

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Цыбулёва Петра Григорьевича «Развитие систем регистрации радиоастрономических данных и повышение чувствительности радиотелескопа РАТАН-600», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 (астрофизика и звездная астрономия)

Диссертация посвящена актуальным новым разработкам и развитию систем и методов регистрации и обработки радиоастрономических данных, внедренных на всех многочастотных приемных комплексах радиотелескопа РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории РАН для задач исследования галактического и внегалактического радиоизлучения в непрерывном спектре с 1995 года. В настоящее время внедренными разработками диссертанта на телескопе охвачено 30 радиоастрономических приемников в диапазоне частот от 0.5 до 30 ГГц.

Диссертация состоит из Введения, 4-х Глав, Заключения, 3-х Приложений и Списка литературы. Каждая Глава завершается разделом Выводы. В Главе 1 описано создание системы активного помехоподавления на 3-х дециметровых длинах волн – на основе применения появившихся тогда цифровых сигнальных процессоров. Система успешно решала свои задачи в период с 1995 по 2010 год, фактически продлив радиотелескопу на 15 лет "жизнь" в дециметровом диапазоне на фоне резкого возрастания помех и лидирующее положение в быстрых измерениях астрономических объектов на многих частотах в широком диапазоне длин волн. С 1995 года по настоящее время диссертантом создано также несколько поколений систем регистрации радиоастрономических данных. На этих разработках построена новая прецизионная измерительная система для радиоастрономических приемников, включившая в себя современную малошумящую последетекторную часть радиометра. Это дало возможность унифицировать систему регистрации радиоастрономических данных и внедрить ее массово на телескопе, повысив точность и долговременную стабильность измеряемых сигналов (Глава 2). В Главе 3 исследован известный аномальный компонент $1/f$ спектра мощности собственного шума, ухудшающий чувствительность и радиометра, и измерительной системы. Применением современных прецизионных усилителей постоянного тока с автоматической коррекцией нулевого уровня сигнала диссертант практически устранил этот компонент шума в построенной им измерительной системе. Дальнейшее использование этой измерительной системы позволило ему установить и впервые устранить основной источник аномального спектрального компонента шума в радиометре полной мощности (Глава 4).

Экспериментируя с квадратичными детекторами в приемнике, построенными на обычно применяющихся в настоящее время диодах с барьером Шоттки, и с детекторами на обращенном туннельном диоде, изготовленными и установленными в радиометр диссертантом, соискатель обнаружил резкое снижение вклада аномального компонента шума. Это позволило ему впервые реализовать на практике простейшую схему детекторного приемника (с СВЧ предусилителем) с чувствительностью, близкой к теоретической на временах накопления до 10 с, которая, как известно, до двух и более раз

превышает чувствительность остальных известных типов приемников. На временах накопления от 10 с до 100 с чувствительность реализованного им приемника оказалась не хуже часто применяющегося приемника модуляционного типа.

Не умаляя заслуг диссертанта, вместе с тем следует отметить (и соискатель это делает сам на с. 22-24 и 84-85 диссертации), что о детекторах на диодах Шоттки как источниках с доминирующим вкладом спектрального компонента шума вида $1/f$ упоминалось в литературе и ранее, в том числе при разработке высокочувствительных радиометров для известного космического проекта «Планк». Более того, и детекторы на туннельных диодах тоже ранее использовались.

*Вместе с тем, если судить по широко известным статьям и монографиям (в т.ч. за последние годы), по-видимому, никому до диссертанта не удавалось получить длительный положительный эффект для такой схемы приемника с чувствительностью, близкой к теоретической на временах накопления до $(10 \div 100)$ с – по крайней мере, в радиоастрономическом ее применении, по конкретным астрономическим источникам, что представляется особенно важным для работы, защищаемой по техническим наукам астрофизической специальности. Причина может быть связана с комплексным подходом соискателя к эксперименту – вероятно, никто не использовал для приемника полной мощности комбинацию диссертанта: совокупность детектора на туннельном **обращенном** диоде одновременно с малошумящей постдетекторной измерительной системой, построенной на основе **современных** усилителей постоянного тока с **автоматической коррекцией нуля**.*

Похоже, что именно эта одновременная комбинация позволила значительно уменьшить шумы системы, связанные с вкладом от аномальных собственных шумов радиометра: частота возрастания спектра мощности уменьшилась от $(10 \div 100)$ Гц в известных лучших приемниках до 0.1 Гц у диссертанта (см. рис. 4.3 в Главе 4 диссертации). При этом существенно, что работа диссертанта не завершилась результатами лабораторных экспериментов, а «вылилась» в им же разработанные и установленные на РАТАН-600 современные измерительные программируемые модули (см. рис. 2.5), которые можно тиражировать и использовать как на других телескопах, так и в других областях измерений. Интересно и важно было бы продолжить такие исследования для дальнейшего увеличения времени накопления сигнала. Поэтому, оставляя на будущее тонкие вопросы приоритета, по ряду признаков можно заключить, что в любом случае диссертант нашел собственное оригинальное решение и в истории практического применения приемника полной мощности оно займет достойное место.

К основным замечаниям по диссертации можно отнести следующие.

1. По существу: в отличие от использования приемников с диаграммной модуляцией, можно ожидать заметного влияния погодных условий на чувствительность телескопа – особенно при работе с простейшим приемником полной мощности на длинах волн короче 2 см – из-за флуктуаций шумов *атмосферы*. В меньшей степени этого можно ожидать для РАТАН-600 (благодаря сравнительно большому раскрытию его антенны), в большей – для малых и средних антенн. Может потребоваться и усложнение простой однорупорной схемы приема переходом на балансную или корреляционную двухрупорную схему.

2. По оформлению: хорошее впечатление от высокого качества иллюстративного материала несколько портит включение внутрь некоторых рисунков пояснений на иностранном языке. При этом, представленный под рисунком перевод хоть и улучшает понимание, но иногда сильно увеличивает объем подрисовочной подписи.

Сделанные замечания практически не влияют на общее положительное заключение и хорошее впечатление от работы, результаты которой уже используются во всех плановых наблюдательных программах (см. с. 8-11) и, есть основания полагать, будут цитироваться и эффективно применяться в радиоастрономии и радиометрии в дальнейшем.

В **Заключение** перечислим 3 ключевых результата диссертации, каждый из которых мог бы стать предметом отдельной диссертации:

- 1) при основном участии диссертанта в программной части разработки – включая программирование им сигнальных процессоров – создана и внедрена система активной помехозащиты приемников дециметровых длин волн РАТАН-600, что на 10 лет продлило радиоастрономические измерения на радиотелескопе в этих диапазонах;
- 2) диссертант разработал и внедрил прецизионную измерительную систему и основанную на ней систему сбора радиоастрономических данных и управления практически всеми приемниками радиоизлучения на телескопе (30 радиометрами, размещенными в трех приемных комплексах в настоящее время) – все данные наблюдений радиотелескопа за 15 лет записаны с помощью нескольких поколений данной системы;
- 3) диссертант выполнил важные лабораторные эксперименты, в результате которых:
а) устранил основной источник аномального шума вида $1/f$ радиометра, б) показал, что применение детекторов на основе туннельных обращенных диодов вместо обычно используемых детекторов на диодах Шоттки резко снижает такой шум в важной простейшей схеме детекторного приемника («приемника полной мощности»), в) впервые практически реализовал в радиоастрономических измерениях чувствительность идеального радиометра полной мощности на типовых для РАТАН-600 масштабах времени порядка 10 с, а на временах до 100 с получил чувствительность выше, чем у модуляционного приемника; результаты успешно внедрены им в работу 3-х высокочувствительных радиометров РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн (из-за практической важности применений уже один этот результат, как представляется оппоненту, вполне мог бы претендовать и на степень доктора наук).

Новизна ключевых результатов диссертации определяется новизной технических решений и радиоастрономических применений, а также перспективностью разработок диссертанта на РАТАН-600 при решении задач в различных областях радиоастрономии (см. перечень на с. 11 диссертации). Внедрение этих разработок повысило чувствительность телескопа (см. примеры наблюдений точечного радиоисточника на Рис. 4.4 и 4.5) и уже привело к новым астрофизическим результатам, которые невозможно было бы получить в полной мере без использования основных результатов диссертации. Выносимые на защиту основные положения, научно-технические результаты, выводы и рекомендации хорошо **обоснованы**, их **достоверность** подтверждается представленными в работе публикациями соискателя, других авторов и согласием выполненных им расчетов с измерениями – лабораторных, антенных и по астрономическим объектам.

А.В. Захаров