

## ОТЗЫВ

официального оппонента Зинченко Игоря Ивановича, заведующего отделом, отдел № 180 «Радиоприёмной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии» Отделения «Физики плазмы и электроники больших мощностей» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт прикладной физики Российской академии наук, на диссертацию Цыбулёва Петра Григорьевича на тему «Развитие систем регистрации радиоастрономических данных и повышение чувствительности радиотелескопа РАТАН-600», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Радиоастрономия является сейчас одним из основных источников информации о Вселенной. Впечатляющие научные результаты радиоастрономии достигнуты, благодаря непрерывному совершенствованию приёмной аппаратуры, которое на протяжении всей истории радиоастрономии включает в себя повышение чувствительности и стабильности приёмников, точности измерений, а также борьбу с помехами. Эти задачи актуальны всегда и для всех инструментов. К ним, конечно, относится и радиотелескоп РАТАН-600, развитию систем регистрации и повышению чувствительности которого и посвящена диссертационная работа П.Г. Цыбулёва.

В данной работе решается несколько масштабных и при этом взаимосвязанных задач, направленных на достижение указанных целей. Эти задачи описаны в четырех главах диссертации. Первая глава посвящена борьбе с помехами, которые в некоторых диапазонах работы РАТАН-600 представляют собой очень большую проблему. Автору удалось добиться значительных успехов в подавлении помех за счёт их частотно-временной фильтрации. Это позволило на много лет продлить срок эффективной эксплуатации РАТАН-600 в этих диапазонах. Приведённые примеры выглядят очень убедительно. Кроме того, эти разработки стимулировали и создали основу для дальнейших работ автора по совершенствованию системы сбора данных и управления (ССДиУ), а также по исследованию шумов радиометров, представленных в последующих главах.

Разработка системы сбора данных и управления описана во второй главе диссертации. Автором создана встраиваемая система сбора данных и управления, универсальная для всех радиометров. Важным новшеством является использование в системе операционных усилителей с автокоррекцией нуля. Это обеспечивает высокую стабильность измерительной системы и открывает возможность реализации режима полной мощности в радиометрах, что очень важно для повышения чувствительности системы. В системе используется цифровой синхронный детектор, что позволяет отдельно регистрировать сигнал в разные полупериоды модуляции и программно изменять режим измерений. Автором разработаны как аппаратные средства, так и программное обеспечение этой системы. Всё это было успешно протестировано в течение достаточно долгого времени на радиотелескопе.

Возможности этой измерительной системы демонстрируются в третьей главе, где описывается её применение для радиоастрономических наблюдений на РАТАН-600. Приведён пример наблюдений радиоисточника 3C84 с использованием данной системы. Кроме того, здесь представлены результаты исследований шума вида  $1/f^\alpha$  в радиометрах, включая его моделирование для разных показателей степени. Такие исследования стали возможны, именно благодаря появлению измерительной системы, практически не имеющей собственного дрейфа нуля. Результаты этих исследований указывают, в частности, на необходимость уточнения источников такого шума в радиометре.

В последней, четвертой главе найдено, что шум вида  $1/f$  в радиометрах с современными усилителями на входе резко уменьшается при замене детекторов на диоде с барьером

Шоттки детекторами на обращённом туннельном диоде. Это довольно неожиданный результат, поскольку обычно считается, что основным источником такого шума являются флуктуации коэффициента усиления в ВЧ тракте радиометра. Тем не менее, внедрение детекторов на обращённом туннельном диоде в практику радиоастрономических наблюдений позволило автору значительно улучшить чувствительность системы, как можно видеть из приведённых записей.

Диссертация содержит также довольно объёмные приложения, посвящённые вопросам расчёта чувствительности радиометров, требованиям к усилению по низкой и высокой частоте, измерениям некоторых параметров радиометров и синхронному детектированию сигнала модуляционного радиометра. Эти приложения весьма полезны и могут служить справочным материалом по данным вопросам.

Суммируя, можно сказать, что в данной работе получен целый ряд новых важных результатов. В первую очередь к ним относятся следующее.

1. Впервые разработана и внедрена в практику радиоастрономических наблюдений универсальная прецизионная измерительная система, в которой практически отсутствует дрейф нуля. Это дает возможность реализации режима полной мощности в измерениях и, соответственно, повышения чувствительности. На этой основе проведена полная модернизация системы сбора данных и управления всех радиометров континуума РАТАН-600.

2. Выявлен и устранен основной источник шума вида  $1/f$  в радиометрах РАТАН-600. Показано, что использование детекторов на обращённом туннельном диоде вместо традиционных детекторов на диоде с барьером Шоттки резко уменьшает уровень такого шума.

3. Впервые на практике реализована чувствительность радиометра полной мощности на интервалах времени  $\sim 10$  секунд, что соответствует характерному времени наблюдений точечного радиоисточника на РАТАН-600. Таким образом значительно улучшены возможности радиотелескопа по исследованию слабых радиоисточников.

4. Работы автора по активной помехозащите позволили проводить радиоастрономические наблюдения на РАТАН-600 в условиях сложной помеховой обстановки.

В целом диссертационная работа производит очень хорошее впечатление своим комплексным, последовательным и хорошо обоснованным подходом к рассматриваемым проблемам. Все основные результаты диссертации успешно внедрены в практику радиоастрономических наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 и опубликованы в рекомендованных ВАК изданиях. Опыт эксплуатации разработанного оборудования, а также хорошее соответствие измеренных и расчётных характеристик радиометров подтверждают достоверность полученных результатов. Результаты работы могут быть использованы на многих других радиоастрономических инструментах. Стоит отметить и хорошее оформление диссертации.

К недостаткам диссертационной работы можно отнести следующее.

1. Непонятно, насколько общими являются результаты сравнения детекторов разного типа. Сам автор отмечает это в конце 4-й главы, указывая, что его выводы относятся только к той элементной базе, которая использовалась в радиометрах, описанных в данной работе. При этом непонятно и сколько детекторов каждого типа использовалось в описанных экспериментах. Поэтому применение этих результатов в других местах без предварительного исследования невозможно, хотя они и могут указать путь к повышению стабильности радиометров. В идеале хотелось бы иметь какое-то физическое объяснение наблюдаемым эффектам.

2. В работе нет сравнения детекторов разного типа по другим важным параметрам, в частности, по динамическому диапазону, который у детекторов на обращённом туннельном диоде, скорее всего, заметно меньше, чем у детекторов на диодах с барьером Шоттки.

3. Широко используемой характеристикой стабильности различных устройств является дисперсия Аллана. Она, конечно, связана со спектральной плотностью мощности шума, но позволяет более наглядно оценить временные интервалы стабильной работы радиомет-

ра. Было бы полезно привести её для исследуемых радиометров (это не замечание, а пожелание).

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Она является законченным научно-исследовательским трудом и удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Более того, объем и значимость представленных результатов значительно превышают эти требования, а работа соответствует, скорее, требованиям к докторским диссертациям. Автор данной работы, П.Г. Цыбулёв, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Зав. отделом ИПФ РАН  
доктор физ.-мат. наук



И.И. Зинченко

Подпись И.И. Зинченко заверяю.

Учёный секретарь ИПФ РАН  
доктор физ.-мат. наук



В.Е. Шапошников