

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С.С. Шibaев, А.В. Помазанов, Б.Н. Вольфовский

**АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССОРЫ.
АЛГОРИТМЫ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ**

Таганрог
Издательство Южного федерального университета

2015

УДК 621.391.26

ББК 32.86

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **Румянцев К.Е.**;

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Пивоваров И.И.

Шибает С.С., Помазанов А.В., Вольфовский Б.Н.

Акустооптические процессоры. Алгоритмы и погрешности измерений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 212 с.

Описаны особенности построения и функционирования акустооптических измерителей частоты параллельного и последовательного типов. Систематизированы виды и причины погрешностей измерения частоты названными устройствами; описаны методы их минимизации. Приведены алгоритмические способы измерения частоты повышенной точности и варианты аппаратного расширения возможностей измерителей.

Рассчитано на студентов вузов радиоэлектронного и вычислительного профилей, а также на разработчиков измерителей параметров сигналов на акустооптической и другой элементной базе.

© С.С. Шибает, А.В. Помазанов,

Б.Н. Вольфовский, 2015

© ЮФУ, 2015

Введение

При выборе метрологического обеспечения измерений параметров сигналов определяющими аргументами в пользу того или иного технического решения являются широкополосность прибора, его быстродействие и точностные характеристики.

В настоящее время известно несколько типов измерителей параметров. Среди перспективных устройств отметим, прежде всего, многоканальный приёмник – многоканальный фильтр, появившийся исторически раньше прочих. Это также и приёмник мгновенного измерения частоты, в котором осуществляется слежение за зависящим от частоты значением разности фаз между задержанным и незадержанным сигналами. Это акустооптический (АО) измеритель параметров сигналов (АОИПС), обладающий уникальной возможностью измерения мгновенного спектра фрагмента сигнала, находящегося в апертуре АО-дефлектора (АОД). Отметим также приёмник со сжатием импульсов, использующий дисперсионные линии задержки на поверхностных акустических волнах в сочетании с высокоскоростной цифровой обработкой, и процессор, выполняющий быстрое преобразование Фурье.

Следует отметить, что развитием существующих и поиском новых технических решений по измерению параметров сигналов интенсивно и систематически занимаются как у нас в стране, так и за рубежом. При этом мнения специалистов относительно преимуществ и недостатков названных типов измерителей и вытекающих отсюда концепций построения аппаратуры неоднозначны и непостоянны. Эти мнения (как во всяком динамически развивающемся процессе) пересматриваются и меняются с появлением и развитием новой элементной базы, появлением прогрессивных технических решений и появлением в связи с этим новых возможностей по созданию новой и модернизации существующей аппаратуры.

Некоторые специалисты считают наиболее перспективными частотно-определяющими устройствами многоканальные приёмники, базирующиеся на современных достижениях технологии изготовления фильтров на поверхностных акустических и магнитостатических волнах или на микрополосковых линиях. Появление перечисленных компонентов оживило интерес к таким приёмникам и инициировало предпосылки для создания на их основе компактных измерителей частоты.

Не меньший интерес для разработчиков представляют измерители, выполненные на базе приёмников мгновенного измерения частоты. Эти устройства достаточно широкополосны (полоса рабочих частот может достигать единиц гигагерц) и способны работать на частотах в десятки гигагерц. Экономически более выгодно использовать данный тип приёмников с несколькими линиями задержки, каждая из которых рассчитана на работу в определённом участке диапазона частот. Привлекательными качествами таких измерителей являются приемлемые метрологические и массогабаритные характеристики, сравнительно несложный алгоритм обработки информации, доступность и относительная дешевизна используемой элементной базы, очевидная реализуемость технических и конструкторско-технологических решений.

АОИПС уступает описанным измерителям в широкополосности, но превосходит приёмник мгновенного измерения частоты в помехозащищённости и обладает способностью одновременно анализировать несколько совпадающих во времени сигналов.

Существующая в настоящее время АО-элементная база позволяет разрабатывать устройства в диапазоне единиц гигагерц с полосой рабочих частот до 1 ГГц. Сопоставительный анализ показывает, что структура построения АО-анализатора спектра наиболее близка к структуре построения многоканального приёмника. АО-анализатор можно рассматривать как многоканальный АО-фильтр. При этом, при одинаковом быстродействии и ширине полосы пропускания АО-фильтра и фильтра многоканального приёмника, АО-анализатор превосходит последний в точности измерения и разрешающей способности по частоте. Для получения в многоканальном приёмнике метрологических характеристик аналогичных АО-анализатору, необходимо сужать полосы пропускания фильтров приёмника. Однако сужение указанных полос сопряжено с уменьшением быстродействия (увеличением инерционности, или, что одно и то же, увеличением времени переходных процессов). Такое положение вещей объясняется тем, что у многоканального приёмника ширина полосы пропускания и инерционность фильтра регулируются его добротностью. Поэтому изменение (улучшение) одного из параметров (ширины полосы пропускания или инерционности) неизбежно влечёт за собой изменение (ухудшение) другого. У АО-анализатора инерционность и полоса

пропускания АО-фильтра регулируются независимо и отдельно: инерционность определяется длительностью апертурного времени АО-модулятора, а ширина полосы пропускания АО-фильтра – линейными размерами элементов фотоприёмника.

Начальный период развития АО-методов измерения параметров сигналов характеризовался тем, что некоторые технические решения носили ещё эвристический характер или представляли собой заимствования известных технических решений реализованных на другой элементной базе. Естественно, что эти решения не в полной мере учитывали особенности работы АО-приёмников и (как следствие) уменьшали эффективность их использования. Между тем, с появлением АО-устройств, измеряющих мгновенный спектр, появились возможности измерения качественно новых характеристик сигналов (например, интегральной спектральной характеристики) и возможности, в связи с этим, разработки и реализации качественно новых принципов построения аппаратуры. В частности, известны АО-демодуляторы сигналов с фазокодовой манипуляцией (ФКМ), принцип действия которых основан на слежении за динамикой изменения мгновенного спектра при прохождении скачка фазы через апертуру АО-модулятора. Эти устройства позволяют и демодулировать ФКМ-сигнал, и оценивать для него величину и знак скачка фазы. При использовании двумерных многоходовых АО-модуляторов и двумерных фотоприёмников возможно оценивание и частоты сигнала, и направления его прихода.

Несомненное достоинство приёмника со сжатием импульсов состоит в наличии у него разрешающей способности по частоте, т.е. способности к отдельному частотному анализу совпадающих во времени сигналов. Вместе с тем он уступает другим типам приёмников и в широкополосности, и в способности работать на достаточно высоких частотах. Это связано со сложностью создания высокочастотных и широкополосных линий задержек с квадратичной дисперсионной характеристикой. Поэтому в известных технических решениях требуемый участок частотного диапазона, с целью последующего анализа, переносят в полосу рабочих частот такого приёмника.

У процессоров быстрого преобразования Фурье так же, как и у АОИПС, и у приёмника со сжатием импульсов имеется разрешающая способность по частоте. Однако потенциальные возможности этих измерителей в части увеличения разрешающей способности по частоте и точности измерения частоты в большом динамическом диапазоне уровней сигналов существенно большие. Достижимые метрологические характеристики этих измерителей частотных параметров напрямую связаны с быстродействием используемых аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и быстродействием цифрового процессора. Как известно, дискретность измерения частоты с помощью данного типа процессора уменьшается с увеличением длительности обрабатываемых реализаций; полоса анализируемых частот увеличивается с уменьшением периода между отсчётами сигнала, а экспансия в сторону высоких частот связана с уменьшением времени преобразования (времени выборки) АЦП. Наблюдаемое в последнее время бурное развитие цифровых методов обработки сигналов сопровождается разработкой относительно широкополосных и высокочастотных цифровых процессоров. Но в абсолютном выражении потенциально достижимый диапазон рабочих частот таких измерителей недостаточен для абсолютного доминирования над АО-процессорами (АОП), в частности, над процессорами в гибридном исполнении, сочетающими АО и последующую цифровую обработку сигналов.

Настоящая работа является результатом обобщения многолетнего положительного опыта сотрудников Южного федерального университета по разработке, изготовлению и настройке АОИПС.

АО-измеритель, появившийся исторически раньше, в настоящее время трансформировался в АОП, объединяющий в одном конструктиве и аппаратурную (элементы оптического тракта, заканчивающиеся фотоприёмником), и вычислительную часть, в которой реализованы алгоритмы первичной и вторичной обработки информации с фотоприёмника.

Значительное внимание в книге уделено исследованию (гл. 2) погрешностей измерений частотных, амплитудных и временных параметров сигналов.

Погрешности систематизированы и по источникам возникновения (входной и оптический тракт, лазерный источник, акустооптический дефлектор, фотоприёмник), и по отклонениям реальных технических и конструктивных характеристик элементов АОП от идеальных. Исследовались нежелательные отклонения амплитудных, амплитудно-частотных, спектральных, пространственных, временных, частотных и других характеристик и их вклад в погрешности измерений.

Поскольку изучение погрешностей измерений параметров сигналов было бы слишком

абстрактным и неполным без привязки к известным базовым схемам построения АОП, то в гл. 1 кратко рассмотрены соответствующие структурные схемы и принципы их функционирования. В этой же главе даётся определение аппаратной функции – одной из основных характеристик, определяющих метрологические возможности АОП.

Алгоритмическое обеспечение АОП, рассмотренное в гл. 3, включает в себя обзор так называемых традиционных (грубых) алгоритмов, разработанных для многоканальных измерителей параметров сигналов до появления АОП, и описание высокоточных авторских алгоритмов, учитывающих специфику работы АОИПС и разработанных специально для них.

Кроме того, описаны алгоритмы аппроксимации кривой настройки – зависимости частот настройки фотодиодов фотоприёмника от их порядковых номеров в фотоприёмнике. Учет в АОП кривой настройки уменьшает погрешности измерения частоты.

Глава 4 посвящена перспективным исследованиям, направленным на улучшение метрологических характеристик акустооптических измерителей – расширение полосы анализируемых частот, увеличение разрешающей способности по частоте и коррекцию качества лазерного излучения.

Библиографический список

1. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Радио и связь. – 1978.
2. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь. – 1985.
3. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Физматгиз. – 1962.
4. Вольфовский Б.Н., Сердюков В.Г., Ветер В.В. Способ анализа спектров сигналов // АС № 817601. – 1981. – Бюл. №12.
5. Шibaев С.С., Помазанов А.В., Роздобудько В.В. Акустооптические измерители параметров радиосигналов. Монография. – Ростов-на-Дону. Изд-во ЮФУ. – 2014. – 233 с.
6. Роздобудько В.В., Помазанов А.В. и др. Акустооптический измеритель частотно-временных параметров СВЧ-радиосигналов // Специальная техника. – 2011. – №3. – С.8-24.
7. Волик Д.П., Шibaев С.С., Помазанов А.В. Принципы построения и реализация акустооптических измерителей параметров радиосигналов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №11. – С.175-182.
8. Кулаков С.В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа. – Л.: Наука. – 1978.
9. Климов Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. – М.: Сов. Радио. – 1978.
10. Li H., Ye J., McInerney J.G. // IEEE J. of Quantum Electronics. – 29(1993). – P.2421-2432.
11. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1970.
12. Шibaев С.С., Волик Д.П., Роздобудько В.В. Акустооптический приемник-частотомер на основе дефлектора с противофазным возбуждением ультразвука // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 4. – С. 32-38.
13. Боков Л.А., Краковский В.А. Акустооптический интерферометр с поверхностным возбуждением звука // Радиотехника и электроника. – 1987. – №8. – С.1726-1731.
14. Блаер Г.М., Жуков А.А. Возможности многоканальных акустооптических систем двумерной обработки радиосигналов // Применение акустооптических методов и устройств в промышленности. – Л.: Знание. – 1984. – С.25-28.
15. Дамон Р., Мэлони В., Мак-Магон Д. Взаимодействие света с ультразвуком. Явление и его применение // Физическая акустика. Под ред. У. Мэсона и Р. Терстона. – М.: Мир. – 1974. – Т.7. – 429с.
16. Акустические кристаллы. Справочник // Под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука. – 1982. – 632 с.
17. Магдич Л.Н., Шницер П.И., Сасов В.Н. Влияние тепловых потерь на работу акустооптического дефлектора // Электронная техника. Сер.10, Квантовая электроника. – 1975. – Вып.1. – С.44-47.
18. Зубринов И.И., Шелопут Д.В. Эффект акустотермической фокусировки лазерного луча в

халькогенидных стеклах и прустите // ФТТ. – 1975. – Т.17. – №3. – С.944-945.

19. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Алгоритмы вычисления частоты в акустооптических измерителях параметров радиосигналов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. Вып. 4. – С.38-46.

20. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Алгоритмический способ уменьшения погрешностей в акустооптических измерителях // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. Вып. 5. – С.51-56.

21. Shibaev S.S., Pomazanov A.V., Volik D.P. A Method of Reducing the Systematic Error of Acousto-Optical Radio-Frequency Measuring Instruments // Measurement Techniques. – 2014. – V.57. – № 4. – P.421-425.

22. Помазанов А.В., Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С. Способ измерения частоты радиосигнала в акустооптическом приемнике-частотомере // Патент России № 2521200. – 2014. – Бюл. № 18.

23. Закаэнов Н.П. Прикладная оптика. – СПб.: Лань. – 2007.

24. Шibaев С.С. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 75761. – 2008. – Бюл. № 23.

25. Егоров Ю.В., Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические процессоры. – М.: Радио и связь. – 1991.

26. Роздобудько В.В., Круэчинский Г.С. Погрешности Фурье-преобразования в акустооптических измерителях параметров радиосигналов // Радиоэлектроника. – 1998. – № 1. – С.50-56.

27. Роздобудько В.В. Широкополосные акустооптические измерители частотных и фазовых параметров радиосигналов // Радиотехника. – 2001. – №1. – С.79-92.

28. Мирошников М.М. Теоретические основы оптикоэлектронных приборов. – Л.: Машиностроение. – 1983.

29. Роздобудько В.В., Пивоваров И.И., Червяков Г.Г. Исследование точностных параметров акустооптических демодуляторов частотно-модулированных сигналов // Известия вузов. Электроника. – 2002. – №4.

30. Бринкен И.О., Иванов С.А. Апертурные и световые характеристики телевизионной ПЗС-камеры // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. – 1978. – № 2. – С.10-14.

31. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы: Пер. с англ. – М.: Наука. – 1973.

32. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. – М.: Мир. – 1974.

33. Воскресенский Д.И., Гринев А.Ю., Воронин Е.Н. Радиооптические антенные решетки. – М.: Радио и связь. – 1986.

34. Shibaev S.S. Features of the use of CCD photodetectors in acoustooptic data-processing facilities // Journal of Optical Technology. – 2008. – V.75. – № 9. – P.595-598.

35. Шibaев С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 72336. – 2008. – Бюл. № 10.

36. Шibaев С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 75246. – 2008. – Бюл. № 21.

37. Таблицы интегралов Френеля. – М.: Изд. АН СССР. – 1953

38. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами. – М.: Наука. – 1979.

39. Васильев Ю.Г., Карпов Ю.С., Смирнов Л.И. Оптоакустический демодулятор сигналов с частотной модуляцией // Техника средств связи. – 1979. – Вып. 4. – С.100-103.

40. Лебедев Н.В. Измерение координат точечного объекта телевизионной камерой на ПЗС // Техника средств связи. – 1978. – Вып. 6. – С.25-30.

41. Grossman S.B., Emmons R.V. Performance analysis and size optimization of focal planes for point-source tracing algorithm applications // Optical Engineering. – 1984. – 23(2). – С. 167-176.

42. Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приёмников излучения // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1986. – Т. 29. – С.62-69.

43. Пашков В.С., Тидеман Н.А. Исследование алгоритмов оценки координат изображений точечных излучателей в оптико-электронных приборах с многоэлементными фотоприёмниками // Изв.

вузов СССР. Приборостроение. – 1987. – Т. 31. – №4. – С.63-68.

44. Боков В.Л., Новикова Ю.В., Пашков В.С., Тидеман Н.А. Исследование точностных характеристик оптико-электронных приборов с многоэлементными фотоприёмниками // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1989. – С.64-68.

45. Краснов В.Н., Сахно С.П., Тымчик Г.С. Алгоритм поиска экстремальных значений видеосигнала ПЗС-приёмников // Оптические и оптико-электронные приборы и системы. – 1985. – С.78-82.

46. Андреев А.Л., Кузнецов В. И., Пашков В.С. Использование метода конечных разностей при обработке сигнала в телевизионном измерителе координат на ПЗС // Техника средств связи. – 1984. – Вып. 6. – С.58-62.

47. Иванкин И.Р., Пашков В.С., Фисенко Е.Ю., Эвентаве Ю.М. Интерполяционные алгоритмы определения положения центра изображения объекта с помощью ПЗС // Техника средств связи. – 1986. – Вып. 4. – С.37-43.

48. Васильев Ю.Г. Оптико-акустический демодулятор сигналов с частотной модуляцией // Техника средств связи. – 1979. – № 4. – С.100-103.

49. Вернигоров И.С., Пуговкин А.В. Акустооптический частотный демодулятор // Радиотехника и электроника. – 1989. – № 3. – С.628-631.

50. Щербак В.И., Паршуткин А.В. Статистический синтез оптимальных измерителей частоты на акустооптическом модуляторе // Радиотехника и электроника. – 1992. – № 12. – С.2209-2215.

51. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Аппроксимативные алгоритмы вычисления частоты радиосигналов в акустооптических спектроанализаторах // Вопросы специальной радиоэлектроники. Общие вопросы радиоэлектроники. – 2008. Вып. 1. – С.77-83.

52. Роздобудько В.В., Пелипенко М.И. Быстродействующий измеритель параметров СВЧ-радиосигналов // Специальная техника. – 2006. – № 1. – С. 28-36.

53. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Экспериментальное исследование алгоритмов вычисления частоты радиосигналов в акустооптических спектроанализаторах // Вопросы специальной радиоэлектроники. Общие вопросы радиоэлектроники. – 2008. Вып. 1. – С.122-127.

54. Роздобудько В.В. Исследование эффектов саморазогрева LiNbO_3 -дефлекторов, работающих в составе акустооптических частотомеров // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2000. Вып. 1. – С.10-14.

55. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. – 1978.

56. Роздобудько В.В., Дикарев Б.Д. Высокоточный акустооптический приемник-частотомер комбинированного типа // Радиотехника. – 2003. – №9. – С.31-36.

57. Задорин А.С., Шандаров С.М., Шарангович С.Н. Акустические и акустооптические свойства монокристаллов. – Томск: Издательство Томского Университета ка. – 1987.

58. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука. – 1965.

59. Вольфовский Б.Н., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Способ измерения частоты радиосигнала в акустооптическом приемнике-частотомере // Патент России № 2421767. – 2011. – Бюл. № 17.

60. Новиков В.М., Роздобудько В.В., Шibaев С.С. Широкополосный акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 72082. – 2008. – Бюл. № 9.

61. Новиков В.М., Шibaев С.С., Роздобудько В.В. Широкополосный акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 119135. – 2012. – Бюл. № 22.

62. Шibaев С.С., Волик Д.П., Новиков В.М., Помазанов А.В. Акустооптический СВЧ дефлектор // Патент России № 145757. – 2014. – Бюл. № 27.

63. Шibaев С.С., Новиков В.М., Волик Д.П. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 146948. – 2014. – Бюл. № 29.

64. Роздобудько В.В., Бакарюк Т.В. Акустооптический СВЧ дефлектор с поверхностным возбуждением ультразвука // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 16. – С.74-76.

65. Alphonse G.A. Broad-Band Acousto-Optic Deflectors Using Sonic Gratings for First-Order Beam Steering // RCA Rev. – 1972. – V.33. – № 3. – P.543-594.

66. Шibaев С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В., Дмитришин А.В. Широкополосный акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 2367987. – 2009. – Бюл. № 26.

67. Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Широкополосный акустооптический дефлектор // Патент России № 87269. – 2009. – Бюл. № 27.
68. <http://www.brimrose.com>.
69. Малов А.Н., Морозов В.Н., Компанец И.Н., Попов Ю.М. Формирование изображения в когерентной системе с синтезированной апертурой // Квантовая электроника. – Т.4 – №9. – 1981. – С.1977-1985.
70. Балакший В.И., Парыгин В.Н. Синтез апертуры в устройствах пространственного управления световым пучком // Квантовая электроника. – 1980. – Вып.7. – №4. – С.829-834.
71. Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Теория акустооптического спектроанализатора с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т.13. – №1. – С.55-60.
72. Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов // Патент России № 70713. – 2008. – Бюл. № 4.
73. Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Экспериментальное исследование акустооптического СВЧ-спектроанализатора с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т.13. – №2. – С.76-82.
74. Шибает С.С., Новиков В.М., Роздобудько В.В. Акустооптический измеритель с синтезом апертуры // Патент России № 87534. – 2009. – Бюл. № 28.
75. Волик Д.П., Роздобудько В.В. Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического дефлектора с поверхностным пьезопреобразователем // ЖТФ. – 2009. – Т.79. – Вып.6. – С.124-129.
76. Shibaev S.S., Volik D.P., Pomazanov A.V. An increase in the resolution of acousto-optic processors // Technical Physics. – 2015. – V.85. – № 4. – P.568-570.
77. Потемкин А.К., Хазанов Е.А. Вычисление параметра M^2 лазерных пучков методом моментов // Квантовая электроника. – 2005. – Т.35. – №11. – С.1042-1044.
78. <http://www.bnonlinear.com>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
ГЛАВА 1	
АО-ПРОЦЕССОРЫ. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ	7
1.1. Акустооптический преобразователь Фурье	7
1.2. АО-измеритель параллельного типа	10
1.3. АО-измеритель последовательного типа	15
1.4. Аппаратная функция АО-измерителя	20
ГЛАВА 2	
ВИДЫ И ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В АО-ПРОЦЕССОРАХ	21
2.1. Неидеальность входного тракта	21
2.1.1. <i>Нелинейность амплитудной характеристики</i>	<i>21</i>
2.1.2. <i>Неравномерность АЧХ СВЧ-тракта</i>	<i>22</i>
2.1.3. <i>Несогласованность АОД с входным СВЧ-трактом</i>	<i>22</i>
2.2. Качество источника лазерного излучения	23
2.2.1. <i>Нестабильность длины волны излучения</i>	<i>23</i>
2.2.2. <i>Ширина и спектральный состав линии излучения</i>	<i>23</i>
2.2.3. <i>Оптическая обратная связь</i>	<i>25</i>
2.2.4. <i>Пространственные характеристики излучения</i>	<i>26</i>
2.3. Неидеальность характеристик АО-дефлектора	32
2.3.1. <i>Неравномерность АЧХ АОД</i>	<i>32</i>
2.3.2. <i>Частотная вариация апертуры</i>	<i>33</i>
2.3.3. <i>Затухание ультразвука в кристалле</i>	<i>33</i>
2.3.4. <i>Явления разогрева АОД</i>	<i>33</i>
2.4. Качество оптического тракта и его элементов	39
2.4.1. <i>Качественная оценка влияния оптики</i>	<i>39</i>
2.4.2. <i>Погрешности оптического Фурье-преобразования</i>	<i>42</i>
2.5. Неидеальность фотоприемника	50
2.5.1. <i>Геометрические погрешности</i>	<i>50</i>
2.5.2. <i>Неоднородность чувствительности</i>	<i>54</i>
2.5.3. <i>Неидентичность амплитудных характеристик</i>	<i>60</i>
2.5.4. <i>Инерционность фотодиодов</i>	<i>60</i>
2.5.5. <i>Дифракционные эффекты в фотоприемнике</i>	<i>66</i>
2.6. Динамические погрешности	77

ГЛАВА 3
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ
В АО-ПРОЦЕССОРАХ 93

3.1. Традиционные алгоритмы 93

3.2. Обзор высокоточных алгоритмов измерения 99

3.3. Алгоритмические способы минимизации
погрешностей 109

3.3.1. Аппроксимация аппаратной функции 109

3.3.2. Особенности измерения частоты в динамическом
диапазоне АО-измерителя 121

3.3.3. Аппроксимация кривой настройки 138

3.3.4. Калибровка частотной шкалы 147

ГЛАВА 4
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
АППАРАТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АО-ПРОЦЕССОРОВ 152

4.1. Расширение диапазона рабочих частот 152

4.1.1. Краткий обзор методов 152

4.1.2. Двухлепестковое взаимодействие 156

4.2. Увеличение разрешающей способности 167

4.2.1. Синтез световой апертуры 167

4.2.2. Использование эффекта Доплера в АОД 185

4.3. Улучшение качества лазерного излучения 191

4.3.1. О параметрах лазерных пучков 191

4.3.2. Улучшение спектральных и пространственных
характеристик излучения 194

Заключение 202

Список сокращений 203

Библиографический список 204