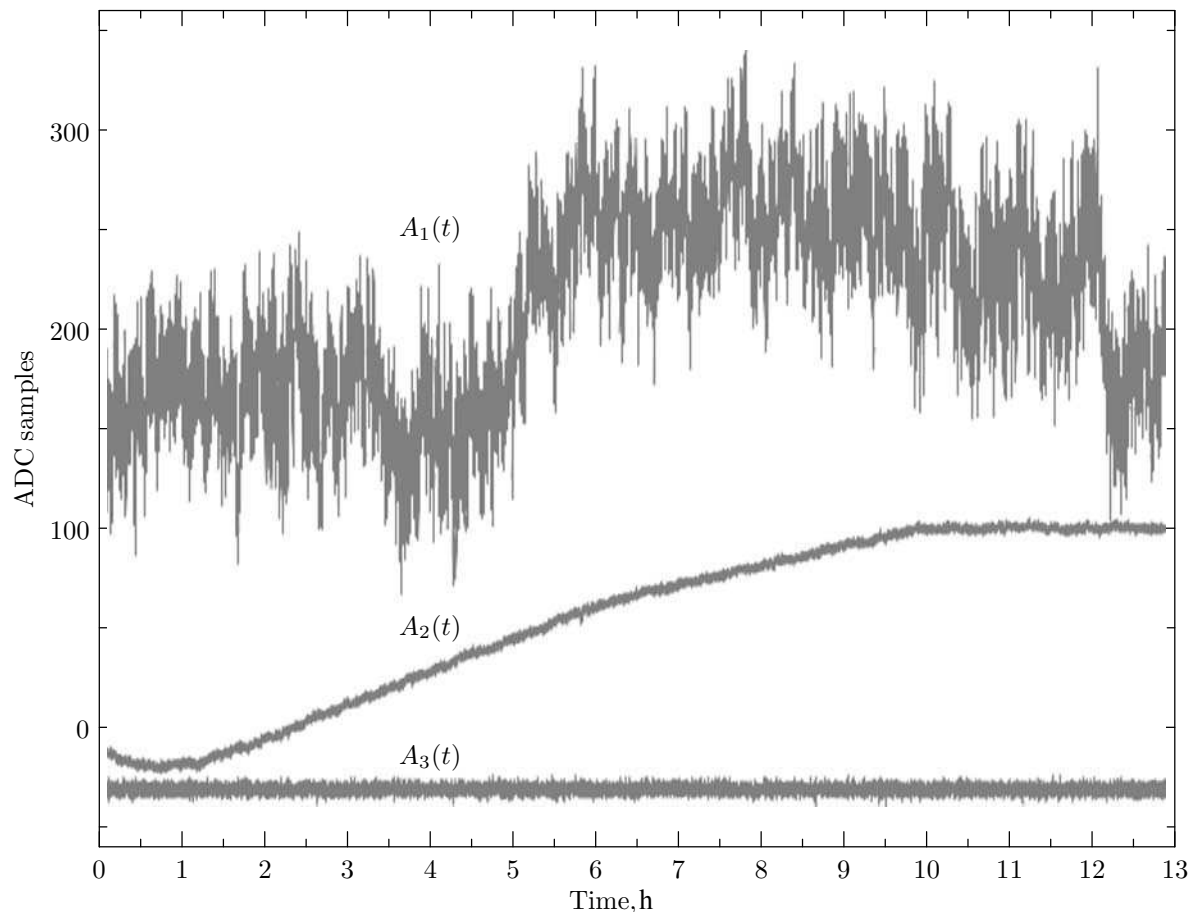


Рис. 2. Сигналы, полученные в лабораторном эксперименте (рис. 1б) на всем протяжении измерений (13 часов). Обозначения сигналов здесь те же, что и на рис. 1б.

Результат сравнительного эксперимента показан на рис. 1б. Здесь кривая $A_1(t)$ — это сигнал радиометра полной мощности с детектором на основе диода Шоттки, $A_2(t)$ — тот же радиометр, но с детектором на основе туннельного обращенного диода. Кривая $A_3(t)$ соответствует шуму обоих вариантов радиометров (с разными детекторами) в модуляционном режиме работы. Кривые, соответствующие радиометрам полной мощности, сдвинуты по оси Y вниз (удалена большая постоянная составляющая) для сравнения с модуляционным радиометром. Масштаб по оси Y на рис. 1б одинаков для всех кривых. Это означает, что при наличии радиисточника или калибровочного сигнала отклик на них будет одинаковым во всех трех вариантах радиометров.

Из рис. 1б видно, что сигнал радиометра полной мощности с туннельным детектором имеет наименьшее среднеквадратичное отклонение (СКО) среди трех вариантов радиометров. Этот эксперимент длительностью в 1 час является частью более продолжительного эксперимента (около 13 часов), показанного на рис. 2. Обозначение сигнала

на этом рисунке такое же, как и на предыдущем. Низкочастотная (НЧ) полоса сигналов на рис. 1 и 2 одинакова и равна 0.25 Гц, что соответствует $\tau = RC = 1$ с. Радиометр находился при комнатной температуре, которая медленно менялась в течение эксперимента, отсюда — медленные дрейфы сигналов $A_1(t)$ и $A_2(t)$ (дрейфы усиления).

Сигналы, показанные на рис. 2, позволяют построить оценки спектральных плотностей мощности (СПМ), рис. 3. Здесь нижние индексы в обозначениях СПМ (1, 2, 3) соответствуют нижним индексам рис. 1 и 2б. Сглаженные оценки СПМ построены путем осреднения квадратов Фурье-преобразований по 800-секундным интервалам исходных записей, то есть осреднено 58 независимых спектров мощности. На рис. 3 нанесены две черные горизонтальные прямые. Верхняя прямая соответствует оценке СПМ для модуляционного радиометра. Нижняя прямая получена путем деления уровня верхней прямой на 4, что соответствует теоретическому квадрату СКО для идеального радиометра полной мощности по сравнению с модуляционным радиометром. Сравнение с кри-

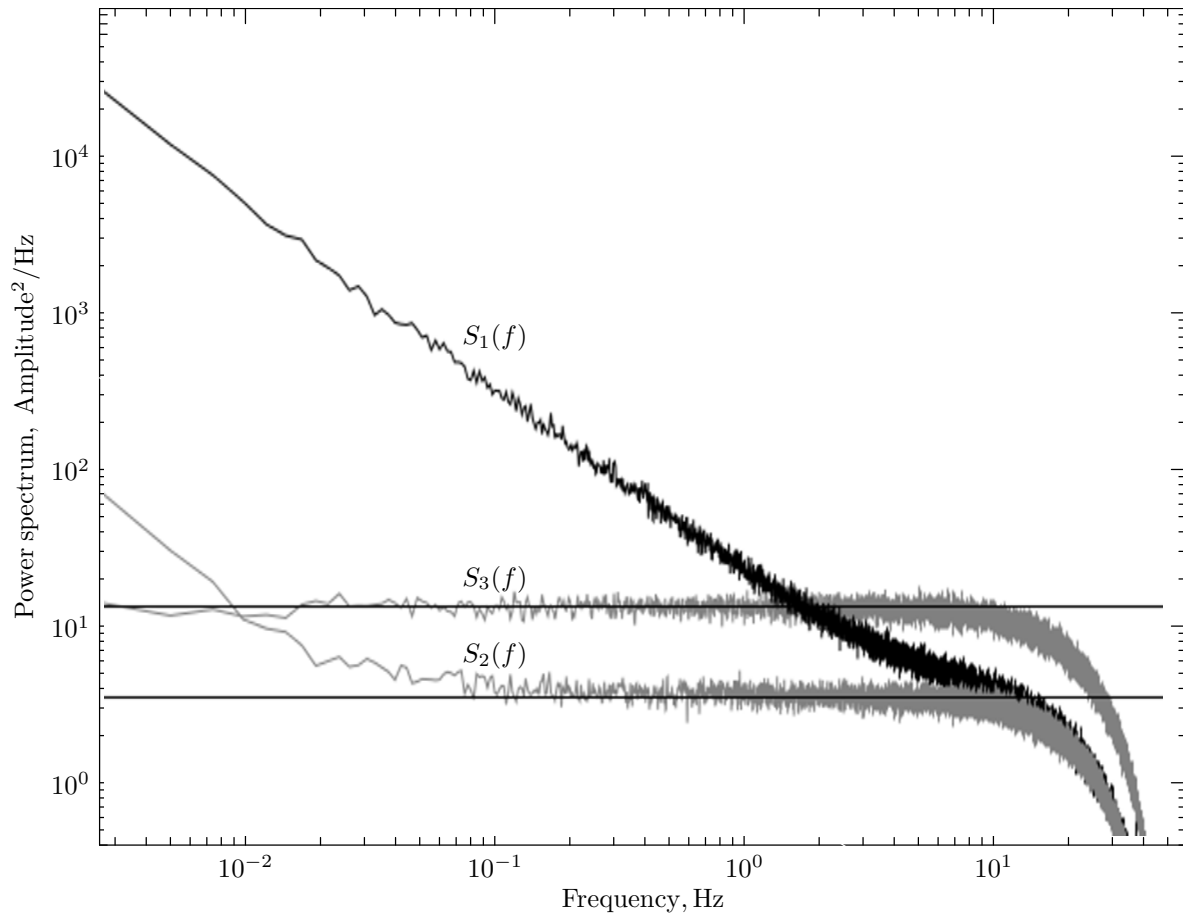


Рис. 3. Сглаженные оценки СПМ сигналов, представленных на рис. 2. Кривая $S_1(f)$ соответствует сигналу $A_1(t)$, кривые $S_2(f)$ и $S_3(f)$ — сигналам $A_2(t)$ и $A_3(t)$ рис. 2. Горизонтальные прямые — оценка уровня СПМ модуляционного радиометра (верхняя) и теоретическое значение уровня СПМ для радиометра полной мощности (нижняя).

вой $S_2(f)$ показывает ее полное совпадение с теоретическим значением уровня белой компоненты шума идеального радиометра полной мощности в интервале частот 0.1–10 Гц.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В нашем эксперименте шум вида $1/f$ резко снизился вследствие применения туннельного детектора вместо детектора на диоде Шоттки. Согласно современным представлениям, должен быть виден шум вида $1/f$ от всех усилительных каскадов, начиная от частоты 0.1 Гц и выше. Однако кривая $S_2(f)$ (рис. 3) в этой области частот имеет только «белую» природу.

Оценки СПМ шума вида $1/f$ в радиометрах полной мощности проводились во многих работах, например, [3, 5–8] и многих других. Подъем в спектре обычно находился в диапазоне частот 10–1000 Гц. Однако в спектре мощности, представленном на рис. 3 (кривая $S_2(f)$), подъем над

уровнем белого шума начинается с частоты 0.1 Гц! Это означает, что если накапливать сигнал такого радиометра в течение 10 секунд, то $1/f$ шум не окажет никакого влияния на результат накопления. Более того, сравнение СПМ $S_2(f)$ и $S_3(f)$ показывает, что накопление сигнала в течение 100 секунд даст лучший результат (более низкий уровень шума), чем накопление сигнала модуляционного радиометра.

Качественное объяснение резкого уменьшения шума $1/f$ нами было найдено сравнением современных усилителей и усилителей более старых, разработки конца 90-х годов прошлого столетия. Если применить туннельные детекторы в радиометре со «старыми» усилителями, то улучшения шума $1/f$ не происходит. Отсюда нами сделан вывод, что основным источником шума $1/f$ в таком радиометре являются все-таки флуктуации усиления, и эффект от применения туннельных детекторов практически не заметен.

Современные усилители (мы использовали новые усилители ряда MALN, приведенные выше)

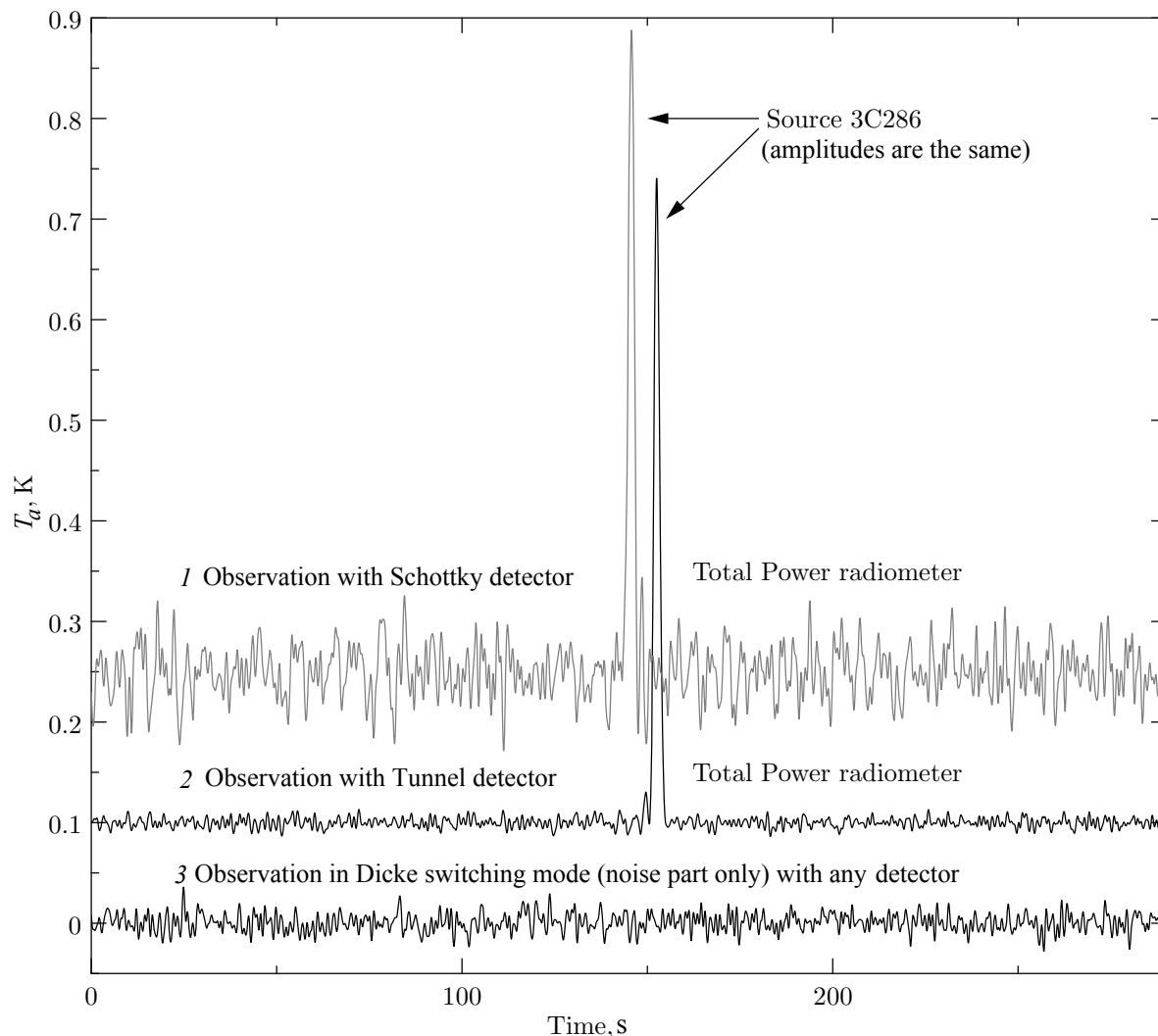


Рис. 4. Пример шумов при наблюдениях точечного радиоисточника на РАТАН-600 одним и тем же радиометром в трех разных режимах работы.

обладают существенно более низким уровнем шума $1/f$. Однако увидеть этот эффект можно только если применить еще и туннельные детекторы вместо детекторов Шоттки. Поэтому эффект резкого снижения шума $1/f$, показанный на рис. 3, является фактически сравнением туннельного детектора и детектора Шоттки при условии, что флуктуации усиления СВЧ усилителей пренебрежимо малы.

По результатам проведенных исследований три радиометра РАТАН-600 были переведены в режим радиометра полной мощности (параметры этих радиометров приведены выше). Эти модифицированные радиометры полной мощности с детекторами на обращенных туннельных диодах были введены в пробную эксплуатацию. Результаты пробной эксплуатации описаны в следующем разделе.

4. НАБЛЮДЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Наблюдения точечных радиоисточников на РАТАН-600 проводятся в режиме прохождения радиоисточника через неподвижную диаграмму направленности радиотелескопа за счет суточного вращения Земли. На рис. 4 показаны примеры наблюдений радиоисточника 3C 286 радиометром 11.2 ГГц (см. выше) в двух различных вариантах: с детектором Шоттки (кривая 1) и с туннельным детектором (кривая 2). Кривая 3 (нанесена для сравнения шумов) получена так же, как и кривые с индексом 3 на предыдущих рисунках, путем вычитания сигналов отдельных полупериодов модуляции. Кроме того, кривая 3 получена, когда радиометр был переведен в режим радиометра полной мощности, то есть входной переключатель (Dicke switch) исключен из схемы физически,

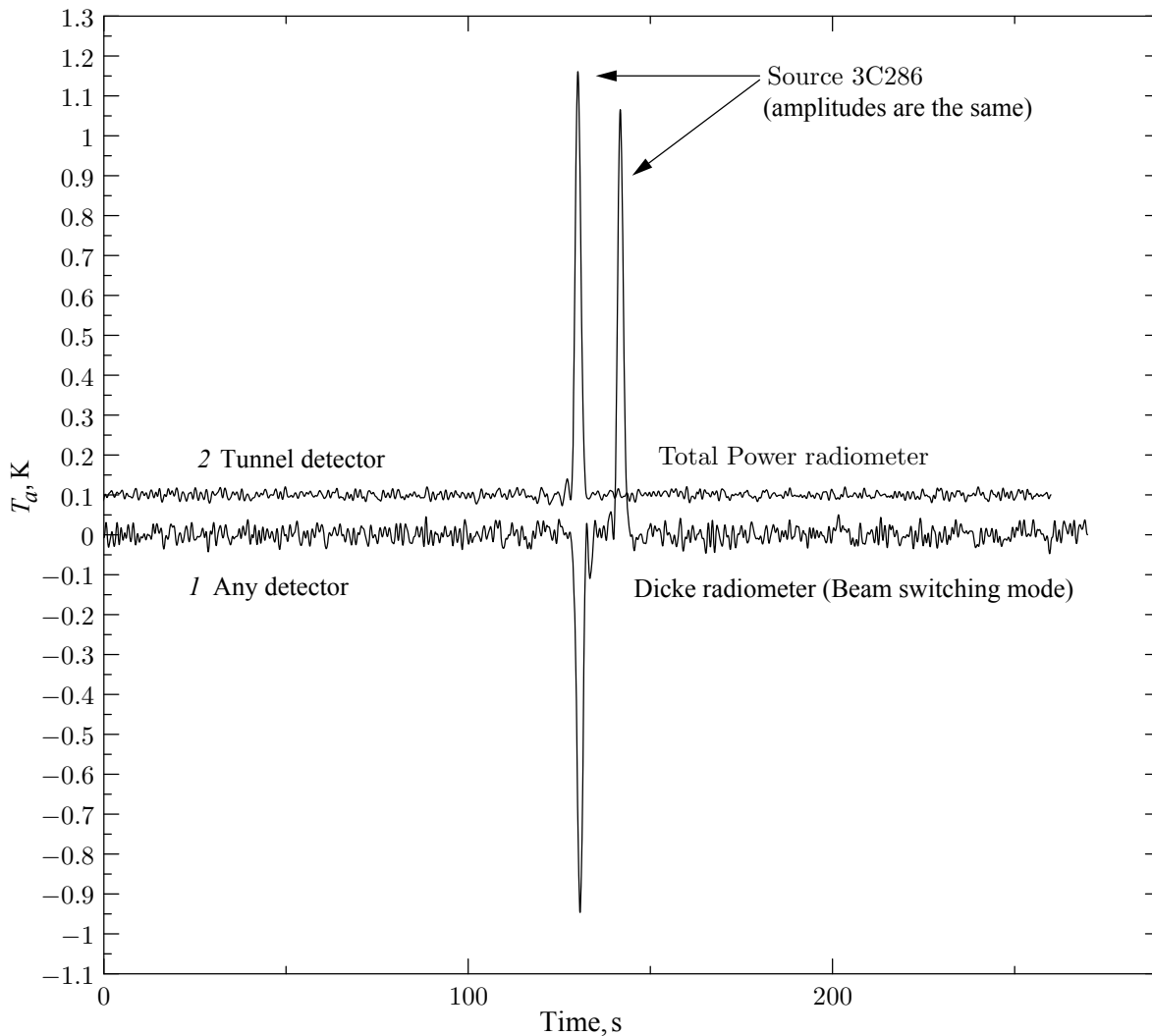


Рис. 5. Сравнение наблюдений одного и того же радиоисточника одним и тем же радиометром в модуляционном (beam switching) режиме работы (1) и в режиме радиометра полной мощности с туннельным детектором (2). Величина шума в модуляционном режиме соответствует расчетной для данного модуляционного радиометра и не зависит от типа применяемого детектора. Величина шума на кривой 2 здесь вдвое меньше, чем для модуляционного, что соответствует расчету для идеального радиометра полной мощности.

а синхронный детектор на выходе радиометра оставлен для сравнения разных схем радиометра. Поэтому в оба полупериода модуляции радиометр «видит одно и то же небо», и при вычитании радиоисточник также вычитается. Однако шум при этом будет полностью соответствовать шуму модуляционного радиометра, и его можно сравнить с шумом этого же радиометра в режиме полной мощности. Кривая 3 одинакова по СКО для обоих вариантов радиометра (с разными детекторами). Это автоматически получается при калибровке по амплитуде радиоисточника, которая должна быть одинаковой, так как наблюдения проводились в одинаковых условиях.

На записях в режиме полной мощности (см. рис. 4) исходно присутствовали крупномасштаб-

ные атмосферные дрейфы (больше ширины диаграммы направленности радиотелескопа), но в пост-обработке они были удалены соответствующим алгоритмом вычитания фона. Низкочастотная полоса на всех кривых рис. 4 равна 1 Гц (применен программный фильтр низких частот). Как видно из рис. 4, при одинаковой амплитуде радиоисточника шум радиометра с туннельным детектором наименьший из всех, и его СКО в два раза меньше, чем СКО шума этого же радиометра в модуляционном режиме.

На рис. 5 показано сравнение записей одного и того же радиоисточника одним и тем же радиометром диапазона 11.2 ГГц в различных режимах: радиометра полной мощности (с туннельным детектором) и радиометра в режиме «Dicke switched»

независимо от вида детектора. СКО шум радиометра полной мощности с туннельным детектором в два раза меньше, чем шум «Dicke switched» радиометра.

5. ВЫВОДЫ

В результате проведенных лабораторных измерений и радиоастрономических наблюдений можно сделать основной вывод: современный радиометр может иметь чувствительность в режиме полной мощности выше, чем в модуляционном режиме, на масштабах времени до 100 секунд. В данной работе это достигнуто использованием усилителей, имеющих значительно меньший шум $1/f$, чем у применявшихся ранее, и заменой детектора на диоде Шоттки детектором на обращенном туннельном диоде.

Детекторы на диодах с барьером Шоттки обладают значительно более высоким шумом $1/f$, чем детекторы на обращенных туннельных диодах.

Оставшийся шум вида $1/f$ требует дальнейшей классификации. На масштабах времени более 100 секунд подъем с СПМ должен быть связан в том числе и с дрейфом усиления за счет дрейфа физической температуры усилителей. Эта часть флуктуаций уже является не шумом, а процессом, поддающимся измерению и учету.

Строго говоря, выводы должны быть отнесены к той элементной базе, которая использована в радиометрах, описанных в данной работе. Обобщить эти выводы на случай усилителей и детекторов других моделей и других производителей представляется возможным только экспериментальным путем.

$1/f$ -Type Noise in a Total Power Radiometer

P. G. Tsybulev, M. V. Dugin, A. B. Berlin, N. A. Nizhelskij, D. V. Kratov, and R. Yu. Udovitskiy

We report the experimental results of a study of the sources of $1/f^\alpha$ type noise (hereafter referred to as $1/f$ -type noise for the sake of brevity) in a total power radiometer. We find this noise to have two main sources in the radiometer: microwave amplifiers and the square-law diode detector with a Schottky barrier. We present methods for a substantial reduction of $1/f$ -type noise, which allow total power radiometer measurements to be performed with nominal sensitivity on time scales of up to 10 seconds. The sensitivity of the total power radiometer on time scales up to 100 seconds remains higher than that of a Dicke switched radiometer.

Keywords: *instrumentation: detectors—radio continuum: general*

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнялись при финансовой поддержке грантов РФФИ 10-07-00412-а, 11-02-00489-а, 11-02-12036-офи-м, 12-02-00812-а, а также программы ОФН-17 «Активные процессы в галактических и внегалактических объектах». Авторы выражают благодарность всем коллегам, принявшим участие в обсуждении данной работы. Наблюдения на РАТАН-600 проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.518.11.7054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. H. Dicke, *Review of Scientific Instruments* **17**, 268 (1946).
2. M. Tiuri, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **12**, 930 (1964).
3. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
4. A. B. Berlin, G. M. Timofeyeva, N. A. Nizhelsky, et al., *Astronomical and Astrophysical Transactions* **19**, 559 (2000).
5. E. J. Wollack, *Review of Scientific Instruments* **66**, 4305 (1995).
6. E. J. Wollack and M. W. Pospieszalski, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Ed. by R. Meixner, E. Funk, and J. Cruz (Baltimore, 1998), Vol. 2, pp. 669–672.
7. P. Meinhold, R. Leonardi, B. Aja, et al., *Journal of Instrumentation* **4**, T12009 (2009).
8. E. Artal, B. Aja, M. L. de la Fuente, et al., *Journal of Instrumentation* **4**, T12003 (2009).