

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

Цыбулёв П. Г. 

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Специальность: 01.03.02
астрофизика и звездная астрономия**

2014 г.

Основные цели представляемой работы

2

1. Активная помехозащита дециметровых диапазонов радиотелескопа РАТАН-600 в период с 1995 по 2010 год.
2. Построение прецизионной измерительной системы (ИС) для радиометра, не вносящей в измеряемый сигнал собственного шума вида $1/f$, с целью повышения точности и долговременной стабильности измерения сигналов радиометров.
3. Исследование шума вида $1/f$ самого радиометра с целью выявления источников этого шума и возможности их устранения.
4. Повышение чувствительности и долговременной стабильности радиометров континуума радиотелескопа РАТАН-600.
5. Внедрение полученных результатов в непрерывные штатные радиоастрономические наблюдения на радиометрах континуума радиотелескопа РАТАН-600 в диапазоне 1-30 ГГц в период с 1995 г. По настоящее время для всех плановых наблюдательных программ.

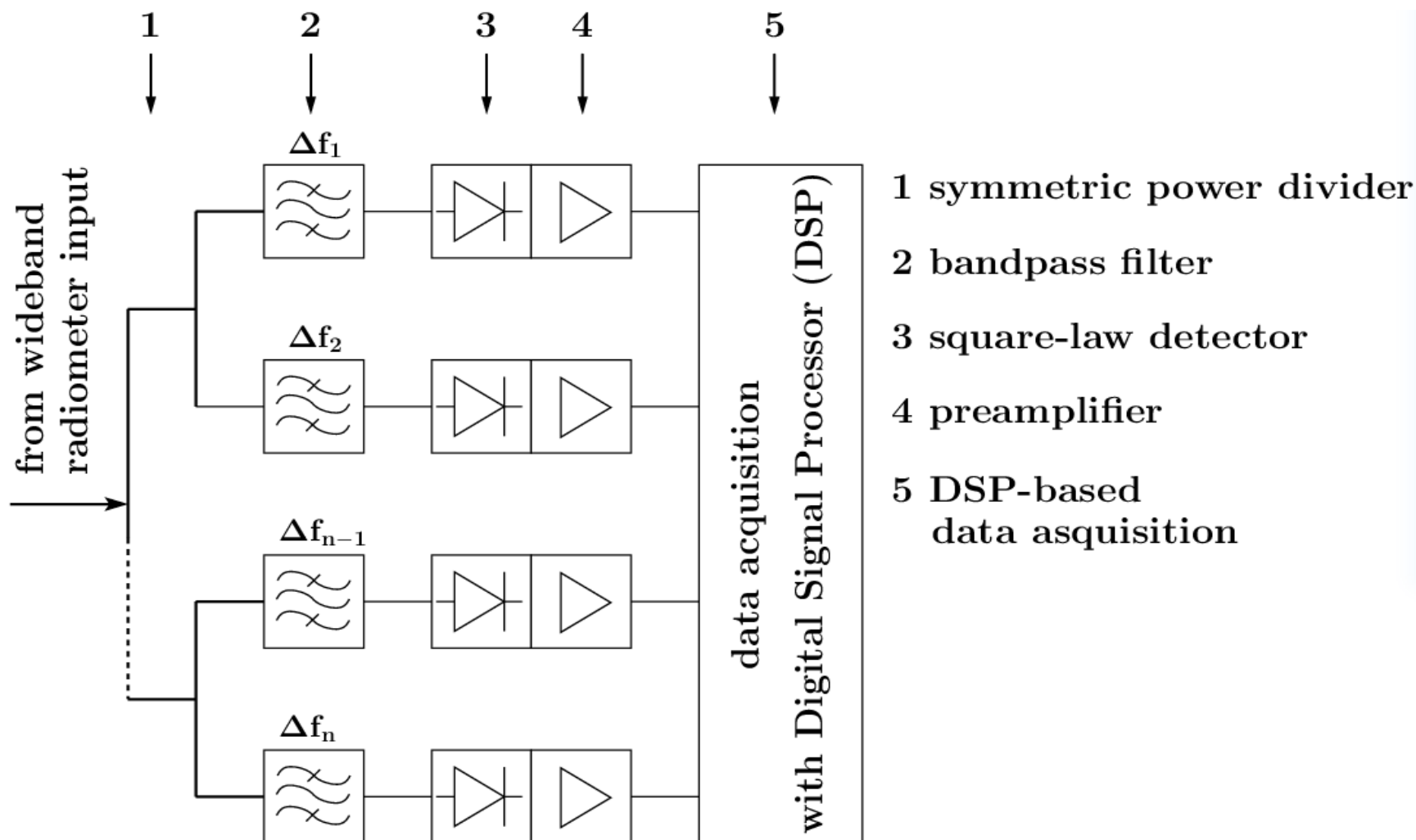
**Реализация поставленных целей
является актуальной для радиоастрономии**

Глава 1. Развитие средств и методов активного помехоподавления на РАТАН-600

3

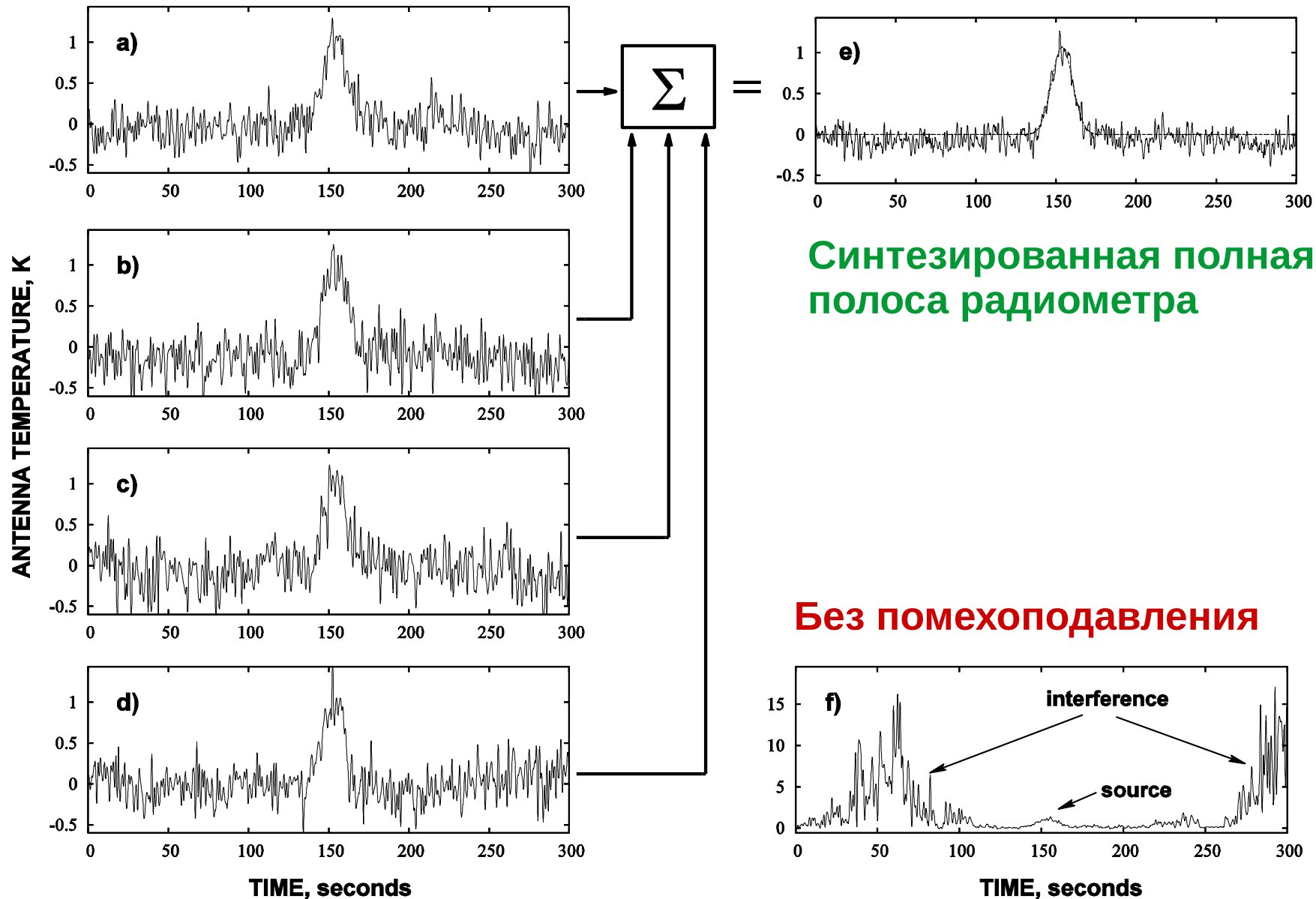
1995-1998 годы: НИР и внедрение частотно-временного помехоподавления в дециметровых диапазонах на РАТАН-600

Цифровой Сигнальный Процессор (DSP) удаляет в масштабе реального времени импульсные помехи в каждом из каналов спектроанализатора.



Анализ - импульсное помехоподавление - синтез полосы радиометра в методе частотно- временного помехоподавления

4



**В результате работ по частотно-временному
помехоподавлению удалось продлить
наблюдения в дециметровых диапазонах на
РАТАН-600 на 15 лет
(1995-2010 годы)**

Глава 2. Разработка Системы Сбора Данных и Управления нового поколения для проведения радиоастрономических наблюдений в континууме на радиотелескопе РАТАН-600

Положительный опыт, накопленный в задаче частотно временного помехоподавления, привел к применению Цифровой Обработки Сигналов (ЦОС) для синхронного детектирования и НЧ фильтрации сигналов модуляционных радиометров, заменяя собой аналоговые цепи.

Радиометр “должен сам” оцифровать свой сигнал, обработать и отправить к центру сбора радиоастрономических данных.

Новая Система Регистрации (Измерительная Система) должна быть

- прецизионной
- малошумящей
- легко наращиваемой для обеспечения радиометров нужным числом измерительных каналов
- простой и надежной в непрерывной эксплуатации

Измерительная система, не вносящая шума $1/f$, была разработана и введена в штатную работу для всех радиометров континуума РАТАН-600 (3 облучателя, 30 радиометров)

П.Г. Цыбулев. Система сбора данных и управления нового поколения для проведения радиоастрономических наблюдений в континууме на радиотелескопе РАТАН-600, *Астрофизический Бюллетень*, 2011, т.66 (1), стр. 118-133.

DC Precision ADC module

Gain : 2, 20; ADC range 0 – 2.048 V

Order 4 Bessel LPF 0 – 8 KHz

4 16 bit ADCs, sampling rate 32 KHz

3 Auto – Zero OpAmps/channel

(AD8628)



Sampled data →

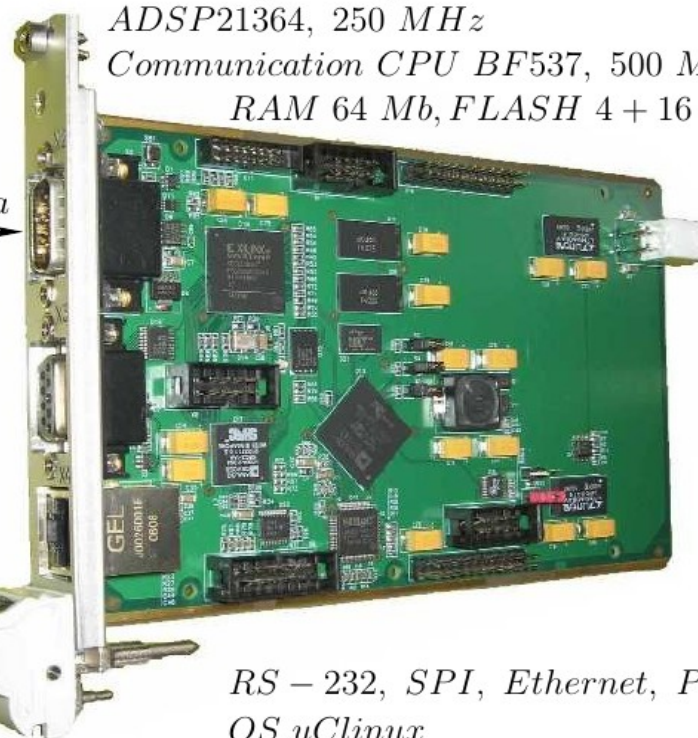
DSP and communication module

SHARC floating point DSP

ADSP21364, 250 MHz

Communication CPU BF537, 500 MHz

RAM 64 Mb, FLASH 4 + 16 Mb

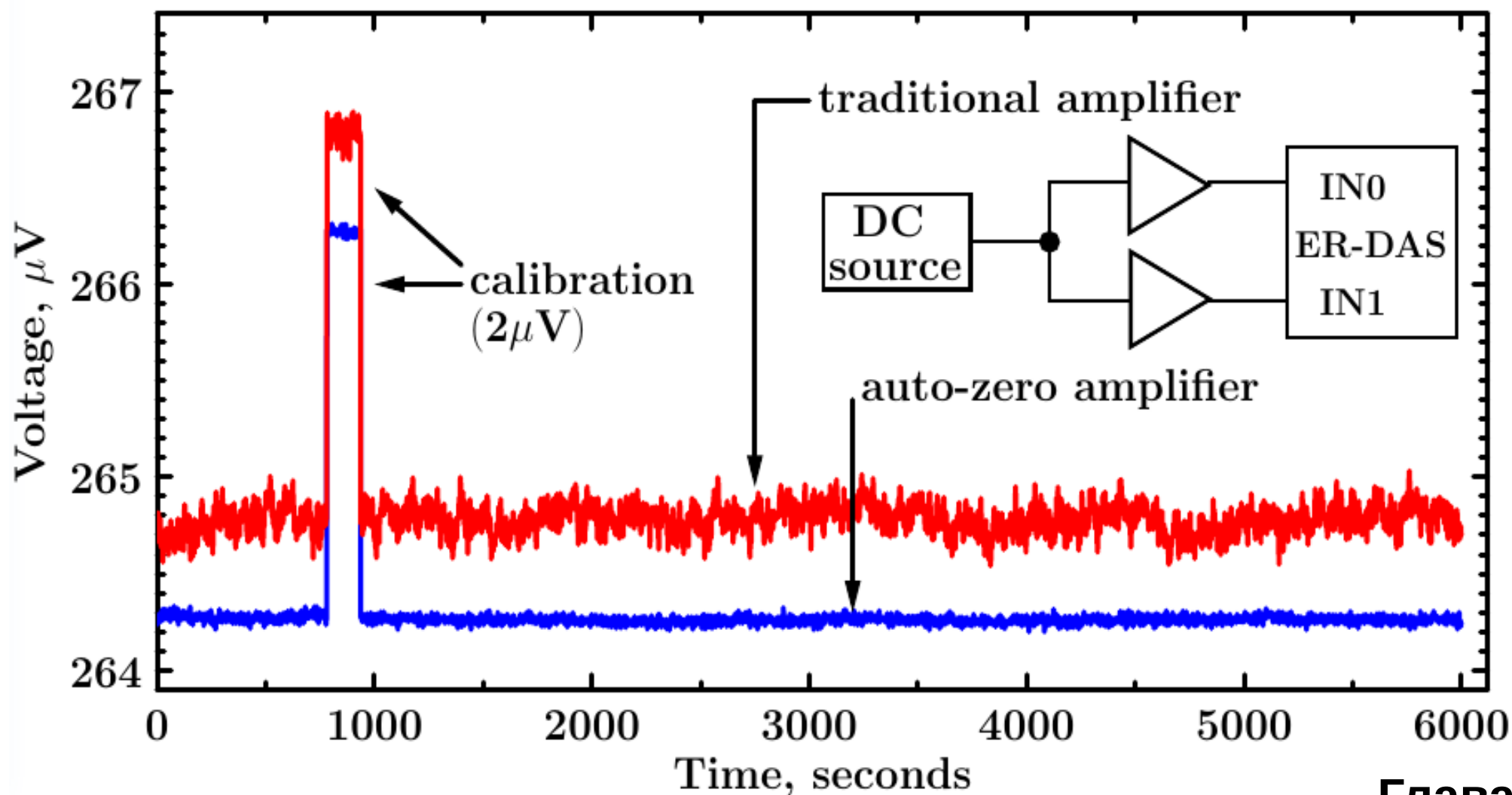


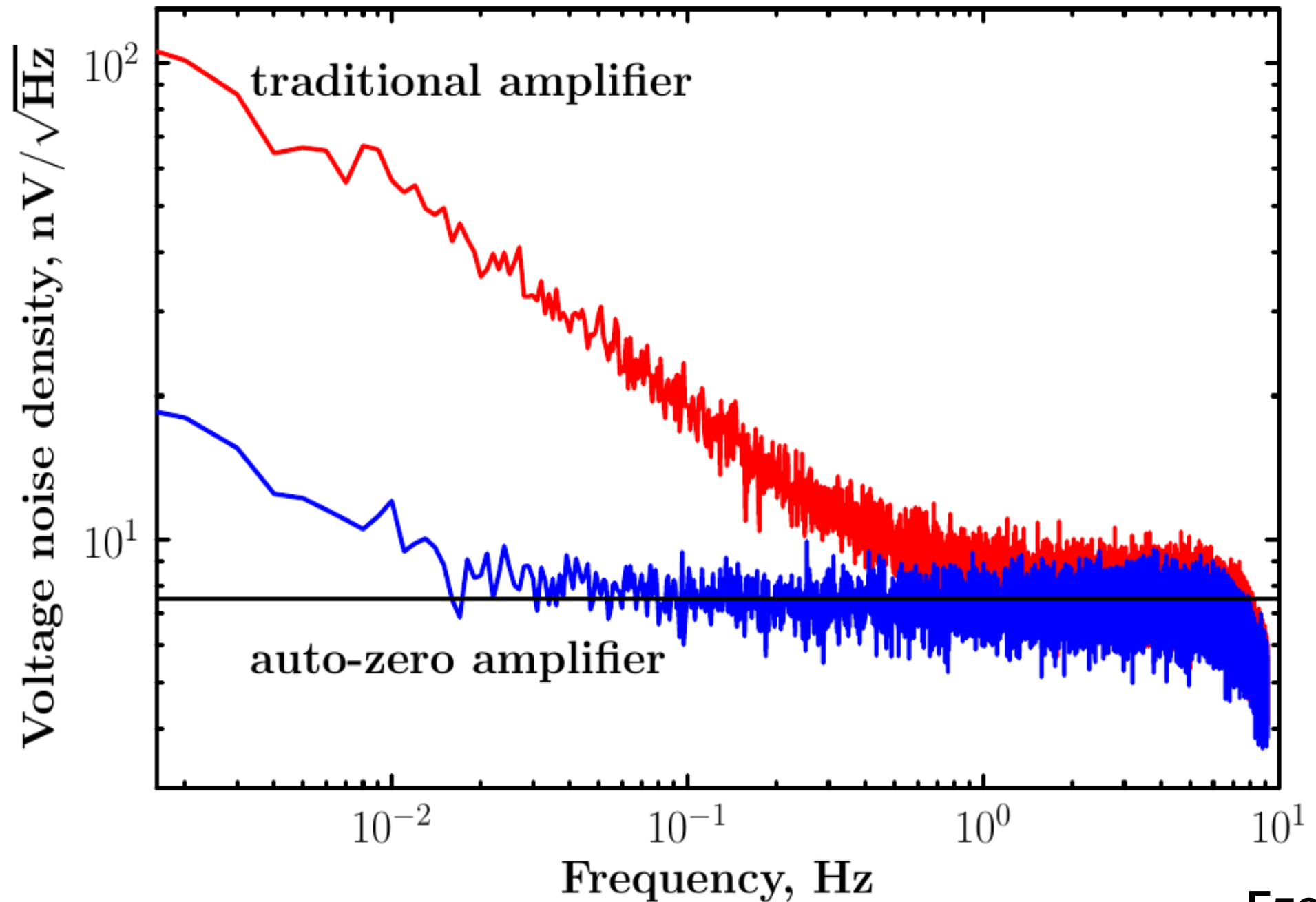
Embedded Radiometric Data Acquisition System (ER-DAS)

RS – 232, SPI, Ethernet, PIO

OS uClinux

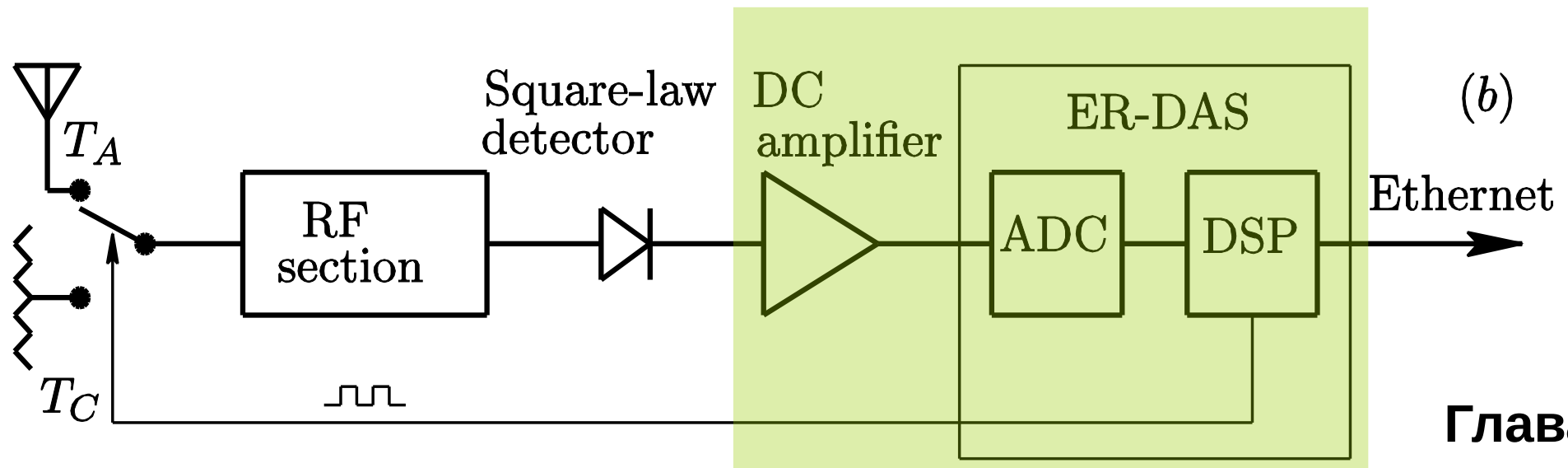
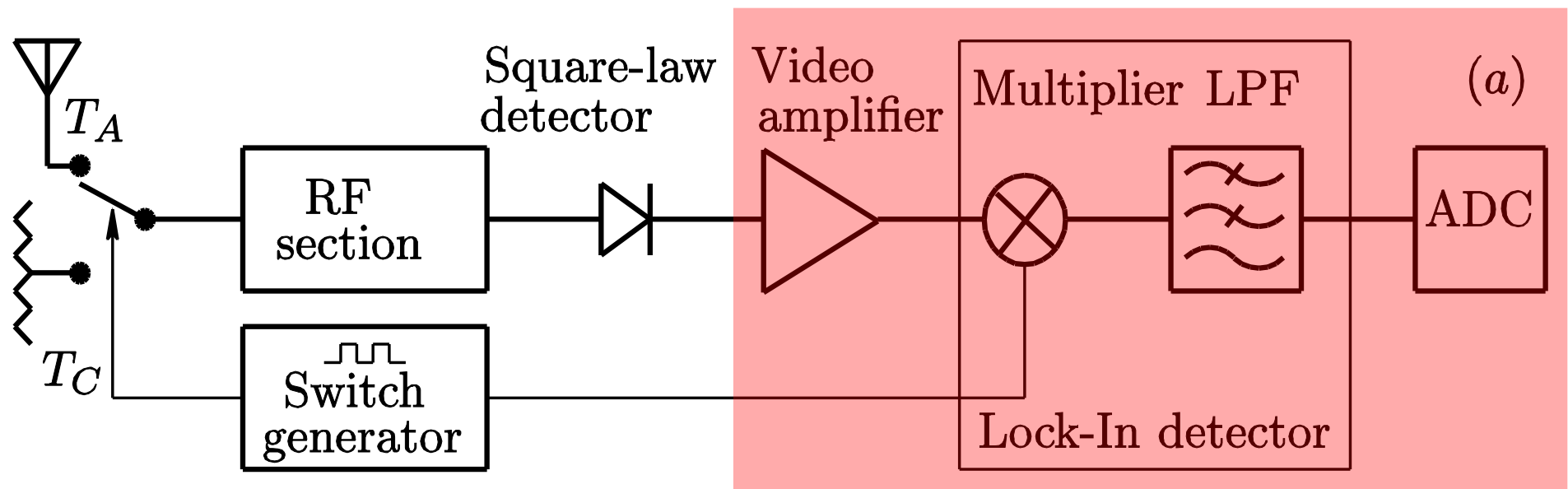
Высокая точность по постоянному току и отсутствие шума $1/f$ в новой измерительной системе обусловлены применением нового класса операционных усилителей – усилителей с быстрой автокоррекцией собственного нуля (Auto-Zero Amplifiers). Эти прецизионные УПТ, не имеющие “дрейфа нуля” идеально подходят для применения в радиометре полной мощности





Модуляционный радиометр Р. Дике и его вариант с новой измерительной системой

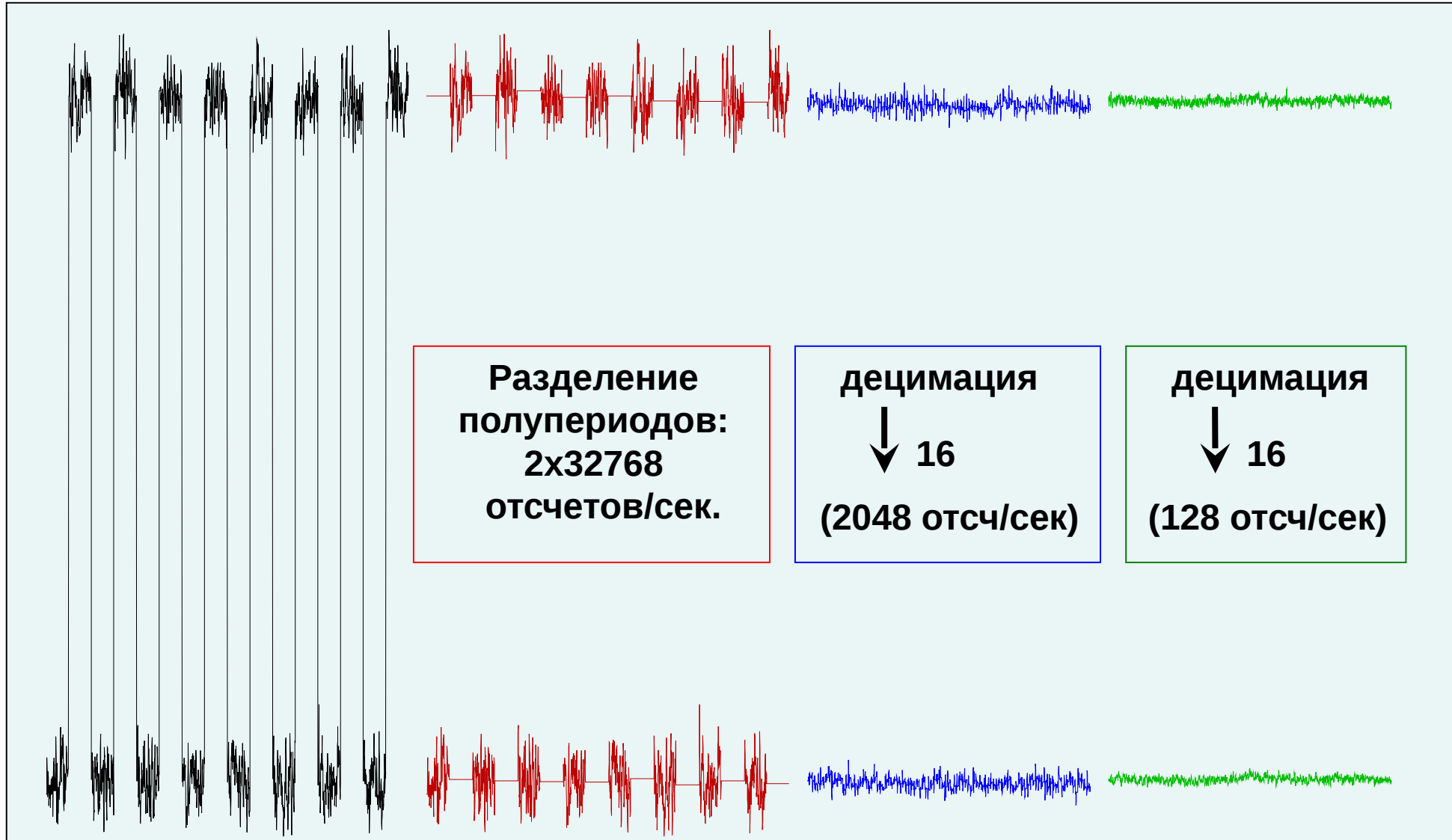
10



Цифровая обработка сигналов в новой измерительной системе

11

AMPLITUDE



A

B

C

D

Глава 2

Характеристики новой измерительной системы

12

- Прецизионная по постоянному току за счет применения Auto-Zero ОУ (температурный дрейф нуля в 300 !!! раз ниже, чем для обычных ОУ)
- Не вносит в измерения своего шума вида $1/f$ за счет применения Auto-Zero ОУ
- Предельно низкий собственный белый шум
- Аналоговая обработка сигналов заменена на Цифровую обработку сигналов
- Встраиваемая в радиометр
- Максимально приближена к источнику сигнала (детектору)
- Сетевая (Ethernet)

**Отсутствие в измерительной системе шума
вида $1/f$ позволяет использовать ее для
исследования
шума вида $1/f$ самого радиометра**

Глава 3. Применение новой измерительной системы

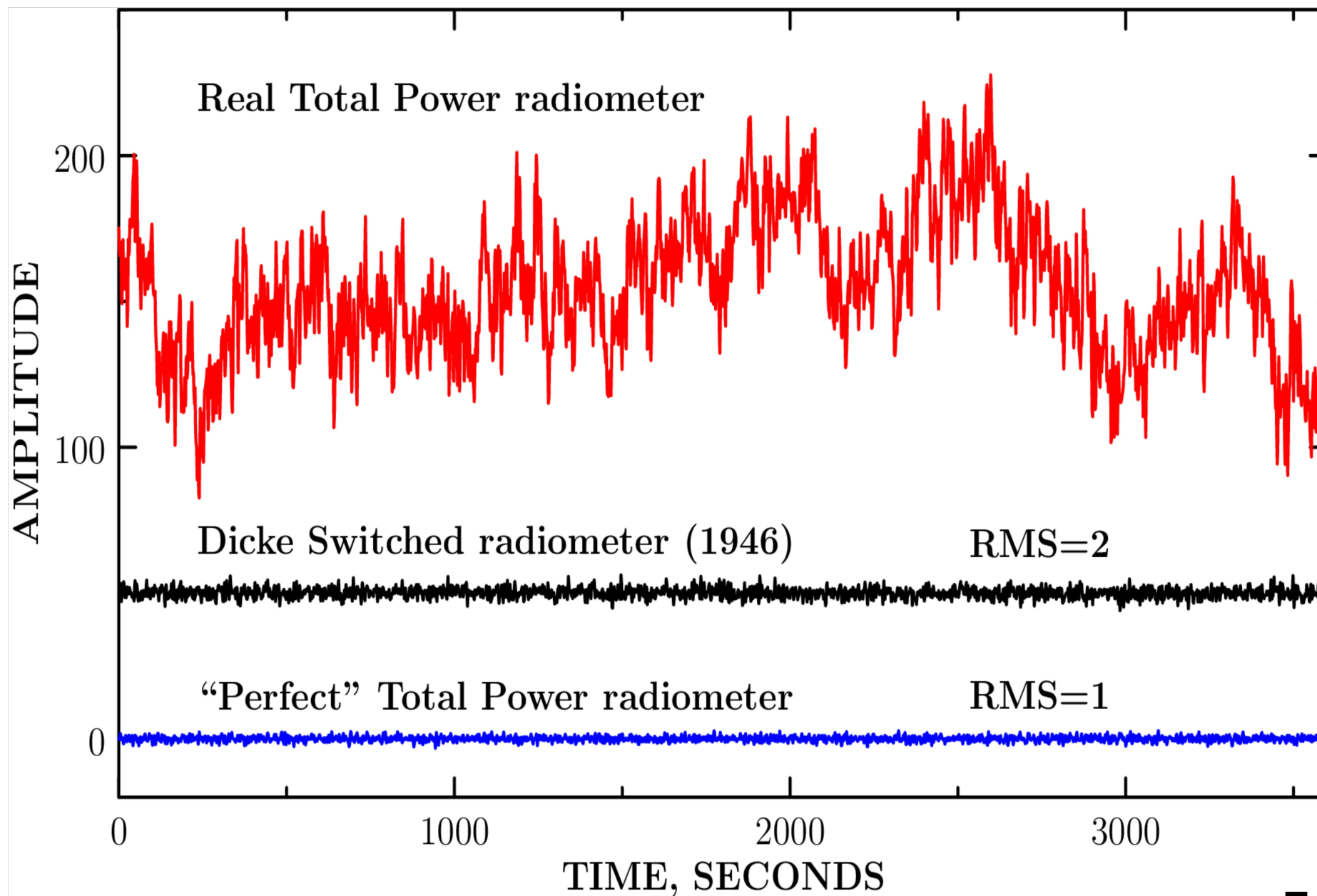
13

Данная глава посвящена практическим методическим аспектам, важным для работы с новой измерительной системой (ИС):

1. Применение ИС для радиоастрономических наблюдений. Здесь для радиоастрономов важна новая интерпретация данных с выхода ИС: отдельно регистрируются 2 полупериода модуляции радиометра Дике. При этом полусумма 2-х полупериодов дает сигнал радиометра полной мощности, а их разность — сигнал модуляционного радиометра Дике. Таким образом реализована новая возможность: одновременно наблюдать одним радиометром в 2-х режимах.
2. Применение ИС для радиометрических измерений. Здесь важным является измерение полной мощности сигнала радиометра. Это требуется как при калибровке, так и при измерении параметров шума вида $1/f$ радиометра. Представлена методика измерения параметров шума $1/f$, которая использована в Главе 2 и в дальнейших работах (Глава 4).

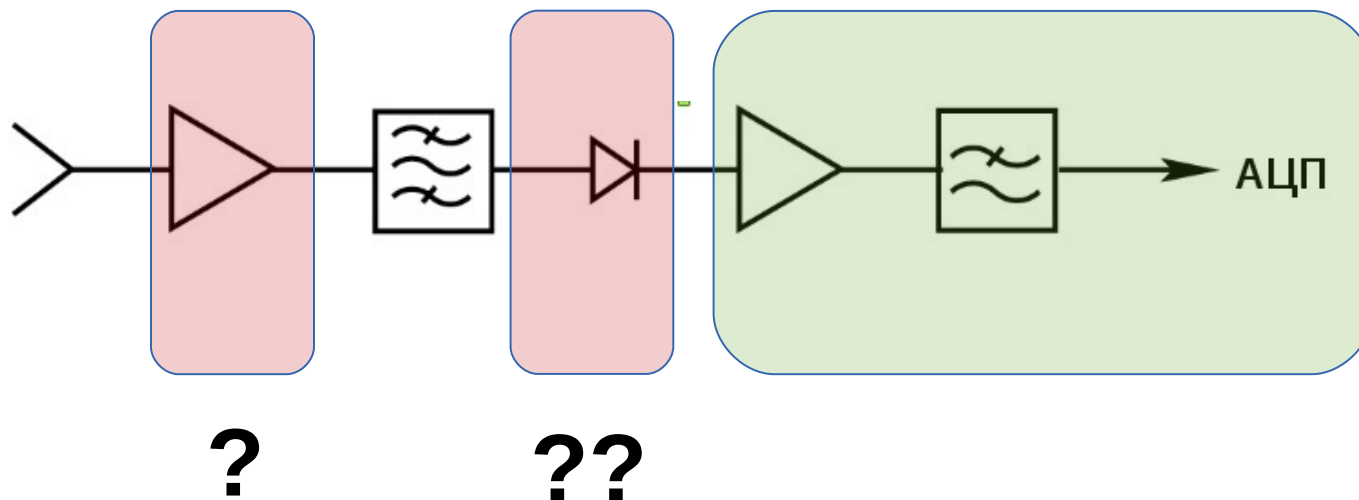
Глава 4. Шум вида $1/f$ в радиометре полной мощности

14



Основные источники шума вида $1/f$ в радиометре полной мощности

15

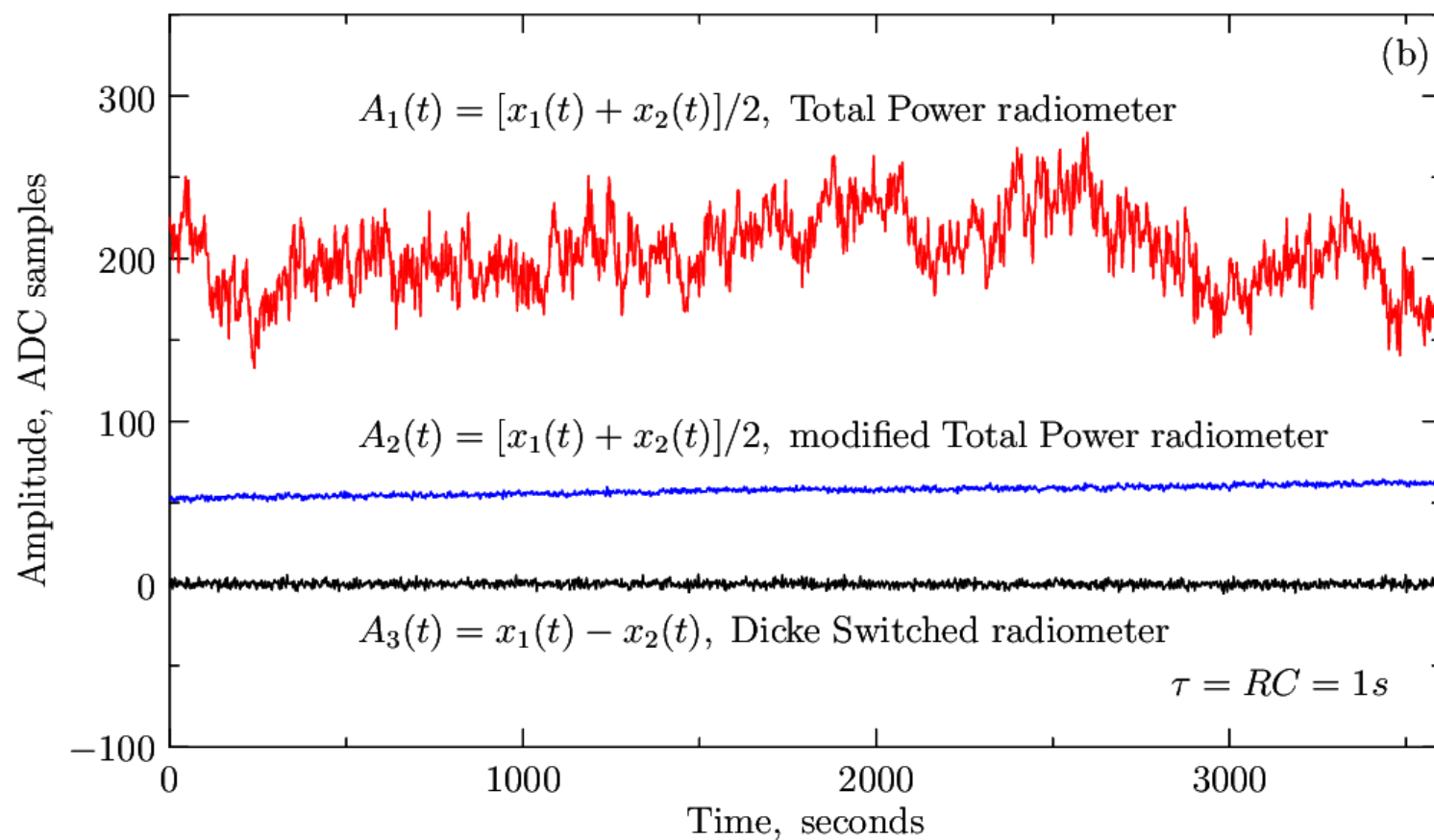
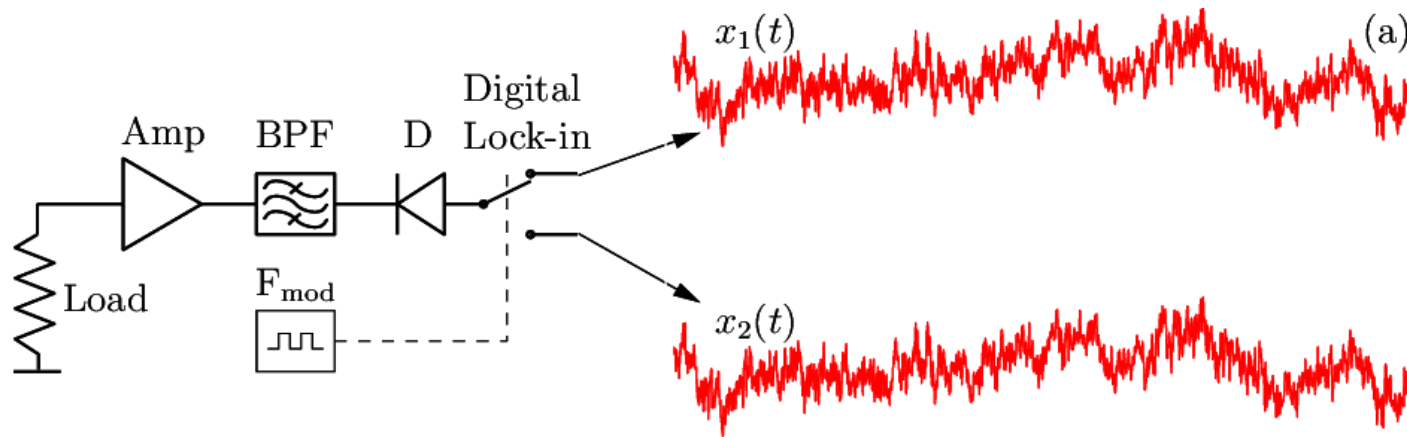


Считается, что основным источником шума $1/f$ являются все СВЧ усилители

Однако, на СВЧ усилители мы смотрим через «экран»: **детектор радиометра**, который также может быть источником шума $1/f$!

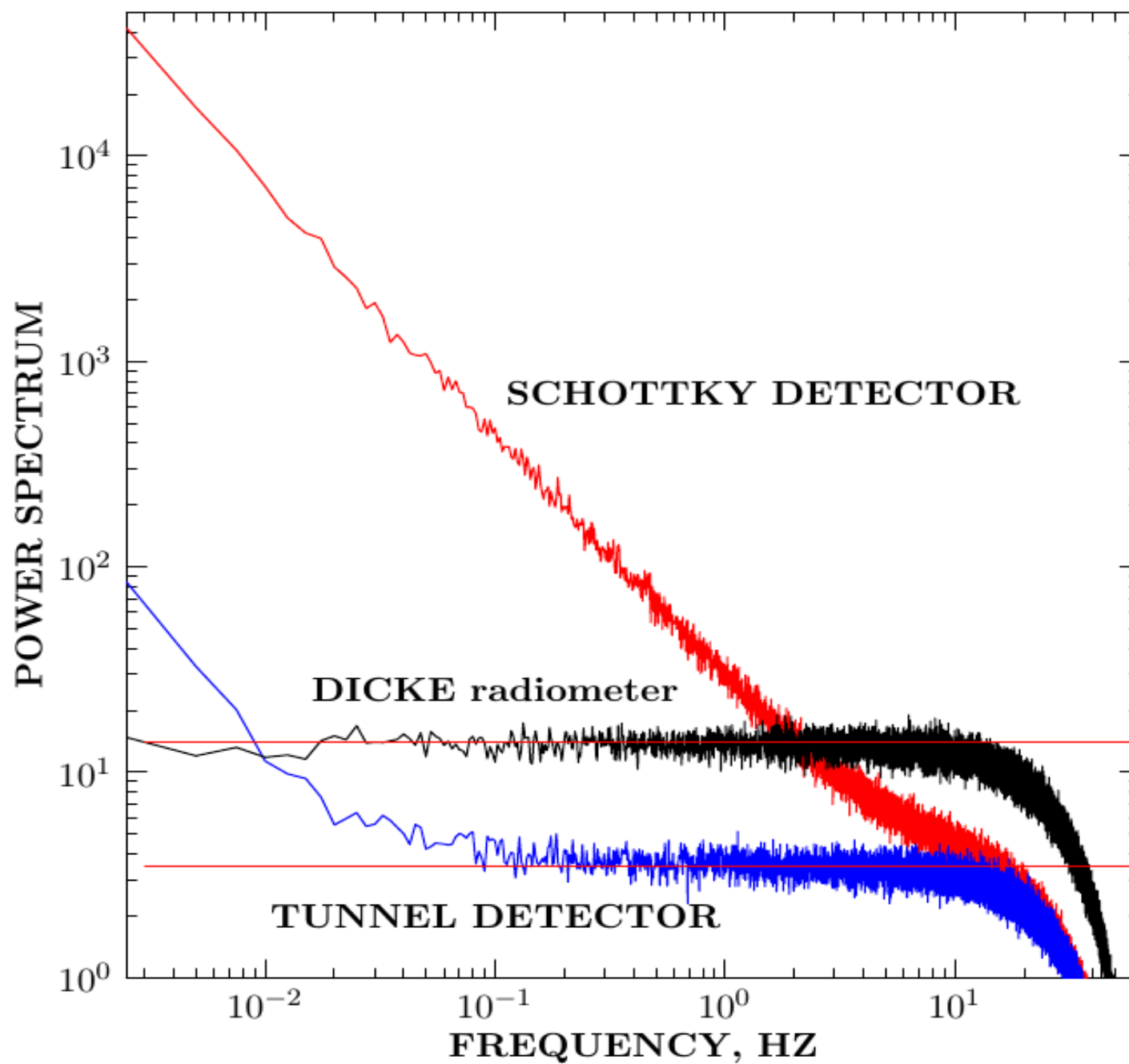
Радиометристы обычно используют детекторы, построенные на диодах Шоттки

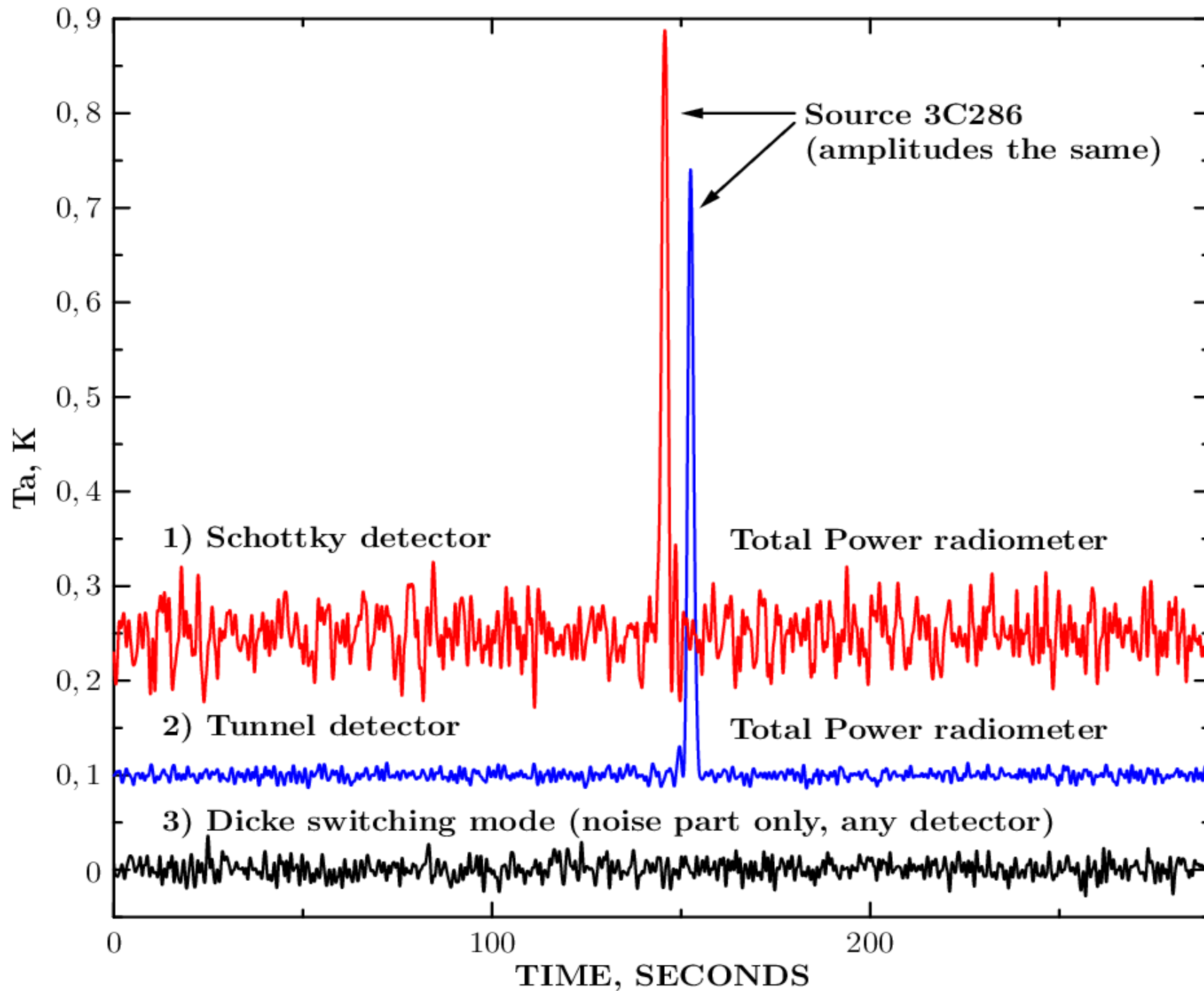
Диссертант применил детекторы, работающие на туннельном эффекте (на основе обращенного туннельного диода)



Сглаженные оценки СПМ

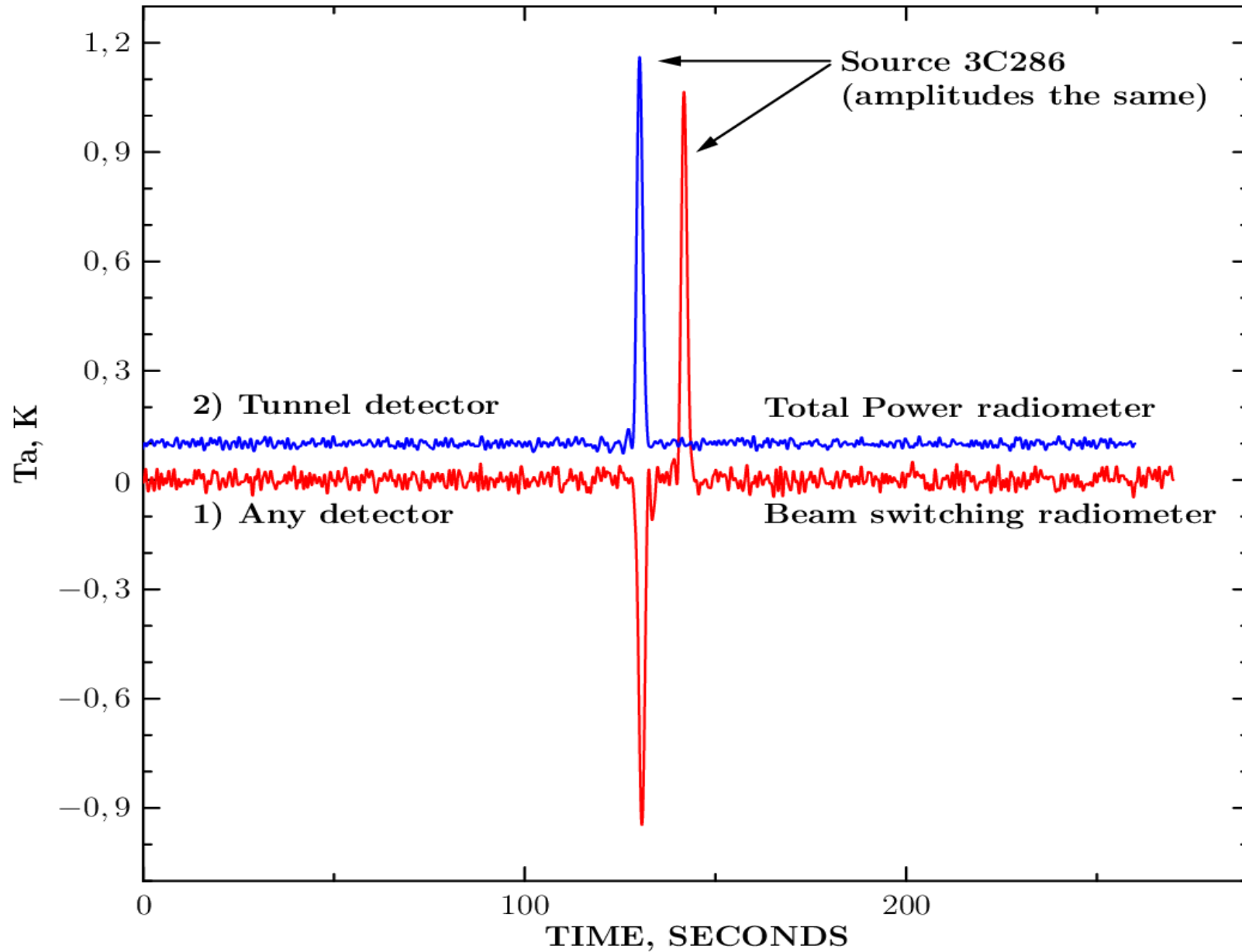
17





Радиометр с двухлучевым сканированием и радиометр полной мощности с туннельным обращенным детектором без смещения

19



- 1) Разработана и внедрена универсальная, прецизионная, встраиваемая в радиометр, сетевая измерительная система, ER-DAS -- Embedded Radiometric Data Acquisition System (название диссертанта). ER-DAS является "строительным блоком" для построения распределенных сетевых систем регистрации радиометрических сигналов и сигналов различных датчиков.
- 2) Произведена полная модернизация Систем Сбора Данных и Управления (ССДиУ) всех радиометров континуума РАТАН-600 (три приемных комплекса с 30 радиометрами) на новой аппаратно-программной основе (ER-DAS).
- 3) Устранен основной источник шума вида $1/f$ в измерительной системе радиометра. Это позволяет измерять параметры шума вида $1/f$ радиометра, зная, что измерительная система не вносит своих дрейфов.
- 4) Устранен основной источник шума вида $1/f$ в радиометре. Показано, что применение детекторов на основе туннельных обращенных диодов вместо детекторов на диодах Шоттки резко снижает шум вида $1/f$ в радиометре полной мощности. Впервые на практике реализована чувствительность идеального радиометра полной мощности на типовых для РАТАН-600 масштабах времени (около 10 секунд). При этом чувствительность радиометра полной мощности на масштабах времени до 100 секунд остается выше, чем у модуляционного радиометра. Результаты успешно внедрены в работу высокочувствительных радиометров континуума РАТАН-600 для сантиметровых диапазонов длин волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ (продолжение)

- 5) Работы с участием диссертанта в области активной помехозащиты дециметровых диапазонов (частотно-временное помехоподавление) позволили более чем на 10 лет продлить наблюдения на радиометрах 13, 30 и 50 см. в условиях ухудшающейся помеховой обстановки.**
- 6) Весь наблюдательный материал РАТАН-600 в континууме, полученный в течение последних 15 лет круглосуточных плановых наблюдений по всем наблюдательным темам галактической и внегалактической радиоастрономии, записан системами регистрации, разработанными, сопровождаемыми и развиваемыми диссертантом.**

Научная новизна работы

- 1) **Впервые** в практику радиоастрономических наблюдений введена прецизионная измерительная система, практически не имеющая собственных дрейфов нуля (шума вида $1/f$). Это позволяет измерять истинную полную мощность СВЧ-сигнала, поступившего на детектор радиометра, а также исследовать источники шума вида $1/f$ в радиометре.
- 2) Используя новую измерительную систему получены **новые** данные по шуму вида $1/f$ в радиометре и по источникам этого шума.
- 3) Основываясь на этих данных и их анализе, **впервые** устранен основной источник шума вида $1/f$ в радиометре. При этом подъем в спектре мощности выходного шума радиометра сместился от 10-100 Гц к частоте 0.1 Гц, что в 100-1000 раз лучше типичных значений в радиометрии.
- 4) По этим результатам **впервые** на практике реализована чувствительность идеального радиометра полной мощности на масштабах времени около 10 секунд. При этом чувствительность радиометра полной мощности на масштабах времени до 100 секунд остается выше, чем у модуляционного радиометра.

Результаты работы докладывались на Всероссийских радиоастрономических конференциях (25-й, Пущино, 1993 г., 26-й, С.-Петербург, 1995, 27-й, С.-Петербург, 1997), Всероссийских астрономических конференциях (2001 г., С.-Петербург, 2004 г., Москва, 2007 г., Казань, 2010 г., Нижний Архыз, 2013 г., Санкт-Петербург).

На российских конференциях памяти А.А. Пистолькорса ``Радиотелескопы РТ-2002: антенны, аппаратура, методы" (2002 г., Пущино); ``Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, 2002; ``Сахаровские осцилляции и радиоастрономия", Нижний Архыз, 2007; радиоастрономической конференции ``Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов" памяти Н.А. Есепкиной (2008 г., Н. Архыз).

На рабочих секциях ``Cosmic Genome", Нижний Архыз, 2000, и ``Радиотелескопы и методы", Москва, АКЦ ФИАН, 2006.

На конкурсе научно-технических работ CAO РАН (2014 г., 1-е место).

За рубежом: на Европейских конференциях молодых радиоастрономов 28-th YERAC, Kapteyn Institute, Groningen, Netherlands, и 31-th YERAC, NRAL, Jodrell Bank,

на международных конференциях: Gamov Memorial International Conference ``Early Universe: Cosmological Problems and Instrument Technologies", St. Petersburg, 1999; 5-th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology, Kiev, 1995; ``Cosmic Physics", Nizhnij Arkhyz, 2007;

На рабочей группе ``RFI Mitigation Workshop", 2010, Groningen, Netherlands.

Результаты работы Системы Сбора Данных и Управления (ССДиУ) и ее развития диссертантом успешно используются в течение 15 лет во многих астрофизических исследованиях с личным участием автора и в сотнях других работ с применением ССДиУ радиометров континуума РАТАН-600 по таким направлениям, как исследования микроволнового фона Вселенной, галактических объектов, мгновенных спектров радиогалактик и квазаров, изучение радиоизлучения Солнца и планет Солнечной системы и многим другим.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключение, трех Приложений и Списка цитируемой литературы.

Общий объем диссертации составляет 146 страниц и содержит 35 рисунков, одну таблицу.

Библиография из 94 наименований содержит 12 страниц.
Приложения А-С -- 40 страниц.

Публикации по теме диссертации

15 работ в журналах из списка ВАК,
49 других публикаций, из них:
5 статей в научно-технических изданиях;
4 технических отчета САО РАН;
40 работ в материалах конференций.

Список публикаций по теме диссертации

26

- 1) Цыбулев П.Г. Система Сбора Данных и Управления нового поколения для проведения радиоастрономических наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600: разработка, наблюдения измерения. *Астрофиз. бюл.* 2011. Т. 66(1). С. 118-133.
- 2) Цыбулев П.Г., Дугин М.В., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Кратов Д.В., Удовицкий Р.Ю. Шум вида $1/f$ в радиометре полной мощности. *Астрофиз. бюлл.* 2014. Т. 69(2). С. 256-262.
- 3) Цыбулев П.Г., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Мингалиев М. Г., Кратов Д.В. Противопомеховая активность на радиотелескопе РАТАН-600. *Астрофиз. бюлл.* 2007. Т. 62(2). С. 208-217.
- 4) Берлин А.Б., Парийский Ю.Н., Нижельский Н.А., Мингалиев М. Г., Цыбулев П.Г., Кратов Д.В., Удовицкий Р.Ю., Смирнов В.В., Пилипенко О.М. Матричная Радиометрическая Система для РАТАН-600 МАРС-3. *Астрофиз. бюлл.* 2012. Т. 67(3). С. 354-366.
- 5) Семенова Т.А., Парийский Ю.Н., Цыбулев П.Г. О требованиях к методам “просветления” атмосферы при наземных радиоастрономических наблюдениях фоновых радиоизлучений Вселенной. *Астрофиз. бюлл. САО РАН.* 2009. Т. 64(2). С. 196-204.
- 6) Naselsky P. Novikov I., Parijskij Y., Tsibulev P. CMB anisotropy and polarization measurements with RATAN-600. *International Journal of Modern Physics.* 1999. Vol. 8, no. 5. Pp. 581-605.
- 7) Jorgensen H. E., Novikov I.D., Kotok E.V., Naselsky P.D., Naselsky I.P., Vasil'ev E.V., Parijskij Yu.N., Tsibulev P.G. The Cosmological Gene Project: cluster analysis of the atmospheric fluctuations on arcmin-scale imaging of the cosmic microwave background. *International Journal of Modern Physics.* 2000. Vol. 9(2). Pp. 127-142.
- 8) Богод В.М., Голубчина О.А., Жеканис Г.В., Коржавин А.Н., Котельников В.С., Нижельский Н.А., Цыбулев П.Г. Исследование северной полярной области Солнца по микроволновым наблюдениям полного затмения Солнца. *Астрофиз. бюлл.* 2007. Т. 62(4). С. 360-368

Список публикаций по теме диссертации (продолжение)

- 9) Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Мингалиев М.Г., Цыбулев П.Г., Богданцов А.В., Майорова Е.К., Пилипенко О.М., Балановский А.А., Жеканис Г. В. Исследование Юпитера с высоким разрешением на частоте 30 ГГц. Письма Астрон. ж. 2000. Т. 30(4). С. 315-320.
- 10) Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Богданцов А.В., Цыбулев П.Г. Макромолекулы в галактике и реликтовое радиоизлучение Вселенной. Астрономический Журнал. 2002. Т. 79(7). С. 583-588.
- 11) Parijskij Y.N. Bursov N.N., Berlin A.B., Balanovskij A.A., Khaikin V.B., Majorova E.K., Mingaliev M.G., Nizhelskij N.A., Pylypenko O.M., Tsibulev P.G., Verkhodanov O.V., Zhekanis G.V., Zverev Y.K. RATAN-600 new zenith eld survey and CMB problems. Gravitation & Cosmology. 2005. Vol. 11. Pp. 139-144.
- 12) Парийский Ю.Н., Мингалиев М.Г., Нижельский Н.А., Бурсов Н.Н., Берлин А.Б., Гречкин А.А., Жаров В.И., Жеканис Г.В., Майорова Е.К., Семенова Т.А., Столяров В. А., Цыбулев П.Г., Кратов Д.В., Удовицкий Р.Ю., Хайкин В.Б. Многочастотный обзор по фоновым излучениям Вселенной. Проект "Генетический код Вселенной". Первые результаты. Астрофиз. бюлл. 2011. Т. 66(4). С. 453-466.
- 13) Столяров В.А., Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н., Мингалиев М.Г., Семенова Т.А., Цыбулёв П.Г. Наблюдения мелкомасштабных флуктуаций галактического излучения на радиотелескопе РАТАН-600. Астрофиз. Бюлл. 2012. Т. 67(1). С. 31-47.
- 14) Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н., Берлин А.Б., Мингалиев М.Г., Нижельский Н.А., Цыбулев П.Г., Семенова Т.А. Обзор околоразенитной области неба на частоте 30 ГГц с 32-элементной матрицей радиометров РАТАН-600. Астрофизический Бюллетень. 2013. Т. 68(2). С. 249-256.
- 15) Ковалев Ю.А., Васильков В.И., Попов М.В., Согласно В.А., Войчик П.А., Лисаков М.М., Кутькин А.М., Николаев Н.Я., Нижельский Н.А., Жеканис Г.В., Цыбулев П.Г. Проект РадиоАстрон. Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011-2013 гг. Космические исследования. 2014. Т. 52(5). С. 1-10.

СПАСИБО за внимание!

Д. Г. Чибуків