

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВСЕВОЛОДА СЕРГЕЕВИЧА ТРОИЦКОГО (К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

А.Г.Кисляков

Нижегородский государственный университет

Жизнь и научная деятельность В.С.Троицкого неразрывно связаны с Нижегородским (Горьковским) госуниверситетом им. Н.И.Лобачевского. Выпускник физико-математического факультета ГГУ (1941 г.), он поступает после работы в годы Отечественной войны на Заводе им. В.И.Ленина в аспирантуру при радиофизическом факультете ГГУ. Факультет был организован по инициативе академика А.А.Андропова, профессоров Г.С.Горелика и М.Т.Греховой в 1945 г. По окончании аспирантуры он становится заведующим научно-исследовательским отделом Горьковского физико-технического института (ГИФТИ) при ГГУ (1948–1956). В этот же период он начинает руководить кафедрой радиотехники радиофизического факультета ГГУ (1953–1960). Интенсивная работа в ГИФТИ и на кафедре позволили В.С.Троицкому выполнить ряд прикладных научно-исследовательских работ, определивших, вместе с работами отдела, возглавляемого профессором М.Т.Греховой, основную тематику организованного ею в 1956 г. Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) при ГГУ. Помощниками М.Т.Греховой в организации НИРФИ были М.М.Кобрин, В.С.Троицкий и А.А.Рябов. Дальнейшая научная деятельность В.С.Троицкого, основным направлением которой была, безусловно, радиоастрономия, проходила в НИРФИ.



Развитие радиоастрономических исследований в Горьком было начато в 1946 г. профессорами М.Т.Греховой и Г.С.Гореликом в руководимых ими отделах ГИФТИ,

а также на кафедрах электродинамики и общей физики ГГУ. Начальный период становления радиоастрономических исследований и их дальнейшее развитие в Горьком вплоть до 1983 г. подробно описаны в очерке [1].

Уже в своей кандидатской диссертации (1950 г., первая в стране диссертация по радиоастрономии!), под руководством проф. Г.С.Горелика, Всеволод Сергеевич закладывает основы СВЧ-радиометрии и ее применений в прикладной и фундаментальной науке. Он разрабатывает радиометры метрового диапазона, считавшегося в то время перспективным для радиоастрономии. Большой опыт практической работы, приобретенный им в годы пребывания в ЦВИРЛ и на Заводе им. В.И.Ленина, помогает ему создавать радиометры, соответствующие уровню приборостроения в стране. При этом ставятся и решаются теоретические задачи, которые возникали при реализации необходимых параметров радиометров – чувствительности, стабильности, точности и т.п. Фактически были созданы теория и методы измерения параметров сигналов со сплошным спектром, интенсивность которых существенно ниже уровня шумов приемных устройств.

Вслед за разработкой радиометров начались их практические применения на организованном ГИФТИ в 1949 г. радиоастрономическом полигоне “Зименки”. Здесь были поставлены эксперименты по измерению рефракции и поглощения радиоволн в атмосфере, исследовалось радиоизлучение Солнца и Луны, а позднее – космических дискретных источников. Радиометрические исследования атмосферы в дальнейшем оформились в виде самостоятельного научного направления, но физические основы этого метода разрабатывались в отделе В.С.Троицкого [2].

Всеволод Сергеевич, несомненно, обладал способностью к выбору перспективных направлений исследований, и в его деятельности можно выделить несколько продолжительных “циклов” по решению актуальных научных проблем (эти циклы могли и перекрываться). Одним из самых ярких был цикл исследований радиоизлучения Луны (1953–1970). Вначале Луна использовалась как источник радиоизлучения для измерений атмосферного поглощения и рефракции. При этом, еще в 1952 г. было установлено, что на волне ~10 см радиотемпература Луны практически не зависит от ее фазы. Это объяснялось тем, что радиоизлучение на этой волне генерируется в глубоких слоях коры, куда не проникают тепловые возмущения, вызванные инсоляцией. В 1954 г. В.С.Троицкий публикует в *Астрономическом журнале* работу по теории радиоизлучения Луны [3]. В этой основополагающей работе сформулированы задачи и оценены возможности радиоастрономических исследований Луны. Годом позже выходит статья [4], в которой приводятся результаты наблюдений фазового хода радиоизлучения Луны на волне 3,2 см, измеренного впервые в мире. Эти данные позволили В.С.Троицкому сделать определенные выводы о строении верхнего покрова Луны. Однако основная работа была впереди. В ближайшее десятилетие в НИРФИ разрабатываются аппаратура и антенны для наблюдений радиоизлучения Луны в диапазоне длин волн от 0,87 мм до ~50 см (примерно на 12-ти волнах в этом интервале), организуется несколько экспедиций (в том числе в горные районы) для наблюдений лунных циклов и затмений. К 1963 г. были обобщены [5] данные систематических наблюдений Луны, которые позволили

определить физические свойства ее коры на глубине до ~50 м. Все эти работы велись со значительным опережением аналогичных исследований за рубежом.

Исследования физических свойств лунной коры, выполненные под руководством В.С.Троицкого, можно разделить на 2 этапа.

- 1) Определение теплофизических характеристик ее верхнего слоя толщиной до ~10 м по данным “относительных” (с точностью 10–15%) измерений интенсивности радиоизлучения Луны в интервале длин волн 0,087–10 см при наблюдении лунных циклов и затмений. Эти данные позволили отвергнуть “пылевую” модель лунной коры, доказали высокую несущую способность лунного грунта и выявили его неоднородность в самой верхней части (в слое толщиной ~1 см).
- 2) Прецизионные (с точностью 2–4%) измерения постоянной составляющей радиотемпературы Луны в интервале длин волн 0,4–50 см, которые привели к обнаружению потока тепла из недр Луны. Последний результат был зарегистрирован в СССР в 1962 г. как открытие (авторы В.С.Троицкий и В.Д.Кротиков).

Все без исключения результаты исследований теплофизических характеристик лунного грунта, полученные группой В.С.Троицкого, были позднее подтверждены данными космических экспедиций. Более того, данные о прочности лунного грунта использовались в СССР при проектировании космических аппаратов и “лунохода”, направляемых для посадки на поверхность Луны. Аналогичная программа исследований лунного грунта велась в США (проект SURVEYOR, руководитель проф. Джаффе). Проф. Джаффе посетил НИРФИ для ознакомления с работами В.С.Троицкого, после чего Всеволод Сергеевич был приглашен в США для чтения лекций по проблемам, касающимся Луны.

Исследования радиоизлучения Луны, выполненные группой В.С.Троицкого, получили признание коллег и в СССР. Цикл этих работ выдвигался на соискание Ленинской и Государственных премий.

Полностью оригинальными были отмеченные выше прецизионные измерения спектра постоянной составляющей радиотемпературы Луны, основанные на методе сравнения ее радиоизлучения с излучением эталонных “чернотельных” дисков, имеющих угловые размеры Луны и расположенных в волновой зоне антенны радиотелескопа [6]. Метод и получил название “метода искусственной Луны”. Для осуществления этого метода был необходим определенный рельеф местности, в связи с чем В.С.Троицкий организовал специальную радиоастрономическую станцию в Крыму вблизи горы Кара-Даг. В дальнейшем метод искусственной Луны использовался для высокоточных измерений эффективной температуры распределенного радиоизлучения Галактики, а также потоков дискретных источников, в результате чего были созданы их каталоги. Третье, практически очень важное применение метода искусственной Луны заключалось в определении параметров антенн; это применение также получило дальнейшее развитие в работах В.С.Троицкого и его учеников. Наконец развитый в работах “лунного цикла” подход к исследованию теплофизических характеристик космических тел, не имеющих плотных атмосфер, был в дальнейшем распространен на Марс и Меркурий.

Разработки радиометров, антенных систем и методов радиоастрономических измерений, выполненные в процессе исследования Луны, нашли широкое применение в радиофизике и СВЧ-технике. Примером могут быть упомянутые выше методы измерения параметров антенн [7,8]. В.С.Троицкий и В.А.Разин предложили и осуществили метод определения КПД антенн по их собственным тепловым шумам. Реализация низкошумящих приемных систем для радиометров потребовала исследования шумов автогенераторов, используемых в качестве гетеродинов. В.С.Троицкий выполнил измерения шумов клистронных генераторов, а также провел теоретические исследования шумов автогенераторов на основе оригинального спектрального подхода.

В этот же период (1956–1963) В.С.Троицкий проводит чрезвычайно перспективное теоретическое и экспериментальное исследование молекулярных генераторов на NH_3 (линия 1,25 см). Особенной важной с практической точки зрения была разработка теории флуктуационных процессов в молекулярных генераторах. Были также впервые измерены флуктуации частоты колебаний молекулярного генератора. В результате выяснились возможности использования таких генераторов в качестве стандартов частоты. На основе полученных им радиоастрономических и радиофизических результатов исследований В.С.Троицкий подготавливает и успешно защищает в ФИАНе диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (1962 г.).

Всеволод Сергеевич никогда не терял связи с отраслевыми научно-исследовательскими институтами и передал им несколько своих разработок этого периода. Внедрением в горьковских институтах завершилась разработка серии радиометров сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн, а также молекулярного генератора на аммиаке. Работы по радиометрии привели также к постановке как теоретических, так и экспериментальных исследований по пассивной радиолокации; эти разработки были переданы оборонной промышленности.

Лунная и планетная тематика подходила к ее логическому завершению, и В.С.Троицкий начинает новое направление радиоастрономических исследований. Идея создания интерферометров с автономной регистрацией сигнала (или, как они назывались в дальнейшем, “радиоинтерферометров со сверхдлинной базой” –РСДБ) не принадлежит Всеволоду Сергеевичу, но он одним из первых реализует практически такую систему. В период 1965–81 г.г. создана аппаратура для РСДБ на частотах 6, 9, 25, 86, 327, 408, 5300 и 22235 МГц. С 1969 г. начаты наблюдения космического радиоизлучения на крупных радиотелескопах страны (совместно с другими радиоастрономическими группами). Впервые измерен угловой размер источника Кассиопея А на дециметровых волнах. Проведены наблюдения космических мазеров в линии H_2O с угловым разрешением $\sim 10^{-3}$ минут дуги. Разработаны основы нового научного направления – прецизионной радиоастрометрии. Первенство Горьковской группы в создании этого направления признано научной общественностью [9]. Определены практические применения этого направления: измерения скорости вращения Земли и определение движения ее полюсов, изучение приливов в земной коре, тектонических и сейсмических проявлений и т.п.

Создание систем РСДБ требовало усилий больших коллективов исследователей, организация их работы занимали у В.С.Троицкого много времени. Тем не менее он всегда находил время для индивидуальной научной работы. В этот период он увлечен проблемой поиска внеземных цивилизаций (СЕТИ). Всеволод Сергеевич анализирует гносеологическую сторону проблемы [10], ставит эксперименты по обнаружению сигналов предположительно искусственного происхождения [11]. Он предлагает и обоснованные программы поиска внеземных цивилизаций [12]. Эти программы являются, в какой-то мере, результатом обсуждения проблемы СЕТИ на многочисленных международных симпозиумах. Кроме того, В.С.Троицкий длительное время руководил работой секции “Поиски сигналов от внеземных цивилизаций” Научного совета РАН по проблеме Радиоастрономия. Видимо, эволюция взгляда на проблему СЕТИ привела в дальнейшем к изменению названия секции, она стала называться “Поиски космических сигналов искусственного происхождения”.

Насколько я помню, именно проблема СЕТИ натолкнула Всеволода Сергеевича на постановку экспериментов по обнаружению спорадического излучения атмосферы Земли. Вначале эта задача ставилась как поиск импульсного космического излучения, возможно, искусственного происхождения [13]. Для поиска таких сигналов использовались всенаправленные антенны, разнесенные в пространстве. Отождествление сигналов производилось по времени их совпадения. Авторы работы пришли к выводу, что они обнаружили новый вид спорадического излучения, генерируемого в верхней атмосфере Земли под воздействием солнечного корпускулярного излучения [14]. В дальнейшем эта работа перешла в разряд атмосферных исследований.

Начиная с 1978 г. В.С.Троицкий ставит принципиально новую задачу, лишь косвенно связанную с радиоастрономией, – исследование теплового радиоизлучения тела человека с целью диагностики заболеваний внутренних органов. Связь с радиоастрономией только в том, что для “радиотермометрии” тела человека используются радиометры – те же приборы, что и в радиотелескопах. Эта связь побудила некоторых газетчиков объявить, что “радиоастрономы повернули антенны от звезд к людям”. На самом деле радиоастрономам пришлось потрудиться, чтобы сделать специальные антенны для измерений теплового излучения тела человека.

Под руководством В.С.Троицкого в НИРФИ был организован научный отдел, целью которого была радиотермометрия человеческого тела. Использовались радиометры дециметрового диапазона для неинвазивных измерений температуры тканей тела на глубине 3–5 см (в том числе, температуры мозга) [15]. Разработка была настолько успешной, что позволяла определять температуру внутренних органов с точностью до 0,1–0,2 °С. Приборы экспонировались на ВДНХ и были отмечены медалями высокого достоинства. Секрет успеха заключался в удачной методике калибровки радиометров, а также в адекватном моделировании объекта измерений (двухслойная модель тканей [16]). Эти исследования Всеволода Сергеевича также завершились внедрением разработок в промышленности и появлением серийных приборов медицинского назначения.

Мы подходим к заключительному этапу научной деятельности В.С.Троицкого, когда он сосредоточил свои силы на построении альтернативной модели Мира. К

этому его побудили известные расхождения в наблюдательных следствиях между общепринятой релятивистской космологической моделью и результатами эксперимента. К таким расхождениям можно отнести зависимости многих параметров источников радиоизлучения от красного смещения. Результаты измерений нередко лучше согласуются со стационарной моделью Вселенной. Это можно было бы считать каким-то эффектом селекции, поэтому Всеволод Сергеевич организовал обработку огромных массивов данных наблюдений по квазарам и радиогалактикам и показал, что расхождения имеют принципиальный характер. Ему удалось согласовать многие астрофизические данные в предположении, что закон Хаббла не отражает всеобщего расширения Вселенной, а является следствием “старения” фотонов. Эту точку зрения пока не приняли астрофизики нашей страны. Работы В.С.Троицкого опубликованы только за рубежом [17,18]. Но нельзя считать его теорию и опровергнутой, поскольку простое неприятие, без должной открытой дискуссии, ничего не доказывает.

Последняя работа В.С.Троицкого была опубликована в год его кончины, в год его 83^х-летия. Можно только позавидовать научному долголетию Всеволода Сергеевича.

Вклад В.С.Троицкого в развитие радиоастрономии и радиофизики в стране, а также создание мощной научной школы, развивающей его идеи и продолжающей начатые им исследования, были признаны в СССР. В.С.Троицкому была присуждена золотая медаль им. А.С.Попова, одна из высших наград АН СССР. В 1970 г. Всеволода Сергеевича избирают членом-корреспондентом АН СССР, а годом позже ему присваивают почетное звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

Жизнь и творчество В.С.Троицкого могут служить примером бескорыстного и самоотверженного служения науке и обществу; примером, которому должно следовать ученым, вступающим на такой путь.

Автор признателен А.В.Троицкому за помощь в подборке материалов о жизни и деятельности В.С.Троицкого.

- [1] Кисляков А.Г., Разин В.А., Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. Радиоастрономические исследования в Горьком. //В кн.: Очерки истории радиоастрономии в СССР. –Киев: Наукова Думка, 1985, с.79–108.
- [2] Жевакин С.А., Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. //Изв. вузов. Радиофизика 1958. Т.1. С.19–26.
- [3] Троицкий В.С. //Астрон. Ж. 1954. Т.31. С.511–528.
- [4] Троицкий В.С., Зелинская М.Р. //Астрон. Ж. 1955. Т.32. С.550–554.
- [5] Кротиков В.Д., Троицкий В.С. УФН. 1963. Т.81(4). С.589–639.
- [6] Кротиков В.Д., Порфирьев В.А., Троицкий В.С. //Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т.4. С.1004.
- [7] Троицкий В.С. //Радиотехника и Электроника. 1956. Т.1. С.601.
- [8] Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т.4. С.393–414.
- [9] Развитие радиоастрономии в СССР (сборник статей) /Под ред. А.Е.Саломоновича. –М.: Наука, 1988, с.222.

- [10] Троицкий В.С. //Вопросы философии. 1980. С.1–22.
- [11] Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Герштейн Л.И. //Астрон. Ж. 1971. Т.48. С.645–647.
- [12] Троицкий В.С. //В кн. Проблема поиска жизни во Вселенной. –М.: Наука, 1986, с.227–230.
- [13] Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Бондарь Л.Н. //УФН. 1974. Т.113. С.719–723.
- [14] Бондарь Л.Н., Стрежнева К.М., Троицкий В.С. //Астрон. вестник. 1975. Т.9. С.210–217.
- [15] Троицкий В.С., Абрамов В.И., Белов И.Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т.24. С.118–121.
- [16] Троицкий В.С. К теории контактного радиометра. Препринт НИРФИ № 186. 1984. 39 с.
- [17] Troitsky V.S. //Astrophysics & Space Science. 1987. V.139. P.389–411.
- [18] Troitsky V.S. //Astrophysics & Space Science. 1996. V.240. P.89–121.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА НЕГАУССОВЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ СВОЙСТВ НЧ ШУМА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

А.В.Беляков, А.В.Моряшин, М.Ю.Перов, А.В.Якимов¹⁾; Л.К.Дж.Фандамме²⁾

¹⁾Нижегородский госуниверситет

²⁾Технологический Университет Эйндховена (Нидерланды)

Введение

В большинстве случаев НЧ шум полупроводниковых приборов имеет фликкерный или $1/f$ вид. Изучение статистических характеристик $1/f$ шума может дать дополнительную информацию о механизме его возникновения и свойствах полупроводников. Существует “нулевая” гипотеза о гауссовости и стационарности исследуемого $1/f$ шума [1].

Ранее исследовался $1/f$ шум в *GaAs* эпитаксиальных пленках. Результаты анализа погрешности измерения интенсивности фильтрованного фликкерного шума в этих пленках и в других обследованных полупроводниковых приборах показывают, что “нулевая” гипотеза не выполняется, то есть $1/f$ шум не является стационарным гауссовым [1].

Предметом настоящей статьи являются инструменты для анализа негауссовых и нестационарных свойств НЧ шума. В качестве инструментов, предназначенных для изучения природы НЧ шумов и проверки “нулевой” гипотезы, рассматриваются следующие методы:

- 1) измерение гистограммы, моментов и кумулянтов [1];
- 2) анализ флуктуации интенсивности фильтрованного шума [1];
- 3) измерение коэффициента корреляции между интенсивностями шума на выходах двух полосовых фильтров [2];
- 4) измерение комплексного биспектра [3].

Предполагается, что источником $1/f$ шума являются подвижные дефекты. В рассматриваемой здесь модели каждый дефект может находиться в одном из двух метастабильных состояний, и представлен двухуровневой системой (ДУС) [4]. Переходы дефекта из одного состояния в другое происходят сколь угодно быстро и описываются случайным телеграфным процессом (СТП). Поскольку в полупроводнике существует определенное количество дефектов, шум образуется суперпозицией (ансамблем) СТП. При небольшом количестве дефектов такой шум вполне может быть негауссовым. Изменение эффективного числа дефектов, а также их диффузия внутри образца могут привести к нестационарности шума.

Нестационарность шума может быть исследована, например, при помощи анализа корреляции между интенсивностями шума на выходах двух не перекрывающихся полосовых фильтров.

Данные методы имеют различную чувствительность к негауссовости шума. Гистограмма, моменты и кумулянты случайного процесса являются одномоментными характеристиками, показывают связь нулевого порядка между временными отсчетами шума и отражают отклонение от гауссова процесса.

Спектр характеризует линейную связь между отсчетами процесса и используется при измерении статистических характеристик шума в этих методах, т.е. используется при измерении интенсивности (мощности) шума на выходе фильтра.

Биспектр характеризует связь второго порядка, связанную с несимметричностью распределения шума, то есть определяет статистическую связь между тремя отсчетами шума и является Фурье-преобразованием кумулянтной функции третьего порядка.

Погрешность измерения интенсивности фильтрованного шума и коэффициент корреляции между интенсивностями шума на выходах неперекрывающихся фильтров отражает связь третьего порядка или связь между четырьмя отсчетами случайного процесса. Поскольку погрешность измерения фильтрованного шума определяется дисперсией дисперсии шума, а коэффициент корреляции характеризует взаимную ковариационную функцию дисперсии шума на выходах фильтра, то результаты исследования шума в данных методах определяются кумулянтной функцией четвертого порядка.

Здесь производится сравнение разных методов анализа НЧ шума, их достоинств и недостатков. Приводятся результаты применения этих методов для исследования НЧ шума *GaAs* лазеров на квантовых ямах [5], изготовленных в Нижегородском физико-техническом институте при ННГУ.

Структура лазера приведена на рис.1. Она имеет следующий состав (снизу вверх):

- Подложка n^+ -*GaAs* (1.0.0) (толщина $d = 160$ мкм).
- Буферный слой n^+ -*GaAs* (концентрация основных носителей $n = 10^{18}$ см⁻³, подвижность $\mu = 2000$ см²/В·с, $d = 700$ нм).
- Два широкозонных ограничивающих слоя *InGaP*, зеркала ($n = p = 10^{18}$ см⁻³, $\mu_n = 700$ см²/В·с, $\mu_p = 35$ см²/В·с, $d = 500$ – 550 нм).
- Волноводный слой *GaAs* ($d = 750$ – 800 нм), содержащий две *In_{0.2}Ga_{0.8}As* квантовые ямы толщиной 9 нм вблизи середины области.

- Контактный слой $p^+ - GaAs$ ($p = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $\mu = 100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $d = 500\text{--}550 \text{ нм}$).

В эксперименте НЧ шумовое напряжения лазера усиливалось. Затем оно оцифровывалось при помощи 24-х разрядной платы аналогового ввода-вывода ADS224х48 и записывалось на жесткий диск компьютера реализациями по 1 млн. отсчетов с частотой 48 кГц. Таким образом, длительность одной реализации шума составляет 21 с. Обработка данных осуществлялась на основе вышеприведенных методов при помощи многофункционального анализатора [6], выполненного в программной среде LabVIEW.

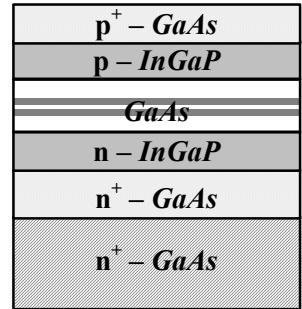


Рис.1

Оциллограмма, гистограмма, кумулянты и спектр шума лазера

В исследуемой оциллограмме НЧ шума лазера в светодиодном режиме при $I = 0,2 \text{ А}$ не обнаружено выбросов и заметных отклонений процесса, свидетельствующих о негауссовости или нестационарности шума.

Гистограмма этой реализации изображена на рис.2. График приведен в следующих координатах: по оси ординат в логарифмическом масштабе отложена гистограмма $1/f$ шума, по оси абсцисс с учетом знака отложено значение квадрата процесса.

Гистограмма используется для оценки плотности вероятности шума и показывает относительное количество отсчетов, попадающих в заданный интервал значений. Информация о негауссовости шума, как видно из рис.2, заключается в “хвостах” распределения, где находится малое количество отсчетов измеренного процесса, что обуславливает низкую точность оценки. Например, при полном количестве отсчетов 10^6 в интервал значений оценки плотности вероятности вблизи 10^{-6} попадает только один отсчет шума, что соответствует 100% погрешности измерения.

Зависимость коэффициентов асимметрии и эксцесса шумового напряжения лазера №8 от тока через прибор приведена на рис.3. Первый участок соответствует безизлучательному режиму работы, второй – светодиодному, и последний – режиму индуцированного излучения лазера. Полученные данные для коэффициентов асимметрии и эксцесса имеют выбросы, отличные от нуля в разных режимах работы прибора. Наибольшие отклонения кумулянтов имеют место при индуцированном излучении лазера. Полученные данные характеризует негауссовость и/или нестационарность шума.

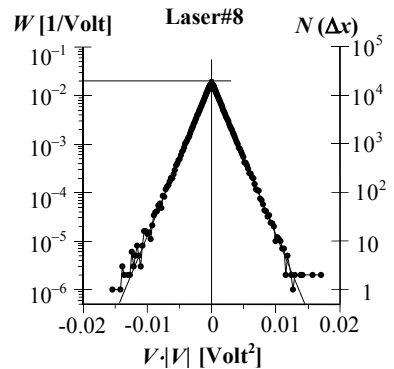


Рис.2

Спектры шумового напряжения лазера №8 в зависимости от тока через прибор приведены на рис.4. Шум имеет $1/f$ вид в диапазоне частот анализа от 1Гц до десятков килогерц в безизлучательном режиме работы прибора (на малых токах). В светодиодном режиме появляется плато на высоких частотах (жирные линии), и в режиме генерации лазерного или индуцированного излучения спектр становится равномерным (тонкие линии) с тенденцией к возрастанию на высоких частотах, то есть меняется физический механизм возникновения шума.

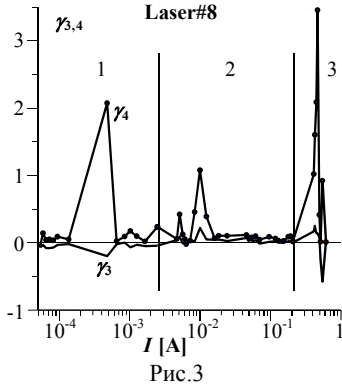


Рис.3

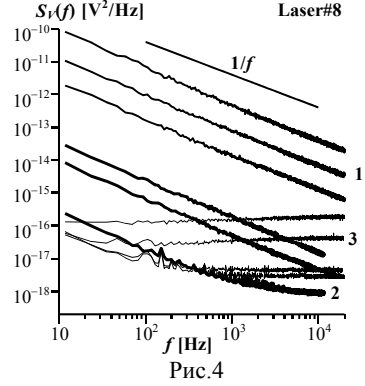


Рис.4

Погрешность измерения интенсивности фильтрованного шума

Допустим, что стационарный гауссов шум, обладающий нулевым статистическим средним, подаётся на вход полосового фильтра с полосой пропускания Δf . Фильтрованный шум поступает на квадратичный детектор, затем усредняется. Результатом измерения является случайная оценка интенсивности отрезка фильтрованного шума длительности t .

Погрешность оценки интенсивности определяется отношением дисперсии к ее среднему: $\epsilon_p = \sigma_p / \langle P \rangle$. Статистическое среднее этой оценки совпадает с дисперсией фильтрованного шума: $\langle P \rangle = \langle y \rangle = \sigma_x^2$, т.е. оценка является несмещенной.

Для оценки погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума вычисляется ширина доверительного интервала с выбранным уровнем вероятности p_c попадания экспериментальных данных в пределы интервала (здесь используется $p_c = 0.95$). Если примерно 5% данных находятся вне области, ограниченной интервалом, то выполняется нулевая гипотеза о гауссовости и стационарности шума. В противном случае, по крайней мере, одно условие не выполняется, нарушена стационарность или/и гауссовость шума.

В случае белого гауссова шума можно получить: $S_y(0) = (2S_0)^2 \cdot \Delta f = \sigma_x^4 / \Delta f$, что дает $\sigma_p^2 \approx \sigma_x^4 / (t \cdot \Delta f)$. Следовательно, погрешность измерения интенсивности фильтрованного белого гауссова шума имеет вид: $\epsilon_p^2 = \sigma_p^2 / \langle p \rangle^2 = 1 / (t \cdot \Delta f)$.

Если входной шум не дельта-коррелированный, то полоса пропускания фильтра заменяется эффективной шириной спектра шума на выходе фильтра Δf_x , и по-

грешность оценки интенсивности $\varepsilon_p = \sigma_p / \langle P \rangle$ для гауссова шума при $t \cdot \Delta f_x \gg 1$ определяется следующим соотношением:

$$\varepsilon_p = 1 / \sqrt{t \cdot \Delta f_x}, \quad \Delta f_x = \left[\int_0^\infty S_x(\omega) \frac{d\omega}{2\pi} \right]^2 / \int_0^\infty S_x^2(\omega) \frac{d\omega}{2\pi}. \quad (11)$$

В общем случае полуширина доверительного интервала ΔE определяется значениями теоретической погрешности ε_p и погрешностью оценки дисперсии интенсивности фильтрованного шума ε_w . Погрешность ε_p определяется эффективной шириной спектра фильтрованного шума Δf_x и временем анализа t . В эксперименте эффективная ширина спектра и полуширина доверительного интервала вычисляются при помощи цифрового спектра, выполненного на основе БПФ. Погрешность оценки дисперсии интенсивности ε_w вычисляется по отсчетам цифрового спектра.

Если почти 95% данных находится в пределах доверительного интервала, то есть $|\varepsilon_{exp}/\varepsilon_p - 1| < \Delta E$, то считаем, что нулевая гипотеза выполнена, и входной шум гауссов и стационарный.

Наиболее оптимальным фильтром для исследования шумов является, по-видимому, двухоктавный фильтр, поскольку он обеспечивает достаточно высокую выходную мощность. Одно-октавный фильтр обеспечивает низкую выходную мощность. Трехоктавный фильтр обеспечивает более высокую выходную мощность при низкой селективности.

Данный метод оценки негауссовости и/или нестационарности шума отличается существенно большей чувствительностью, чем метод, основанный на контроле одномоментных статистических характеристик шума (вероятностного распределения и кумулянтов).

Тест погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума напряжением лазера №8 в зависимости от количества усредняемых фрагментов реализаций приведен на рис.5. Серым цветом выделена область 95% доверительного интервала для данных погрешности гауссова стационарного шума. Длина одного фрагмента определяется порядком БПФ и здесь составляет 2048 отсчетов (длина реализации $2048 \cdot 488 = 1$ млн. отсчетов = 21 с). Лазер работал в светодиодном режиме при токе $I = 0,2$ А. Фильтр использовался в области $1/f$ шума, в полосе от 200 до 800 Гц. 54% данных для погрешности интенсивности фильтрованного шума лежат вне доверительного интервала, что отражает нарушение нулевой гипотезы о гауссовости и стационарности шума.

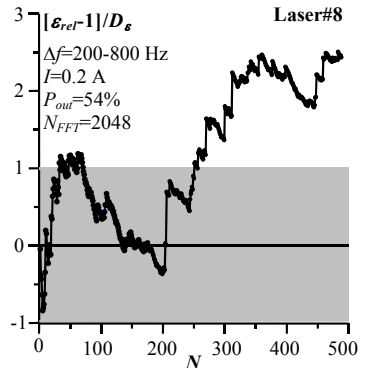


Рис.5

На рис.6 показана токовая зависимость погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума напряжения лазера №8, по отношению к доверительному интервалу. По вертикальной оси отложено (в процентах) относительное количество данных, лежащих вне 95% доверительного интервала. Здесь усреднялось 488 фрагментов реализаций шума, полоса фильтра та же. Почти все данные для погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума, лежащие вне доверительного интервала, составляют много более 5%, т.е. шум негауссов и/или нестационарен, что не отражается на гистограмме процесса и слабо характеризуется данными для 3-го и 4-го кумулянтов.

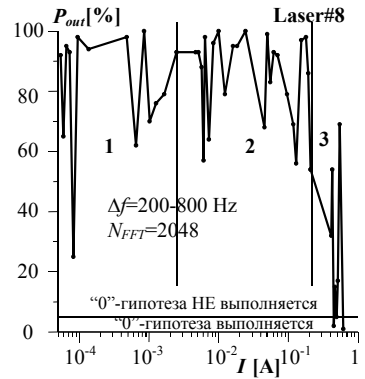


Рис.6

Коэффициент корреляции между интенсивностями шума на выходах двух неперекрывающихся полосовых фильтров

В данном методе исследуется корреляция между интенсивностями спектральных компонент шума на выходе двух полосовых фильтров с неперекрывающимися частотными характеристиками [2]. Поскольку экспериментальная оценка коэффициента корреляции является случайной величиной, в настоящей работе для указанной оценки вычисляется доверительный интервал с уровнем значимости 95%. Если исследуемый шум стационарный гауссовый, т.е. выполняется нулевая гипотеза, то коэффициент корреляции между интенсивностями шума на выходах полосовых фильтров равен нулю. В этом случае экспериментальные оценки коэффициента корреляции рассеяны в окрестности нуля, и примерно 95% данных находится в области, ограниченной доверительным интервалом. Если большая часть оценок находится вне интервала, либо все оценки находятся внутри доверительного интервала, то исследуемый шум следует считать негауссовым и/или нестационарным.

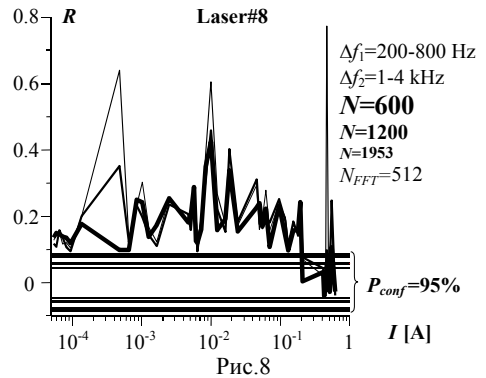
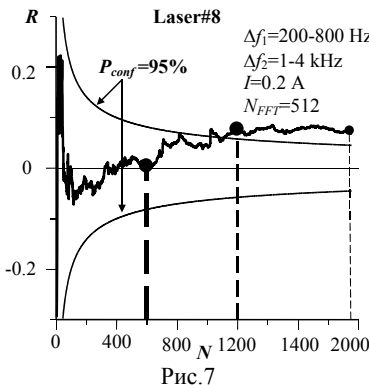
Рассмотрим коэффициент корреляции между флуктуирующими интенсивностями шума, пропущенного через два полосовых фильтра. Исследуемый шум $\xi(t)$, обладающий нулевым статистическим средним $\xi(t)=0$, подается на входы двух полосовых фильтров (Δf_1 и Δf_2) с неперекрывающимися частотными характеристиками. На выходах фильтров образуются процессы $x_1(t)$ и $x_2(t)$. В эксперименте усреднение по ансамблю реализаций заменяется усреднением по времени. Отрезок исследуемого шума, имеющий длительность T , подвергается быстрому преобразованию Фурье (БПФ). Полосовая фильтрация и вычисление оценок интенсивностей $y_1(k)$ и $y_2(k)$ осуществляется путём суммирования интенсивностей компонент быстрого преобразования Фурье исследуемого шума, частоты которых попадают в требуемый диапазон шириной Δf_1 и Δf_2 . При измерениях производится накопление отсчётов оценок коэффициента корреляции. Чем выше текущий номер оценки, тем выше ожидаемая точность указанной оценки.

Если шум стационарный гауссовый, то коэффициент корреляции равен нулю, а его оценка рассеяна в окрестности нуля. Следовательно, для интерпретации экспериментальных результатов необходимо вычисление доверительного интервала. Если выбран уровень значимости 95 %, то полуширина доверительного интервала равна удвоенному стандарту оценки коэффициента корреляции: $\Delta R = 2\sigma_p$ [2]. Поскольку частотные характеристики фильтров не перекрываются, то некоррелируемость отсчётов означает их статистическую независимость.

Особенность измерения интенсивности фильтрованного шума состоит в том, что при заданной длительности t обрабатываемой реализации точность измерений повышается только при увеличении полосы пропускания фильтра. С другой стороны, параметры фильтров не влияют на точность измерения коэффициента корреляции (1).

В случае измерения коэффициента корреляции между интенсивностями шума на выходах полосовых фильтров точность измерения можно повысить при фиксированной длительности t , применяя БПФ к возможно более коротким по длительности отрезкам шума. При этом необходимо учитывать, что чем короче длительность T отрезка исследуемого шума, подвергаемого БПФ, тем ниже частотное разрешение $df=1/T$.

Коэффициент корреляции между интенсивностями шума напряжения на выходе неперекрывающихся полосовых фильтров для лазера №8 в светодиоидном режиме работы ($I=0,2$ А) приведен на рис.7. По оси ординат отложена оценка коэффициента корреляции, по оси абсцисс – количество усредненных реализаций шума по $N_{FFT}=512$ отсчетов каждая. Две сплошные симметричные линии ограничивают доверительный интервал для 95% данных стационарного гауссового шума. Полосы пропускания фильтров находятся в области $1/f$ шума и составляют 200-800 Гц и 1-4 кГц. Примерно половина данных находится вне области, ограниченной доверительным интервалом. Оценка коэффициента корреляции менее чувствительна к негауссовости, чем оценка погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума, это видно из сравнения графиков.



На рис.8 показана токовая зависимость коэффициента корреляции между интенсивностями шума напряжения лазера №8 на выходах этих же фильтров для трех значений длин реализации: для 600 фрагментов по N_{FFT} кривая имеет наибольшую толщину, для $1200 \cdot N_{FFT}$ – среднюю, и для $1953 \cdot N_{FFT}$ – наименьшую при $N_{FFT} = 512$ отсчетов.

Оценка коэффициента корреляции имеет явную тенденцию к положительным значениям, что может быть обусловлено нестационарностью или негауссовостью исследуемого шума.

Измерение биспектра $1/f$ шума

По измеренным данным НЧ шума лазеров найдены оценки комплексного биспектра шума: абсолютное значение и бифаза [3]. Для оценки биспектра мы используем Фурье-преобразование $\chi_n(f)$ шума $v(t)$ на отрезке времени T :

$$\chi_n(f) = \int_{t+(n-1)T}^{t+nT} v(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Здесь $N \cdot T$ – полная длительность реализации шума, состоящая из N участков, используемых для получения набора усредняемых спектрограмм, t – время начала записи шума. Оценки спектра $S_v(f)$ и биспектра $B_v(f_1, f_2)$ шума приведены, соответственно, в выражениях (2) и (3):

$$S_v(f) = \frac{2}{NT} \sum_{n=1}^N |\chi_n(f)|^2, \quad (2)$$

$$B_v(f_1, f_2) \equiv B_v(f_1, f_2) | \exp[j\Phi_v(f_1, f_2)] = \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^N \chi_n(f_1) \chi_n(f_2) \chi_n^*(f_1 + f_2). \quad (3)$$

Здесь $|B_v(f_1, f_2)|$ и $\Phi_v(f_1, f_2)$ – абсолютное значение и бифаза биспектра процесса.

Биспектр представляет собой поверхность, определенную на плоскости частот Of_1f_2 . Диагональные сечения модуля биспектра шумов напряжения лазера №8 в зависимости от тока через прибор приведены на рис.9. Шум имеет $1/f$ вид в диапазоне частот анализа от 1Гц до десятков кГц в безызлучательном режиме работы прибора (две линии, соответствующие 1). В светодиодном режиме появляется плато на высоких частотах (толстые линии 2). В режиме генерации лазерного или индуцированного излучения распределение диагонального сечения модуля биспектра шума напряжения так же, как и у спектра, становится равномерным, с тенденцией к возрастанию на высоких частотах (тонкие линии 3).

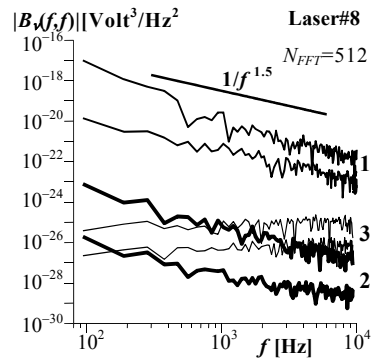


Рис.9

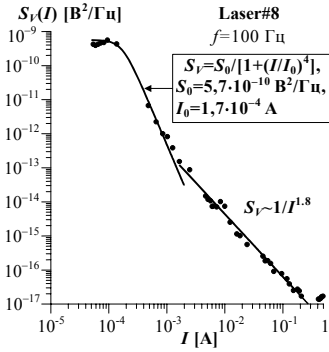


Рис.10

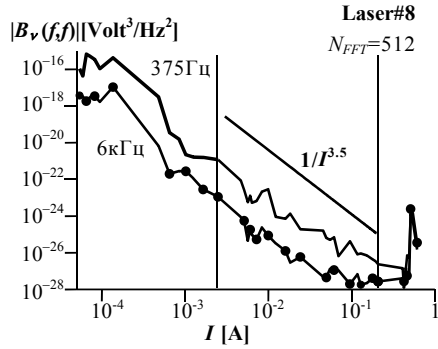


Рис.11

Из сравнения рис.10 и 11 видно, что в токовой зависимости диагонального среза модуля биспектра отсутствует разделение на два участка, наблюдаемое у спектра, т.е. отсюда можно предположить, что они отражают разные свойства шума.

Измерена бифаза шумового напряжения $\Phi_v(f_1, f_2)$. Она приведена на рис.12 и имеет вид случайной функции частот f_1 и f_2 . Величина диагонального сечения бифазы медленно меняется в течение нескольких периодов. Это означает, что биспектр измеренного шума $B_v(f_1, f_2)$ является комплексной функцией, причем действительная и мнимая части имеют как положительные, так и отрицательные значения.

Светлая область определяет интервал значений бифазы от $-\pi$ до π . Затемненные области показывают ее значения на дополнительных “положительных” и “отрицательных” периодах: период “+1” от π до 3π , период “+2” от 3π до 5π , период “-1” от -3π до $-\pi$.

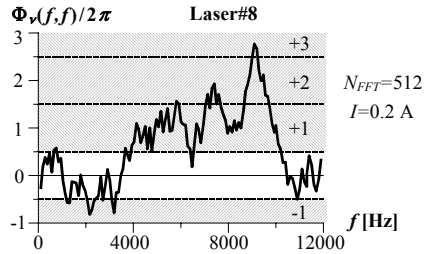


Рис.12

Выводы

Метод исследования негауссовости шума при помощи гистограммы, как оценки вероятностного распределения шума, груб, т.к. основная информация о негауссовости шума находится на “хвостах” распределения, где находится малое количество отсчетов измеренного процесса, что обуславливает низкую точность оценки.

Достоинством данного метода является простота, наглядность результата обработки. Большая погрешность результатов вычислений не позволяет сделать корректные выводы о степени негауссовости шума. Метод оценки гистограммы и одномоментных характеристик шума используется для грубой предварительной оценки параметров исследуемого процесса, для определения преобладающего типа не-

гауссовости – нарушения симметрии или наличие эксцесса, с целью выбора более точного метода исследования соответствующих свойств шума.

Метод измерения биспектра выявляет негауссовость шума, связанную с несимметричностью процесса.

Методы, основанные на оценке погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума, отражают негауссовость, связанную с появлением у процесса четвертого кумулянта. Оценка коэффициента корреляции менее чувствительна к негауссовости, чем оценка погрешности измерения интенсивности фильтрованного шума.

Таким образом, рассмотренные методы взаимно дополняют друг друга.

“Нулевая гипотеза” о гауссовости и стационарности НЧ шума в лазере на КТ не выполняется.

Для изучения нестационарности шума нужны дополнительные исследования.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 01-02-16666 и “Ведущие научные школы” НШ–1729.2003.2, а также программы НАТО “Наука для Мира”, проект SfP-973799 Semiconductors.

- [1] Yakimov A.V. and Hooge F.N. //Physica B. 2000. V.291. P.97–104.
- [2] Макаров С.В., Медведев С.Ю., Якимов А.В. //Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т.43, №11. С.1016–1023.
- [3] Yakimov A.V., Belyakov A.V., Perov M.Yu., Vandamme L.K.J. //Proc. SPIE. V.5115. Bellingham, WA, 2003. P. 368–378.
- [4] Orlov V.B., Yakimov A.V. //Physica B. 1990. V.162. P.13–20.
- [5] Avrutsky I.A., Dianov E.M., Zvonkov B.N., Zvonkov N.B., Malkina I.G., Maksimov G.A., Uskova E.A. //Quantum Electronics. 1997. V.27. P.118–121.
- [6] Андронов А.А., Беляков А.В., Гурьев В.А., Якимов А.В. //В кн.: Тр. 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP–973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Н.Новгород: ТАЛАН, 2002. С.38.