

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ЭШОНҚУЛОВ ҒОФУР БОБОҚУЛОВИЧ

**ОПТИК БИР ЖИНСЛИ БЎЛМАГАН МУҲИТДАГИ ЎЛЧАШЛАРДА
ЛАЗЕРЛИ ГЕТЕРОДИНЛАШ ВА КОРРЕЛЯЦИОН ҚАЙТА ИШЛАШ**

**01.04.11 – Лазер физикаси
(физика-математика фанлари)**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2018 йил

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)
on physical-mathematical sciences**

Эшонкулов Гофур Бобокулович

Оптик бир жинсли бўлмаган мухитдаги ўлчашларда лазерли
гетеродинлаш ва корреляцион қайта ишлаш..... 3

Эшонкулов Гофур Бобокулович

Лазерное гетеродинирование и корреляционная обработка при
измерениях в оптически неоднородной среде..... 21

Eshonqulov Gofur

Laser heterodyning and correlation processing in measurements in optical
inhomogeneous media..... 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 42

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ЭШОНҚУЛОВ ҒОФУР БОБОҚУЛОВИЧ

**ОПТИК БИР ЖИНСЛИ БЎЛМАГАН МУҲИТДАГИ ЎЛЧАШЛАРДА
ЛАЗЕРЛИ ГЕТЕРОДИНЛАШ ВА КОРРЕЛЯЦИОН ҚАЙТА ИШЛАШ**

**01.04.11 – Лазер физикаси
(физика-математика фанлари)**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PHD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2018 йил

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.1PhD/FM93 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Миллий университети Физика факультетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (fti.uz) ҳамда “ZiyoNet” Ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Вильданов Рамиль Рифгатович

физика-математика фанлари номзоди, доцент

Расмий оппонентлар:

Усмонов Тимурбек Бекмурадович

физика-математика фанлари доктори, академик

Семенов Денис Иванович

физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат техника университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net).

Диссертация билан Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй, Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «___» _____ куни тарқатилди.
(2017 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

С.А. Бахрамов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., академик

А.В. Каримов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

С.С. Қурбонов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда жаҳон миқёсида жадал ривожланаётган лазер физикаси соҳасида оптик бир жинсли бўлмаган муҳит шароитида юқори ажрата олишли оптик диагностика ва дистанцион зондлаш масалалари муҳим вазифалардан ҳисобланади. Бу йўналишда муҳитларнинг физик параметрлари ҳамда зондланаётган объектларнинг характеристикаларини аниқлаш имкониятини берувчи лазерли гетеродинлаш ва корреляцион қайта ишлаш методлари муҳим илмий инструмент ҳисобланади.

Бугунги кунда дунёда ушбу методларга асосланган лазерли системалар деформографияда, сочилган ёруғлик спектрометриясида, микроструктурали тадқиқотларда, атмосфера оптикасида, сейсмометрияда, кимёда, биологияда, тиббиётда ва бошқа соҳаларда қўлланилмоқда. Шу билан биргаликда лазерли гетеродинлаш асосида фазаметрик ва корреляцион ўлчашлар методологиясини ривожлантириш; частота бўйича синхронлаштирилган лазерли гетеродинли система ва фотон-корреляцион спектрометри ўлчов системасини ишлаб чиқиш; турбулент атмосферанинг ва дисперс муҳитларнинг оптик параметрларини ҳисобга олган ҳолда детекторлаш эффективлигини ҳисоблаш каби йўналишлардаги мақсадли тадқиқотлар муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра илмий тадқиқот ва инновацион фаолиятни рағбатлантириш, илмий ва иновация ютуқларини амалиётга жорий қилиш самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Жумладан, истиқболли технологияларни илмий ва техника соҳасига татбиқ қилиш масалаларига алоҳида эътибор қатарилмоқда. Бу жараён “Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб қувватлаш йили”да амалга оширилаётганлиги ҳамда замон талабларига жавоб берадиган илмий натижаларни олишга қартилганлиги билан алоҳида эътиборга сазовор. Бу борада, диагностик системаларни ишлаб чиқишнинг янги принципларини ҳамда атроф муҳитни мониторинг қилишдан ахборотни оптик узатишгача бўлган вазифаларни ўз ичига олган диагностика ва локация масалаларини ҳал этишда эффектив қўллаш мумкин бўлган, ўзининг максимал характеристикаларига эриша оладиган фазасезгир ва спектрометрик ўлчаш методларини яратиш долзарб аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПҚ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги, 2008 йил 15 июлдаги ПҚ-916-сон «Инновацион лойиҳалар ва технологияларни ишлаб чиқаришга қўллашни рағбатлантириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги, 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442-сон «Ўзбекистон Республикаси саноатининг 2011-2015 йилларда ривожланиш истиқболлари тўғрисида»ги, 2017 йил 17 декабрдаги ПҚ-2789 сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлар ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-

ҳуқукий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технология ривожланишининг қуйидаги Давлат дастурларига мувофиқ бажарилган:

ГНТП-13-республика иқтисодиёти соҳаларида илмий-интенсив технологиялар, қурилмалар, асбоблар, ўлчашнинг эталон восита ва методларини яратиш, таҳлил ва назорат, метрология масалалари, стандартлаштириш ва сертификатлаш;

НТП-15-республика иқтисодиёти соҳалари учун юқори самарали илмий-интенсив, рақобатбардош ва экспортга йўналтирилган технологиялар, машиналар ва қурилмалар, асбоблар, ўлчашнинг эталон восита, методлари ва назоратини яратиш;

ППИ-3-энергетика, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машина ва асбобсозлик: замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозлик ва мехатрониканинг ривожланиши.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Экспериментал тадқиқотлар амалиёти лазерли гетеродинлаш методларининг функционал имкониятлари билан физик тадқиқотларда кенг қўламдаги фазаметрик ва спектрометрик ўлчашларни амалга ошириш мумкинлигини кўрсатмоқда. Ушбу методларнинг назарий асослари А.Т.Forrester, Н.З.Cummins, D.P.Dave, В.В.Протопопов томонидан яратилган. Лазерли гетеродинли системаларни ишлаб чиқиш билан С.Н.Багаев, В.А.Орлов, К.Ishii, В.Wang, М.Н.Дубров каби олимлар иштирокида етакчи илмий тадқиқот институтлари шуғулланишмоқда. Бу методни қўллаган ҳолда турбулент атмосферанинг оптик параметрларини назарий ва экспериментал равишда В.Е.Зуев, В.А.Банах, В.В.Покасов, Р.А.Казарянлар тадқиқ қилишган. Оптик аралаштириш спектроскопияси принципларини ривожлантириш W.Demtröder, E.Jakeman, E.R.Pike, B.Chu, A.B.Ломакинлар тадқиқотларида келтирилган бўлиб, уни сигналларни корреляцион қайта ишлаш билан бирлаштириш ўта юқори спектрал ажрата олишга эришишда сифат жиҳатдан янги имкониятларни тақдим этади.

Бу имкониятларни амалга ошириш зондлаш, фотоқабул қилиш ва қайд қилинган сигналларни қайта ишлаш методларини янада ривожлантиришни талаб этади. Бу йўналиш бўйича мамлакатимизда А.Т.Мирзаев, А.Н.Якубов, Р.Р.Вильдановлар илмий гуруҳи томонидан қатор ишлар амалга оширилган. Бироқ, лазерли интерферометрик системаларнинг махсус хусусиятлари туфайли уларнинг қайд қилишининг сезгирлиги ва эффективлиги, ўлчашнинг физикавий вазифаси ва шароитига боғлиқ равишда сигналнинг шовқинга нисбати каби характеристикалари камдан-кам ҳолларда ҳисобланади. Шунинг учун фазаметрик ва корреляцион ўлчашлар учун лазерли системаларни тадқиқ қилиш ва яратиш мазкур йўналишни ривожлантириш ҳамда амалий вазифаларни ҳал этиш учун долзарб масала ҳисобланади.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация

тадқиқоти Ўзбекистон Миллий университетида № 01910000928 рақам билан тасдиқланган «Ўта кичик силжишларни қайд қилувчи лазерли системаларни яратиш» мавзусидаги ҳамда ГНТП №01200009766 «Кичик силжишларни лазерли ўлчагични яратиш ва ишлаб чиқиш» (2000-2002 йй.); П-10.10 «Деформацион силжишларни дистанцион лазерли ўлчагични ишлаб чиқиш» (2003-2005 йй.); А13-023 «Деформацион силжишларни лазерли ўлчагични стабиллаш тизимини ишлаб чиқиш» (2006-2008йй.); ИТД 15-020 «Сочувчи муҳитларни диагностикаси учун лазерли фотон-корреляцион спектрометрни ишлаб чиқиш» (2009-2011 йй.) мавзуларидаги фундаментал ва амалий лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади турбулент атмосфера ва дисперс муҳитларнинг структуравий характеристикаларини ўлчаш методларини лазерли гетеродинлаш ва коррелометрия экспериментал методларини ривожлантириш орқали ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

лазерли гетеродинлаш асосидаги оптик зондлашда фазаметрик ва корреляцион ўлчаш методологиясини аниқлаш;

частота бўйича синхронлаштирилган лазерли гетеродин системани тайёрлаш ва ишлаб чиқиш;

газ лазерлари актив муҳити дисперсион хусусиятларини тадқиқ қилиш ва уларнинг нурланиш частотасини стабиллаштириш;

ўлчаш шароитларига боғлиқ равишда гетеродинли детекторлаш эффективлиги ва сезгирлигини ҳисоблаш;

оптик майдонларнинг статистик характеристикаларини қайд қилиш учун фотон-корреляцион спектрометрнинг экспериментал системасини ишлаб чиқиш;

турбулент атмосферанинг оптик параметрларини экспериментал тадқиқотларда аниқлаш;

фотон-корреляцион спектрометрия методи билан дисперс муҳитларни микроструктуравий тадқиқ қилиш.

Тадқиқот объекти бир жинсли бўлмаган муҳитларни зондлашда лазерли гетеродинли системалар ҳисобланади.

Тадқиқот предмети зондланаётган объектларнинг физик параметрлари, зондловчи гетеродин нурланишни шакллантириш усуллари ҳамда сочилган нурланишни детекторлаш ва таҳлил қилиш методларидан иборат.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот нурланишни шакллантириш ва қайд қилиш, детекторлашдан кейинги қайта ишлаш жараёнларини аналитик таҳлил қилиш билан бирга олиб борилади. Атмосферани тасодифий бир жинсли бўлмаган турбулент канал сифатидаги классик тасаввур ҳамда дисперс муҳитларда ёруғликнинг динамик сочилишини умумий қабул қилинган механизмларидан фойдаланилди. Корреляцион қайта ишлаш флуктуация фонида оптик нурланишнинг спектрал ва вақтий характеристикаларини ажратиб олиш имкониятини беради. Ўлчашлар автоматлаштирилган ўлчов-ҳисоблаш комплексида замонавий радиофизик методлар ва қурилмалардан фойдаланилган ҳолда олиб борилди.

Диссертация тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:
лазер нурланишнинг оптик частотасини стабиллаш имкониятини берувчи модавий қайта тузиш хусусиятлари ва He-Ne лазер генерация частотасини дисперсион силжиш характеристикалари аниқланган;

амалий қўллаш шароитларида гетеродинли ўлчаш сезгирлиги ва эффективлигини баҳолаш учун аналитик ифодалар олинган ва ҳисоблашлар бажарилган;

синхронлаштирилган лазерли гетеродин системани ясашда лазер нурланишини бошқарувчи сигналларни шакллантириш принциплари ишлаб чиқилган;

фотосаноқларнинг статистик тақсимооти ҳамда авто ва кроскорреляцион функцияларини қайд қилиш имкониятини берувчи оптик майдонларни фотон санаш режимидаги детекторлаш методида амалга оширилган;

ишлаб чиқилган лазерли система ёрдамида турбулент атмосферанинг оптик информацияни узатувчи канал эканлигини характерлайдиган оптик параметрлари аниқланган;

ишлаб чиқилган фотон корреляторни қўллаган ҳолда фотон-корреляция методи билан сочилган нурланиш спектри кенглиги ва монодисперс эритмадаги микрозаррача ўлчами аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

фазаметрлик ва спектрометрлик ўлчашлар учун мўлжалланган, лазерлари синхронлаштирилган лазерли гетеродинли система ишлаб чиқилган;

фотон санаш режимида оптик нурланишнинг авто ва кроскорреляцион функцияларини қайд қилувчи коррелометр ишлаб чиқилган;

полигонда олиб борилган ўлчашларда турбулент атмосферанинг оптик параметрлари ва дистанцион зондлашнинг оптимал шароитлари аниқланган;

фотон-корреляцион спектрометрия методи билан субмикронли заррачалар суспензиясининг характеристик параметрлари аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишда ўлчашнинг замонавий метод ва воситалари комплексидан фойдаланилганлиги; олинган қонуниятларни умумқабул қилинган классик тасаввурлар асосида аналитик ўрганилганлиги; эксперимент натижаларини ҳисоблаш моделларига мувофиқлиги ва умумфизикавий тасаввурлар ҳамда бошқа илмий ишларга мослиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Диссертация натижаларининг илмий аҳамияти турбулент атмосфера ва дисперс муҳитларда лазерли спектрометрлик ўлчашларнинг сезгирлиги ва эффективлигини ортиши тўғрисидаги тасаввурларни кенгайтиришда намоён бўлади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, ишлаб чиқилган лазерли гетеродинли система радиофизик полигонда атмосферавий ва сейсмометрик кузатувларда ҳамда дисперс муҳитларнинг структуравий характеристикаларини ўлчашда қўлланилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Бир жинсли бўлмаган муҳитларнинг структуравий характеристикаларини лазерли гетеродинлаш орқали фазаметрик ва спектрал ўлчаш тадқиқотла-

ри натижалари асосида:

оптик фаза силжишини аниқлаш учун мўлжалланган лазерли гетеродинли системага Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идорасининг фойдали модели олинган («Силжишларни ўлчаш учун автоматлаштирилган лазерли гетеродинли система» UZ № FAP 00348, 2008). Ишлаб чиқилган системани қўллаш ўлчаш стабиллиги ва аниқлигини икки баробар ошириш, ҳамда ва қайд қилиш жараёнини автоматлаштириш имконини берган;

ишлаб чиқилган усул ва экспериментал қурилма БФ2-027 рақамли “Металл нанозаррачалар шаклланиши ва ўсиши механизмлари ва уларнинг ночизикли оптик хоссаларини тадқиқ қилиш” грант лойиҳасида ўлчаш сезгирлиги ва эффективлигини ошириш учун қўлланилган (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 16 мартдаги 89-03-1025-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши юқори аниқликда атроф-муҳитни мониторинг ва назорат қилиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот иши натижалари 5 та халқаро ва 13 республика илмий конференциялар ишида маъруза қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 31 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларида 11 та мақола, жумладан 8 таси республика ва 3 таси хорижий журналларда нашр этилган. Лазерли гетеродинли система фойдали модели учун патент олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар руйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ ҚИСМИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Оптик зондлашда лазерли гетеродинлаш ва корреляцион қайта ишлаш методлари**» номли биринчи бобида лазерли фаза-метрик ва спектроскопик системаларнинг физик тадқиқотларда қўлланилиши, бир жинсли бўлмаган муҳитларни ўрганишда лазерли гетеродинлаш ва фотон-корреляцион спектроскопиядан фойдаланиш ҳақида қисқача шарҳ келтирилган. Ўтказилган таҳлиллар асосида аниқ физикавий масалалар учун ишланмаларни ва экспериментал методларни оптималлаштириш зарурати ҳақида хулосалар чиқарилган. Диссертация иши мақсади ва вазифалари

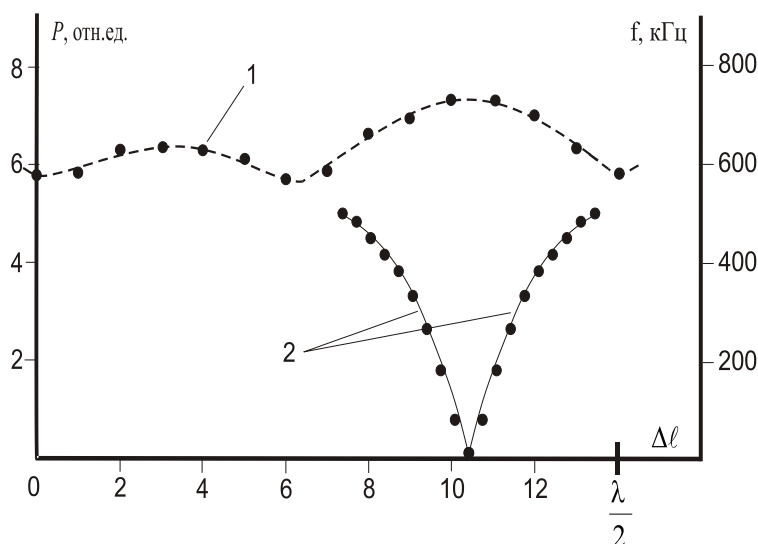
шакллантилган.

Диссертациянинг «Лазерли гетеродинли фазаметрик система» номли иккинчи боби тадқиқот мавзуси бўйича оптик тажрибаларни ўтказиш учун асосий физик қурилма ҳисобланган лазерли гетеродинли системани ишлаб чиқишга бағишланган. Кириш қисмида ушбу йўналиш бўйича мавжуд методлар ва эришилган натижалар ҳақида қисқа таҳлилий маълумот берилган. Системани қуриш ва функционал ҳисоблаш принциплари кўрсатилган. Лазер нурланиши манбаларини ишлаб чиқиладиган системага мослаштириш мақсадида ўтказилган тадқиқотлар натижалари келтирилган.

Фазаметрик системаларнинг сезгирлиги ва аниқлиги биринчи навбатда нурланиш манбалари характеристикалари, оптик схемалар параметрлари, ўлчаш шароитларини ҳисобга олган ҳолда фотоқабул қилиш ва қайд қилувчи қисмининг хусусиятларига боғлиқ. Гетеродин системада қўлланилувчи саноатда ва биз томонимиздан ишлаб чиқилган тўртта лазер манбаларининг характеристикалари экспериментал тадқиқотларда ўрганилди. Нурланишнинг модавий таркиби, қувватининг стабиллиги, иссиқликка бардошлилиги, акустик ҳимояланганлиги, частота флуктуацияси ва шовқинлари ўрганилди. Олинган натижалар таҳлили саноатда ишлаб чиқилган герметик корпусли лазерларнинг температуравий стабиллиги бизда ишлаб чиқилган ЛГ-ККР лазерига нисбатан сезиларли даражада паст эканлигини кўрсатди. Температура ўзгаришида нурланиш частотаси дрейфининг қиймати қуйидагига тенг: температура ўзгаришида $\sim 500 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$, ташқи босим ўзгаришида $\sim 20 \text{ МГц}/\text{тор}$. ДТР лазерлари учун интенсивлик флуктуацияси 200 Hz гача бўлган соҳани эгалланган кичик қийматга эга. Юқори частоталар соҳасида ГЛ-105 лазерлари учун кенглиги $\sim 20 \text{ МГц}$ ўзгариш тезлиги $10 \text{ МГц}/\text{сек}$. бўлган доимий ток разрядидаги қатламлар динамикаси ва кўндаланг типдаги тебранишларнинг қайта тузилиш билан боғлиқ бўлган спектрал груҳининг узлуксиз тебранишлари кузатилди. Частота флуктуацияси сатҳини миқдорий баҳолаш ДТР лазернинг флуктуация спектри $\sim 80 \text{ Гц}$ гача бирлик герц соҳасида $\sim 10 \text{ МГц}$ ли максимал оптик оғиш билан сўнишини кўрсатди. Олинган натижалардан, лазерларнинг автосозлаш схемасининг тезкорлиги ташқи таъсирларни ҳисобга олмаган ҳолда камида 100 Гц гача бўлган диапазонни беркитиши керак деган хулоса келиб чиқади.

Лазерли ўлчов системаларини ишлаб чиқишда бир неча бўйлама мода генерациясида ишловчи лазерлардан кенг фойдаланилади, чунки улар бир-частотали лазерларга нисбатан нурланиш қуввати юқори бўлади. Кучайтиришнинг доплер контури чегарасида бир модалидан уч модалигача бўлган лазернинг частотавий қайта созлашга боғлиқ бўлган эффектларини ўрганиш учун юқори частотали дамлашли ва нурланиш қуввати $\sim 0,5 \text{ мВт}$ бўлган ЛГ-149 турдаги гелий – неон лазерлари тадқиқ қилинди. Унинг резонатори узунлиги 32 см га тенг бўлиб, эркин спектрал зонаси $\Delta\nu_{\text{FSR}} \approx 470 \text{ МГц}$ га мос келади.

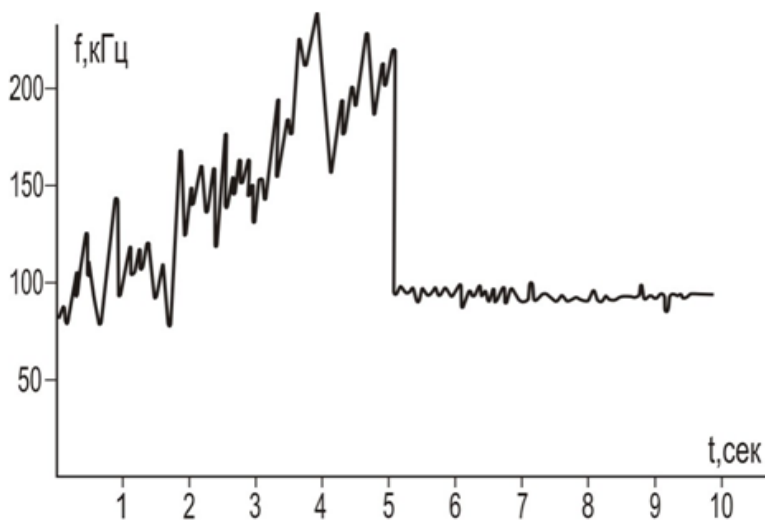
Уч частотали нурланиш доирасида резонаторни созлаш аксиал модаларнинг доплер контури ўрта қисмига тақсимланиши натижасида максимал қувватга эришишга олиб келади (1-расм).



1-расм. Уччастотали лазер чиқиш қувватини (1) ва комбинацион биения частотаси абсолют қийматини (2) резонатор узунлигини ўзгаришига боғлиқлиги

модалар амплитудасига боғлиқ равишда камая бошлайди, унинг нурланиш чизиғи хусусий кенлиги спектр соҳасига боғлиқ ҳолда бир неча килогерц қийматида кузатилди

Комбинацион биения частотасининг ўзгаришидан лазернинг оптик частотасини стабиллаш учун фойдаланилди (2-расм). Стабилланмаган режимда биения частотаси 20 кГц гача қийматли хаотик флуктуацияли умумий тенденцияга эга бўлади. Стабиллаш уланганида пастчастотали биения 100 кГц частотага боғланади ва уларнинг оғиши амплитудаси 3 кГц гача камаяди. Натижада 10 соатда узок муддатли частотавий ностабиллик $7 \cdot 10^{-9}$ ташкил этди. Шуни таъкидлаш керакки, қисқа мудатли (бирлик секундларда) ностабиллик ҳам деярли шу қийматларни қабул қилади. Бу эса ушбу стабиллаш лазерни узок муддатли иссиқлик таъсирларида сақлашга қаратилган бўлиб, узок муддатли интерферометрик ўлчашлар учун зарур ҳисобланади.



2-расм. Стабилланмаган ва стабиллаш режимларида частотанинг оғиши

жарилди; лазерлар частотаси фарқини 10^{-5} нисбий хатолик билан ушлаб

Ушбу резонатор учун уччастотали режим бутун созлаш диа-пазонининг 60% ни эгаллайди. Лазернинг уччастотали режимда дисперсион ва ночизикли эффектлар туфайли фоток спектрида комбинацион биения сигнали мавжуд бўлади. Комбинацион биения частотасининг резонатор узунлигини созлашга боғлиқлиги 1-расмда келтирилган. Комбинацион биения амплитудаси f частота ортиши билан четки

Тадқиқотлар натижасида қуйидаги вазифалар ҳал этилди: лазер резонаторлари бошқарув сигналлари шакллантириш ва қайта ишлаш методлари билан фарқланувчи, частота бўйича боғланган иккита лазер асосидаги гетеродинли системани қуриш принциплари аниқланди; фазаметрик ўлчашлар учун оптик ва электрон қурилмаларни функционал ҳисоблаш ба-

туриш имкониятини берувчи лазер нурланиши частотасини частотавий ва фазавий синхронловчи блок ишлаб чиқилди; блокка биения частотасини частотавий автотўғрилаш системасининг қамраш частотаси соҳасига киритувчи лазерларни автосканерлаш схемаси киритилди.

Амалий қўлланиш шароитида лазерли гетеродинлашнинг сигнал шовқин нисбати ва қабул қилиш эффективлигини аналитик ҳисоблаш келтирилди. Сигналнинг трассаса узунлиги ва турбулентлик ҳолатига боғлиқ ҳолдаги хусусиятларини кўрсатувчи атмосферадаги табиий экспериментлар натижалари келтирилган.

Детекторлашнинг эффективлиги тўлиқ баҳолаш учун сигнал ва шовқиннинг статистик хоссаларини эътиборга олиш зарур. Пуассон флуктуацияларини ҳисобга олсак, сигнал ва таянч нурланишларининг гетеродинли қабул қилишдаги сигнал/шовқин нисбати қуйидагига тенг:

$$S/N|_{\text{гет}} = \frac{\bar{j}_s^2}{\bar{j}_{\text{ш}}^2} = \frac{2\eta\bar{I}_s}{(1+\eta F_s + \eta F_g)\Delta f}, \quad (1)$$

бунда, j_s ва $j_{\text{ш}}$ – сигнал ва шовқин фототоқлари; η – фотодетекторлашнинг квант эффективлиги; $F_i = T \frac{\sigma_i^2}{I_i}$ – сигнал s ва гетеродин g нурланишлари учун уларнинг дисперсиясини σ_i ҳисобга олган ҳолда фотосаноклар тақсимотини пуассон тақсимотидан фарқланишини характерловчи параметр; Δf – қайд қилинадиган частоталар полосаси.

Сигнал ва таянч нурланишларнинг ностабиллик факторининг ортиши билан гетеродинли системанинг излаш хусусияти ёмонлашади. Сигнални детекторлашдан кейинги қайта ишлаш таҳлилига фототоқни филтраш ва шовқин ҳамда майдонларнинг фазовий конфигурацияси ва когерентлик характеристикаларини киритиш орқали гетеродинли ток сигнали амплитуда қиймати учун ушбу ифода олинди:

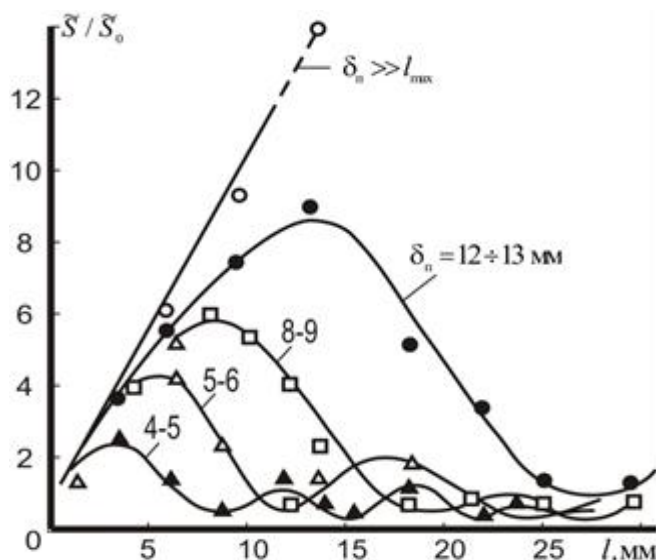
$$\tilde{S} = \tilde{S}_0 \left[\frac{1}{A} \exp\left(\frac{\Delta}{w}\right) \right]^2 2 \iint_A d^2 r d^2 r' \frac{J_1(v)}{v} \exp\{i\psi - r^2\beta - r'^2\beta^* + r[2\beta\Delta \cos(\vartheta - \varphi) - ik_g\theta_g \tilde{n}\cos\vartheta] + r'[2\beta^*\Delta \cos(\vartheta' - \varphi) + ik_g\theta_g \tilde{n}\cos\vartheta']\} \quad (2)$$

бунда $\tilde{S}_0$ - сигнал амплитуда қийматининг барча ўлчамли катталикларини ўз ичига олувчи кўпайтирувчи; r – майдони A тенг бўлган детекторнинг радиус вектори ва ϑ - унинг кутб бурчаги; Δ , w , ψ , β , θ , φ - фотоаралишишнинг конфигурацион параметрлари,

$$v = \frac{k_s}{R} \rho [r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\vartheta - \vartheta')]^{1/2} \quad (3)$$

$J_1(v)$ - биринчи тартибли Бессел функцияси. Ушбу (3) ифода гетеродинлаш эффективлигига у ёки бу кўринишдаги номувофиқликни таъсирини тадқиқ қилиш имкониятини беради. Ҳисоблашлар, детекторнинг ўлчами $a_d \approx 1$ мм бўлганида $\lambda = 0,63$ мкм тўлқин узунлигида фронтларнинг эгрилиги икки карра фарқ қилиши сигналнинг 30% га камайишини кўрсатди. Бундай ҳолат

$\lambda = 10,6$ мкм тўлқин узунлиги учун детекторнинг ўлчами $a_d = 3,5$ мм бўлганида кузатилади. $a_d = 1$ см ва $\lambda = 0,63$ мкм, нурланишларнинг номувофиклик бурчаги $\theta_g \sim 3''$ бўлганида S/N икки марта камаяди. Бундай ҳолат $\lambda = 10,6$ мкм учун $\theta_g \sim 50''$ қийматда кузатилади. $a_d = 1$ мм учун мос ҳолда $\theta_g(0,63) \sim 0,5'$, $\theta_g(10,6) \sim 8'$ қийматларга эга бўламиз. **3-расмда** атмосферадаги эксперимент натижалари келтирилган.



3-расм. Атмосферада колимацияланган дасталарнинг турли оғиш ўқларида $\tilde{S} / \tilde{S}_0$ нинг апертура ўлчамига боғлиқлиги.
 $C_n^2 \sim 4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$, $\lambda = 0,63$ мкм

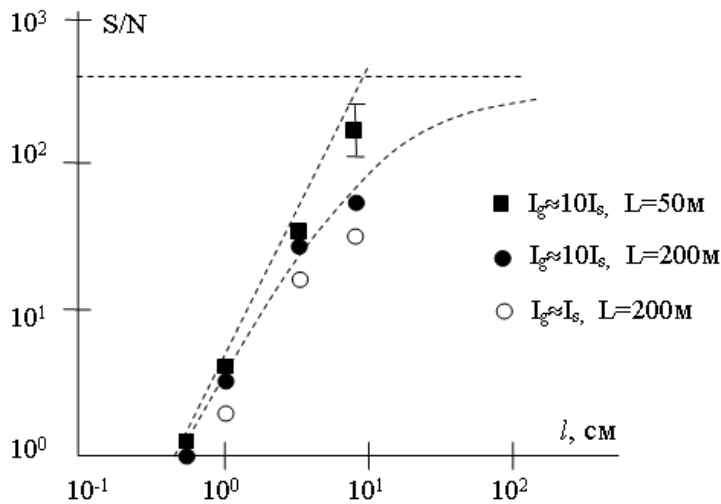
Ўлчашлар 200-метрли трассада кечкурун кучсиз турбулентлик шарои-тида ўтказилди. Сигнал фронтларининг номувофиклик бурчаги интерференцион полоса кенглиги δ_n га тескари пропорционал бўлиб, эгри чизиклар ёнида келтирилган. Юқоридаги таҳлиллардан кўринадики, эгри чизиклар тебранма характерга эга. Сигнал нури трассасида турбулентлик натижасида пайдо бўлган тўлқин фронтининг фазавий флуктуациялари гетеродинли интерференциянинг кўринувчанлигини ёмонлашишига олиб келди.

Турбулент трасса учун когерентлик функцияси ифодаси келтириб чиқарилди ва амалий ҳоллар учун аналитик ҳисоблашлар бажарилди:

$$S / N \approx \frac{\eta I_s}{\Delta f} \frac{1}{\tilde{D}} \left[\sqrt{\pi} \cdot \text{erf}(l \sqrt{\tilde{D}}) - \frac{1}{l \sqrt{\tilde{D}}} (1 - e^{-l^2 \tilde{D}}) \right]^2 \quad (4)$$

бунда γ - вақтли когерентлик даражаси, $\tilde{D} = 1.64 C_n^2 k^2 L l_0^{-1/3}$, L – тарсса узунлиги, l_0 – турбулентликнинг ички масштаби, l – детектор ўлчами; $\text{erf}(l \sqrt{\tilde{D}})$ – хатоликларнинг интеграл функцияси.

Ўлчашлар 50 ва 200 метрли трассаларда мўътадил турбулентликда ўтказилди. Диаметри 10 см бўлган коллимиранган дастанинг интенсивлиги $I_s \approx 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, таянч дастанинг интенсивлиги эса $I_g \approx I_s$ дан $I_g \approx 10 I_s$ гача ўзгартирилиб турилди. Миқдорий ҳисоблаш учун қуйидаги параметрлар олинди: $\eta = 0.3$, $\gamma = 0.8$, $\Delta f = 10^4$ Гц, $l_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м. **4-расмда** ўлчаш ва ҳисоблаш натижалари келтирилган. Эгри чизиклар назарий ҳисоблашларни тасдиқлайди ва улардан СШН трасса узунлиги ортиши билан тезда тўйиниши ҳамда 200 метрли трасса учун қабул қилгичнинг оптимал ўлчами ≈ 9 см эканлиги кўринади.



4-расм.
Турбулент атмосферада
гетеродинли қабул қилишда
СШН қабул қилувчи
апертура диаметрига
боғлиқлиги. Пунктир
чизиқлар – ҳисоблаш
натижаси

Сигнал дастаси қуввати бўлганда таянч даста қувватининг камайиши натижа-
сида СШН камаяди.

Диссертациянинг «Фотонлар санаиш режимида оптик майдонларнинг
корреляцион характеристикаларини ўлчаш» номли учинчи бобида фо-
тонлар санаиш режимида фотосаноқларни корреляцион қайта ишлаш орқали
оптик майдонларни қайд қилиш методи келтирилган. Ёруғликни корреля-
цион спектроскопиясида рақамли корреляторли фотонларни санаиш методи
асосий ҳисобланади. Корреляцион ёки Фурье таҳлили ёрдамида сочилган
сигналини қайта ишлаш, сочувчи объектларнинг динамик характеристикала-
рини аниқловчи сигнал параметрларини топиш, спектрал чизиқларнинг кен-
гайиши ва аралашини герцнинг улушидан ўнлаб гигагерцгача бўлган қий-
матда, сочилган ёруғликка нисбатан юқори чегаравий сезгирликда ўлчаш им-
кониятини беради. Бироқ объектларнинг турличалиги ва фотон-корреляцион
спектрометрияси учун қурилмаларнинг серияли ишлаб чиқилмаслиги амалий
масалалар учун оптик ва радиўлчов воситаларни ишлаб чиқиш ҳамда аниқ
вазифалар учун уларни оптималлаштиришни асослашга олиб келади.

Экспериментал талабдан келиб чиқиб, фотосаноқларнинг белгиланган
бўсағавий сатҳига боғланиш режимида ишловчи ва реал вақтда вақтий
корреляцион функцияни қайд қилувчи икки каналли фотон коррелятор ишга
туширилди. Бирканалли клипплашда фотосаноқларнинг нормал корреляцион
функцияси қуйидагига тенг:

$$g_k(\tau) = \langle n_k(t)n(t+\tau) \rangle / \langle n_k \rangle \langle n \rangle, \quad (5)$$

бунда клипплаш даражаси $n(T) > l_k$ бўлганида $n_k = 1$.

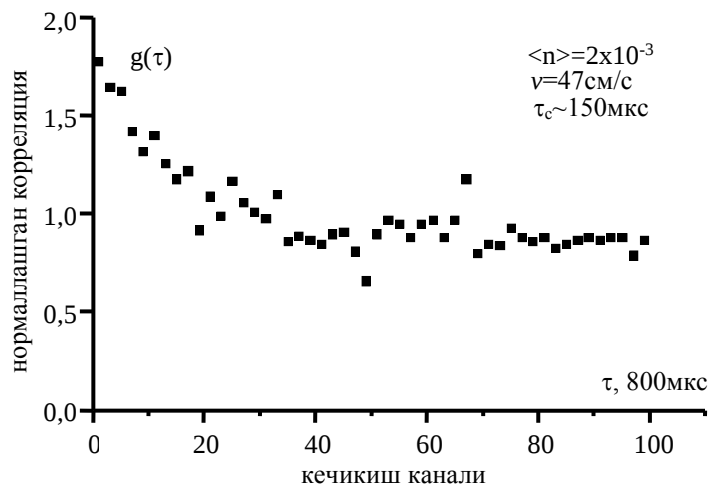
Майдоннинг Гаусс стастикаси ҳолида, у майдон корреляцион функцияси
билан қуйидагича аналитик боғланишга эга:

$$g_k(\tau) = 1 + \frac{1 + l_k}{1 + \langle n \rangle} |\gamma(\tau)|^2, \quad (6)$$

яъни квантлашда корреляцион функциянинг вақтга боғлиқлиги бузилмайди.
Корреляторнинг бу схемасини афзаллиги шундаки, унинг киришига фотоса-

ноқлар дестохастизатор ўрнатилган ҳамда мос тушишлар схемаси бошқарилувчи “дарча”га эга.

Ишлаб чиқилган фотон-коррелятор нобиржинсли фазавий сочувчидан ўтган лазер нуруни ўлчашда қўлланилди (5-расм). Фотосаноқларнинг ўртача оқими 5 кГцга тенг бўлиб, маълумотлар йиғишнинг оптимал шартига мос

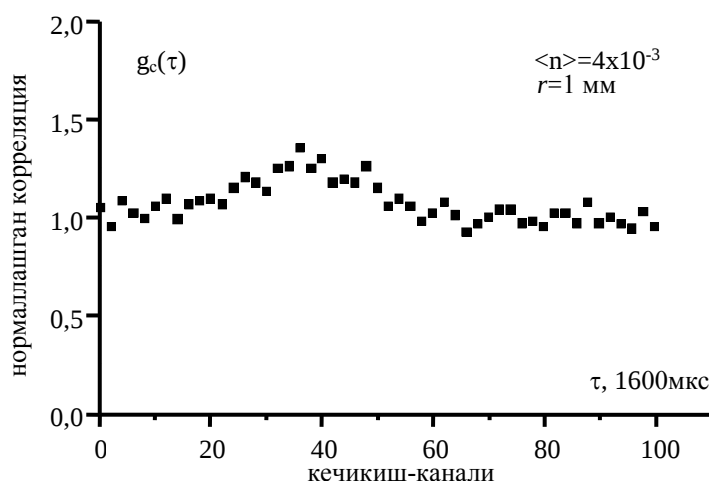


5-расм. Сочилган нурланишнинг автокорреляцион функцияси

когерентлик майдонини A_c фотодетекторнинг юзаси A билан солиштиришда қабул қилгичда фазовий ўртачалаштириш пайдо бўлади ва у натижавий функцияга мустақил мультипликатив таъсир кўрсатади:

$$g(\tau, A, T) = 1 + [\gamma(\tau, 0, T) - 1] \frac{1}{A^2} \iint_A d^2r d^2r' |\gamma(\vec{r} - \vec{r}')|^2. \quad (7)$$

Интеграл A нинг катталашиши билан камаяди ва детекторлашнинг катта юзасида иккинчи ташкил этувчи ўртачалаштириш ҳисобига йўқ бўлиб кетади.



6-расм. Детекторларни фазода r масофага ажратганда олинган кроскорреляцион функция

мос ҳолда силжийди.

Ўлчашлар натижасида корреляцион ўлчашларнинг асосий принциплари

келади. Натижалар корреляция вақтининг τ_c сочувчи тезлигига v пропорционал равишда камайтишини кўрсатди.

Ўлчашлар натижасида қуйидаги хулосалар олинди:

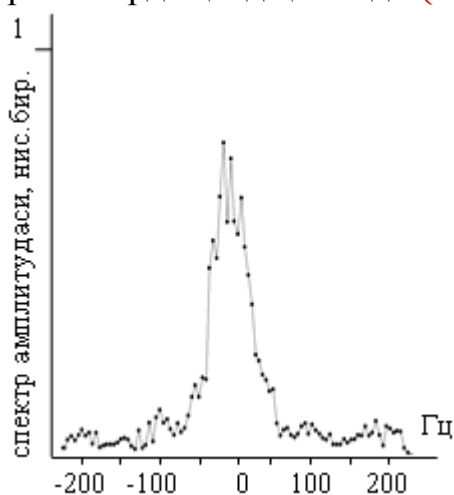
детектор юзасининг катталашиши санаш тезлигининг ортишига олиб келади ва мос ҳолда СШН ҳам ортади. Бироқ бунда фон сатҳига нисбатан корреляцион функция амплитудасининг чўққи қиймати камаяди; нурланишнинг

Иккита ажратилган фотоқабулқилгичлардан келган сигналларни кроскорреляцион функцияни қайд қилиш режимида ўлчаш қабул қилиш соҳасини мос ҳолаги икки нуқтаси орасидаги корреляция вақти ва майдоннинг фазовий деградациясини баҳолаш имкониятини беради (6-расм). Детекторлар орасидаги масофа ортиши билан корреляция чўққиси майдоннинг фазовий структурасини бир нуқтада иккинчисига кўчириш вақтига

тўғрисидаги тавсиялар бир қатор чегараланишлар билан қабул қилинди: ўн марта тўлиқ кечикишдан кам бўлмаган, турли давомийликли ўлчашлар битта йиғинди давомийликли ўлчашга нисбатан юқори аниқликни таъминлайди; боғлашни санокнинг ўртача қийматида амалга ошириш; кечикишгача корреляцион функцияни ўлчаш оптимал маълумотларни беради; детекторнинг юзаси ўлчанувчи нурланиш когерентлик майдонидан катта бўлмаслиги керак; гаусс бўлмаган сигналлар статистикаси учун оптик аралаштириш спектроскопиясини қўллаш мақсадга мувофиқ.

Диссертациянинг «**Биржинсли бўлмаган муҳитларни фазаметрик ва корреляцион тадқиқ этиш**» номли тўртинчи бобида ишлаб чиқилган методлар ва экспериментал қурилмани қўллаган ҳолда оптик биржинсли бўлмаган муҳитлардаги тадқиқот натижалари келтирилган. Турли турбулент атмосферавий каналарнинг оптик характеристикалари аниқланган. Эритмага қўшилган субмикрон заррачаларнинг ўлчамларини аниқлаш мақсадида, дисперс муҳитда ёруғликни динамик сочилишини тадқиқ қилиш ўтказилган. Ишланмаларнинг функционал имкониятлари тўғрисида хулосалар қилинган.

Дистанцион лазерли ўлчагичнинг трассасидаги синдириш кўрсаткичининг флуктуацияси тўлқин фазаси флуктуациясига олиб келиши натижасида вақтلى когерентли даражаси пасаяди ва нурланишнинг тасодифий частотавий модуляциясига олиб келади. Оптик спектрнинг оғишини ва мос ҳолда гетеродинли сигналнинг оптик трассанинг атмосфераси ҳолати ва узунлигига боғлиқ кенгайишини ўрганиш, катта базали ўлчашлар олиб бориш учун амалий қизиқиш уйғотади. Спектрнинг кенгайиши $L=100$ ва 200 м узунликдаги трассаларда қайд қилинди (7-расм).

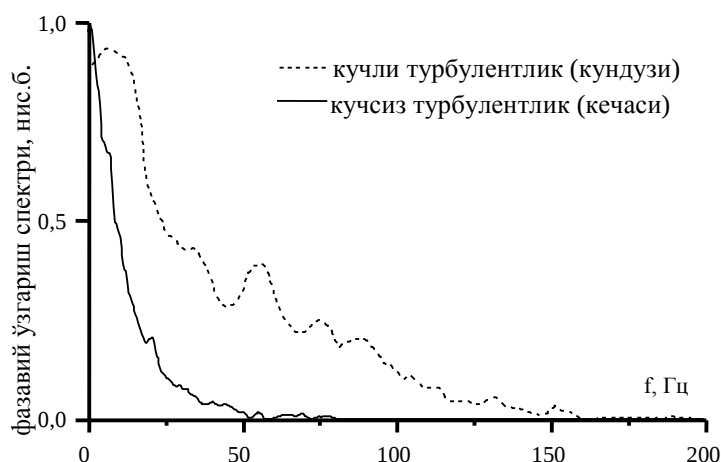


7-расм. 200 м ли трасса учун лазер нурланиши кенгайиш спектри

Спектрал тақсимот кенглиги аниқ бир трасса учун турли қийматларни қабул қилди. Ўлчашларда спектрал кенглик сочилиши $20 \div 30\%$ ни ташкил қилди ва бу ностационар атмосфера тўғрисидаги тасаввурларга тўла мос келади. Натижалар қисқа трассалар учун спектрал кенгайиш ўртача бир неча Гц/м бўлишини кўрсатди. Ўлчашлар трасса атмосферасининг турли ҳолатлари учун ҳам ўтказилди ва бунда эффектив кенглик 100 м ли трасса учун $30 \div 80$ Гц, 200 м ли трасса учун эса $40 \div 120$ Гц ни ташкил этди. Спектр кенгайишининг трасса узунлигига боғлиқлиги $L^{1/2}$ га мос келиб, назарий қарашларни тасдиқлади. Оптик тўлқиннинг фазаси бошқа параметрларга қараганда атмосферанинг турбулентлигига юқори даражада таъсирчан бўлиб, унинг ўзгариши тасодифий нобиржинсли муҳитнинг асосий характеристикаларидан бири бўлиб хизмат қилади.

Фазавий ғалаёнланишлар учун катта масштаби нобиржислик муҳим бўлиб, кичик тўлқин сони соҳасидаги фазовий спектрнинг бу қисми универсал баён этилиш шаклига эга эмас.

Майдон фазасининг фазовий ўзгаришлари ва унинг спектри атмосфера трассасининг структуравий характеристикаларини аниқлаш имкониятини беради (8-расм).



8-расм. Турбулент атмосферада фазовий ажратилган нукталар оптик фазалари орасидаги ўзгаришлар спектри

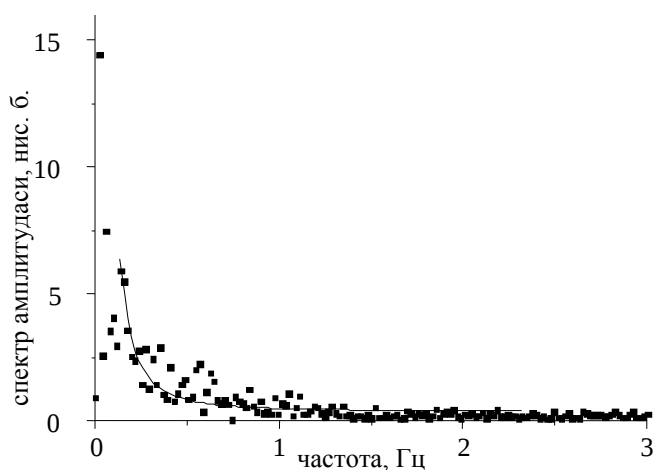
Тезкор флуктуацияларни қайд қилиш орқали фазанинг структуравий функцияси ҳисобланди:

$$D_S(\rho) = \langle [\varphi(r + \rho) - \varphi(r)]^2 \rangle \quad (8)$$

У эса даври турбулентликнинг ички масштаби билан боғлиқ булган тебранма кўринишли тўйиниш соҳасини кўрсатди. Атмосфера синдириш кўрсаткичнинг структуравий доимийси структуравий функциянинг

$$C_n^2 = \frac{D_S}{2.92 \cdot k^2 L \rho^{5/3}} \quad (9)$$

ҳисобланган қийматларидан аниқланди. Структуравий доимийни аниқлаш натижалари, унинг қийматини ортиши фазавий флуктуациялар спектри қийматини бир оз ортиши билан боғлиқлигини, айти шу вақтда спектр максимуми юқори частоталар диапазонида силжишини кўрсатди.



9-расм. Фазавий флуктуацияларнинг 200 м ли трассадаги спектрал тақсимооти.

Нукталар- эксперимент натижалари, чизик – назарий боғланишга мослаштириш

Узунлиги $2L=200$ м бўлган канал учун 10 сана/сек частота билан фазавий флуктуацияларни ёзиш олиб борилди. Сонли анализ орқали фазанинг дисперсия қиймати 250 рад^2 эканлиги аниқланди ҳамда ундан структура доимийси $C_n^2 \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ ва $\rho_c \approx 3,3$ см кореляция радиуси қийматлари топилди. 200 метрли канал учун фаза ёзувини Фурье тахлили орқали рақамли ишланган фазавий флуктуация спектри 9- расмда келтирилган. Бу эгри чизиқни таҳлил қилиш, эффектив ташкил этувчилар 1 Гц частота-

гача бўлган соҳада ётишини кўрсатди. Биздаги ўлчаш геометрияси учун, фазавий флуктуациялар спектрал зичлигини паст частотали учун ўсувчи ва юқори частотали учун камаювчи иккита асимптотик боғланиш орқали ёзиш мумкин:

$$f < f_1, \text{ да } S(f) \approx 0,4 \sigma_S^2(2L) f_1^{-1/3} f^{-2/3}; \quad (10)$$

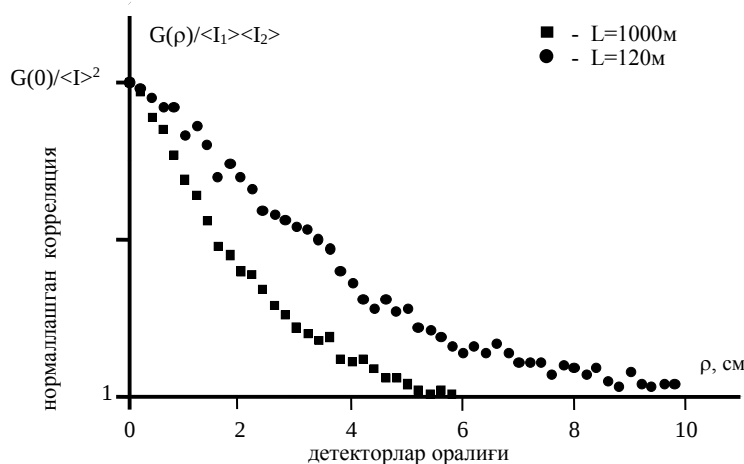
$$f > f_1 \text{ да } S(f) \approx 0,08 \sigma_S^2(2L) f_1^{5/3} f^{-8/3}, \quad (11)$$

бунда $f_1 = v/L_0$ – характерли частота бўлиб, ташқи масштаб L_0 орқали нобиржинслиликни трассага кўндаланг равишда ўтиш тезлигини аниқлайди.

Экспериментда олинган спектрнинг юқори частотали қисмини кўрсатилган боғлиқликка мослаш $f_1 \sim 0,05$ Гц баҳолаш параметрини берди ва бу атмосферанинг $v \sim 0,1$ м/с тезлик билан кўндаланг ҳаракатига мос келади. Трассани тез ўзгартириш, вақтли флуктуацияларнинг эффектив кенглиги трасса узунлигига боғлиқ эмаслигини кўрсатди ва 15÷20 Гц оралиғидаги қийматларни қабул қилди. Атмосфера массасининг ҳаракатланиш тезлигини ортганида спектрал тақсимот максимуми пасаяди ва юқори частоталар соҳасига силжийди. Спектрнинг паст частотали қисмининг нисбий амплитудаси $f < f_1$ учун бир ёзишдан бошқасигача сезиларли ўзгариб, спектрнинг ушбу қисмида атмосферанинг умумий ҳолатини кичик ўзгариши қисқа муддатли ностабилликни пайдо қилишини тасдиқлади.

Майдоннинг корреляцион функцияси ва нурланишнинг интенсивлигини аниқлаш, атмосферада лазерли информатсион системаларнинг эффективлигини баҳолаш учун муҳим аҳамиятга эга. Уларни ўлчаш интенсивлик флуктуацияси спектрини олиш, когерентлик параметрлари ва атмосферанинг ҳолати характеристикаларини аниқлаш имкониятини беради.

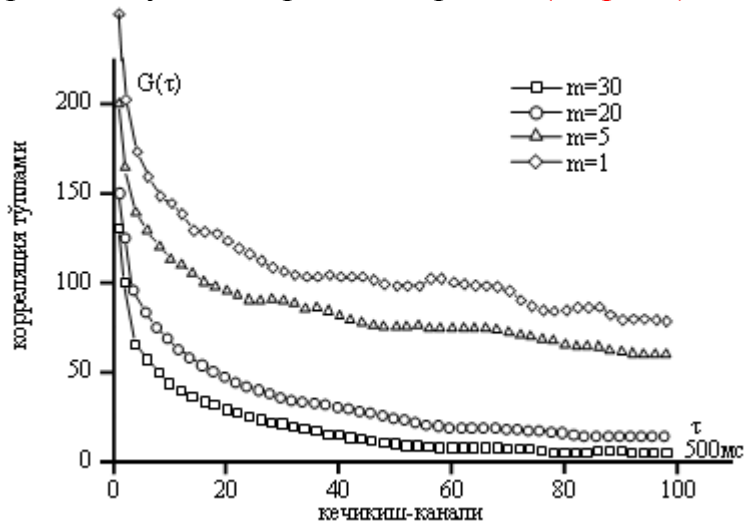
Ўлчашлар трасса узунли ~ 1 км бўлган, тоғ чўкқисидаги қайтарувчи кўзгуга юбориладиган диаметри ~ 15 см бўлган коллимирланган дастада олиб борилди. Фотоқабулқилгичларнинг кириш апертураси диаметри $d \ll \sqrt{\lambda L}$ шартни қаноатлантирди ва 1 мм га тенг бўлди.



10-расм. Атмосферада интенсивликнинг фазовий корреляцион функцияси

Асосий натижалар фотоқабулқилгичларнинг хусусий шовқини ва кучайтириш трактининг ҳалақит берувчи автокорреляциясидан ҳоли бўлган кроскорреляциялардан аниқланди (10-расм). Олинган натижалар трассанинг узунлиги ва атмосферанинг ҳолатига боғлиқ равишда, $G(\rho)$ функциянинг тушишидан аниқланган майдон корреляция радиуси 2÷6 см атрофида

ўзгаришини кўрсатди. Айни шу шароитларда фотосаноклар автокорреляцион функцияси ўлчанди. Олинган боғлиқлик асосида атмосферанинг ушбу ҳолати учун корреляция вақти ≈ 2 мс ни ташкили этди. Дисперс муҳитларни фотон–корреляцион спектрометрия усулида тадқиқ қилиш, суюқликка киритилган микрозарралардан сочилган нурланишни таҳлил қилишга асосланади. Ўзида дистилланган сувга киритилган кичик дисперсияли полистрал латексдан иборат моноструктурали системани намоён қилувчи диффузиявий сочувчи эритмада ўлчашлар олиб борилди (11-расм).



11-расм.

Эритмада сочилган
ёруғлик интенсивлигининг
автокорреляцион
функциялари

Заррачалар сферик шаклга эга эканлигин эътиборга олган ҳолда сочилиш интенсивлигининг йиғиндисидан уларнинг концентрацияси $c \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ эканлиги аниқланди. Сочилиш $\theta = 20^\circ$ бурчак остида қайд қилинди. Корреляцион функциялар компьютерда m реализация бўйича ўртачалаштирилди. Ўртачалаштириш сони ортиши билан графиклар тўғриланиши кузатилди. Бундан ташқари, янада катта қийматгача ўртачалаштиришда боғланиш фон сатҳигача эффектив тушади. Ўлчанган коррелограммани назарий апроксимациялаш натижасида тушиш вақти $t_c \approx 30$ мс эканлиги топилди. Бу сочилиш спектрининг лоренц кенглиги $\Gamma \approx 30$ Гц қийматига мос келади. Кейинги ҳисоблашлардан эритмадаги заррачаларнинг ўлчами $d = 0,41$ мкм эканлиги топилди.

ХУЛОСА

Турбулент атмосфера ва дисперс муҳитларнинг структуравий характеристикаларини ўлчаш методларини лазерли гетеродинлаш ва коррелометрия экспериментал методларини ривожлантириш орқали ишлаб чиқиш натижасида қуйидаги хулосалар қилинди:

1. Газ лазерли актив муҳитининг модалараро биения частотаси силжишига боғлиқ дисперсион характеристикалари ҳамда резонатор узунлиги вариацияларида нурланиш модасининг қайта тузиш параметрлари аниқланиб, лазер манбаи оптик частотасини стабиллаш амалга оширилган ва у узоқ муддатли стабилликни деярли бир тартибга ошириш имконини берган.

2. Амалий қўлланишлар шароитида гетеродинли ўлчашнинг сезгирлиги ҳамда эффективлигини баҳолаш учун назарий ҳисоблашлар бажрилган ва аналитик ифодалар олинган. Фотосаноқларни пуассон статистикасига бўйсунмаслигига олиб келувчи флуктуацияланувчи лазер нурланиши ҳолатида фототокнинг характери аниқланган.

3. Сигналнинг шовқинга нисбати тўлиқ чиқиш токи флуктуациясининг ўртача квадратик қийматини ўз ичига олганида, сигналнинг шовқинга нисбати учун нурланишнинг когерентлик характеристикалари ва уринувчи сигналини детекторлашдан кейинги қайта ишлаш ҳамда ўзаро таъсирлашувчи нурлар апертураси ва уларнинг тўлқин фронтининг қияликларини ҳисобга олган фотодетекторлаш эффективлигини етарлича адекват баҳолашган.

4. Синхронлаштирилган лазерли гетеродинли системани куришда лазер манбаларини бошқарувчи сигналларни шакллантиришнинг янги принциплари ва лазерлар нурланишини частотавий ва қўшимча боғлаш учун лазер резонаторни автосозловчи электрон қурилмаси ишлаб чиқилган.

5. Ишлаб чиқилган лазер системаси ёрдамида, ҳолати оптик информацияни узатувчи канал эканлигини характерловчи турли турбулент атмосферавий трассаларнинг оптик параметрлари аниқланиб трассанинг узунлиги ва турбулентлик ҳолатига боғлиқ равишда фотодетекторнинг оптимал ўлчами учун баҳолашлар ўтказилган.

6. Оптик майдонларни фотонлар санаш режимида статистик тақсимотни ҳамда фотосаноқларнинг авто ва кроскорреляцион функцияларини қайд қилиш имкониятини берувчи детекторлаш методи амалга оширилган.

7. Суюқликлардаги микрозарралар ўлчамини сочилган ёруғликни гетеродинли қайд қилиш асосида ўлчаш учун мўлжалланган экспериментал қурилмаси ва ўлчаш усули ишлаб чиқилган.

8. Ёруғликнинг динамик сочилишини ўлчаш учун фотон-корреляция методини аналитик ифодалашни танлаш назарий ва экспериментал асосланиб ишлаб чиқилган фотон корреляторни қўлланилган ҳолда сочилган нур спектри кенглиги ва эритмадаги субмикрон заррачалар ўлчами аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/Т.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА**

ЭШОНКУЛОВ ГОФУР БОБОКУЛОВИЧ

**ЛАЗЕРНОЕ ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕ
И КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ
В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ**

**01.04.11 – Лазерная физика
(физико-математические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

ТАШКЕНТ – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2018.1PhD/FM93

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (fti.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Вильданов Рамиль Рифгатович,
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Усманов Тимурбек Бекмурадович
доктор физико-математических наук, академик

Семенов Денис Иванович
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет

Защита состоится «_____» _____ 2018 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № _____), по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 26. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2017 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2017 г.)

С.А.Бахрамов,
Председатель Научного совета по присуждению
учёных степеней, д.ф.-м.н., академик

А.В. Каримов,
Учёный секретарь Научного совета по присуждению
учёных степеней, д.ф.-м.н., профессор

С.С. Курбанов,
Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению учёных степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире в активно развивающейся области лазерной физики особой задачей выступает высокоразрешающая оптическая диагностика и дистанционное зондирование в условиях оптически неоднородных сред. В этом аспекте методы лазерного гетеродинамирования и корреляционной обработки являются эффективным научным инструментом, позволяющим определять как физические параметры этих сред, так и характеристики зондируемых объектов.

На сегодняшний день в мире основанные на этих методах лазерные системы применяются в деформографии, спектрометрии светового рассеяния, микроструктурных исследованиях, в оптике атмосферы, сейсмометрии, химии, биологии, медицине и др. В связи с этим целевые исследования в таких направлениях, как развитие методологии фазометрических и корреляционных измерений на основе лазерного гетеродинамирования; разработка измерительных систем с синхронизированными по частоте лазерами и фотон-корреляционной спектрометрии; расчёт эффективности детектирования в зависимости от условий измерений оптических параметров турбулентной атмосферы и дисперсных сред являются одними из важных задач.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, создания эффективных механизмов прикладного применения достижений научно-инновационной деятельности. В частности, большое внимание уделяется вопросам внедрения перспективных технологий в отрасли науки и техники. Особо следует отметить, что данная деятельность осуществляется в рамках объявленного «Года поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий», нацеленного на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям. В этом плане разработка новых принципов построения диагностических систем, а также методов фазочувствительных и спектрометрических измерений с достижением потенциально возможных максимальных характеристик, которые могут эффективно применяться для широкого класса диагностических и локационных задач – от мониторинга окружающей среды до оптической передачи информации, имеет актуальное значение.

Данная научно-исследовательская работа в определённой степени соответствует задачам, предусмотренным в Указе Президента РУз № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017, в Постановлениях Президента РУз за № ПП-916 «О дополнительных мерах по стимулированию внедрения инновационных проектов и технологий в производство» от 15 июля 2008 года, за № ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011-2015 годах» от 15 декабря 2010 года, за № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля

2017 года, а также других нормативно-правовых документах принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данные исследования выполнены в соответствии с Государственными научно-техническими программами исследований в Республики Узбекистан:

ГНТП-13—создание наукоёмких технологий, приборов, оборудования, эталонных средств и методов измерений, анализа и контроля, вопросы метрологии, стандартизации и сертификации в отраслях экономики республики;

НТП-15—создание наукоёмких высокопроизводительных, конкурентоспособных и экспортоориентированных технологий, машин и оборудования, приборов, эталонных средств, методов измерений и контроля для отраслей экономики республики;

ППИ-3—энергетика, энерго-ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение: развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения и мехатроники.

Степень изученности проблемы. Практика экспериментальных исследований показывает, что функциональные возможности методов лазерного гетеродинамирования позволяют реализовать большое разнообразие фазометрических и спектрометрических измерений в физических исследованиях. Теоретическое обоснование этих методов выполнялись следующими учёными – А.Т.Forrester, Н.З.Cummins, D.P.Dave, В.В.Протопопов. Разработкой лазерных гетеродинамических систем занимаются ведущие научные институты с участием ученых – С.Н.Багаев, В.А.Орлов, К.Ishii, В.Wang, М.Н.Дубров. Используя эту методологию, оптические параметры турбулентной атмосферы теоретически и экспериментально исследовали В.Е.Зуев, В.А.Банах, В.В.Покасов, Р.А.Казарян. Развитие принципов спектроскопии оптического смешения представлено в работах W.Demtröder, E.Jakeman, E.R.Pike, B.Chu, А.В.Ломакин, где в сочетании с корреляционной обработкой сигналов предоставлены качественно новые возможности по достижению сверхвысоких спектральных разрешений.

Реализация этих потенциальных возможностей ставит задачу дальнейшего совершенствования методов зондирования, фотоприема и обработки регистрируемых сигналов. Большой задел в этом направлении в нашей стране был сделан научной группой – А.Т.Мирзаев, А.Н.Якубов, Р.Р.Вильданов. Однако вследствие особенностей назначения лазерных интерферометрических систем редко приводится расчёт их действующих характеристик – чувствительности и эффективности регистрации, отношения сигнала к шуму в зависимости от физической задачи и условий измерений. Поэтому разработка и исследование лазерных систем для фазометрических и корреляционных измерений является актуальной задачей как для развития данного направления, так и для практических приложений.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследо-

вательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Национального университета Узбекистана по утверждённой тематике № 01910000928 «Разработка лазерной системы для регистрации сверхмалых смещений», а также по программам фундаментальных и прикладных исследований: «Разработка и создание лазерного измерителя малых перемещений: ГНТП № 01200009766 – 2000÷2002»; «Разработка дистанционного лазерного измерителя деформационных смещений: П-10.10 – 2003÷2005»; «Разработка систем стабилизации лазерного измерителя деформационных смещений: А13-023–2006÷2008»; «Разработка лазерного фотон-корреляционного спектрометра для диагностики рассеивающих сред: ИТД 15-020 – 2009÷2011».

Целью исследования является разработка методов измерения структурных характеристик турбулентной атмосферы и дисперсных сред с совершенствованием экспериментальных методов лазерного гетеродинамирования и коррелометрии.

Задачи исследования:

определение методологии фазометрических и корреляционных измерений при оптическом зондировании на основе лазерного гетеродинамирования;

разработка и изготовление гетеродинной системы с синхронизированными по частоте лазерами;

исследование дисперсионных свойств активной среды газовых лазеров и стабилизация частоты их излучения;

проведение расчётов чувствительности и эффективности гетеродинного детектирования в зависимости от условий измерений;

разработка экспериментальной системы фотон-корреляционной спектрометрии для регистрации статистических характеристик оптических полей;

экспериментальные исследования с определением оптических параметров турбулентной атмосферы;

микроструктурные исследования дисперсной среды методом фотон-корреляционной спектрометрии.

Объектом исследования являются лазерные гетеродинные системы при зондировании неоднородных сред.

Предметом исследования являются физические процессы в зондируемых объектах, способы формирования зондирующего гетеродинного излучения и методы детектирования и анализа рассеянного излучения.

Методы исследований. Исследования сопровождаются аналитическим описанием процессов формирования и регистрации излучения и постдетекторной обработки. Использовались классические представления атмосферы как случайно неоднородного турбулентного канала, а также общепринятые положения по механизмам динамического рассеяния света в дисперсных средах. Корреляционная обработка позволяет выделять спектральные и временные характеристики оптического излучения на фоне флуктуаций. Измерения проводились с использованием современных радиофизических методов и приборов на автоматизированном измерительно-вычислительном комплексе.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены особенности модовой перестройки и характеристики дисперсионного сдвига частот генерации He-Ne лазера, позволяющие стабилизировать оптическую частоту лазерного излучателя;

получены аналитические выражения для расчетов чувствительности и эффективности гетеродинных измерений в условиях практического применения;

разработан принцип формирования сигналов управления лазерными излучателями при построении гетеродинной системы с синхронизированными лазерами;

реализован метод детектирования оптических полей в режиме счета фотонов, позволяющий регистрировать статистическое распределение, а также авто- и кросскорреляционные функции фотоотсчетов;

с использованием разработанной лазерной системы определены оптические параметры турбулентной атмосферы, характеризующие ее состояние как канала передачи оптической информации;

методом фотон-корреляционной спектроскопии с использованием разработанного коррелятора фотонов определены ширина спектра рассеянного излучения и размеры микрочастиц монодисперсного раствора.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана лазерная гетеродинная система с синхронизированными лазерами, предназначенная для фазометрических и спектроскопических измерений;

разработан коррелометр, регистрирующий авто- и кросскорреляционные функции оптического излучения в режиме счета фотонов;

в полигонных измерениях определены оптические параметры турбулентной атмосферы и оптимальные условия дистанционного зондирования;

методом фотон-корреляционной спектроскопии определены динамические параметры и размеры субмикронных частиц в суспензии.

Достоверность результатов исследования обусловлена использованием комплекса современных методов и средств измерений; аналитической проработкой полученных закономерностей на основе общепринятых классических представлений; согласованностью экспериментальных результатов с расчётными моделями и соответствием с общезначимыми представлениями и результатами других работ.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научное значение результатов диссертации заключается в расширении представления о повышении эффективности и чувствительности лазерных спектроскопических измерений турбулентной атмосферы и дисперсных сред.

Практическое значение работы заключается в том, что разработанная лазерная система используется на радиофизическом полигоне в атмосферных и сейсмометрических наблюдениях, а также при измерениях структурных характеристик дисперсных сред.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов исследований лазерного гетеродинирования при фазометрических и спектральных измерениях структурных характеристик неоднородных сред:

по определению сдвигов оптической фазы излучения в неоднородных системах получен патент патентного ведомства Республики Узбекистан на полезную модель («Автоматизированная лазерная гетеродинная система для измерения смещений» UZ № FAP 00348 от 31.01.2008 г.). Использование разработанной системы позволило повысить в два раза стабильность и точность измерений и автоматизировать процесс регистрации;

разработанные методики и экспериментальные установки были использованы в гранте БФ2-027 “Механизм формирования и роста металлических наночастиц и исследование их нелинейных оптических свойств” для повышения чувствительности и эффективности измерений (справка Министерства высшего и среднего специального образования 89-03-1025 от 16 марта 2018 года). Использование научных результатов позволяет с высокой точностью провести мониторинг и анализ состояния исследуемой среды.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации представлялись, докладывались и обсуждались на 5 международных и 12 республиканских конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 31 научных работ. Из них 11 научных статей, в том числе 8 в республиканских и 3 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Имеется патент РУз на описанную в работе гетеродинную лазерную систему.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитированной литературы, а также 2х приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Методы лазерного гетеродинирования и корреляционной обработки при оптическом зондировании**» приводится краткий обзор по применению лазерных фазометрических и спектрометрических систем в физических исследованиях, использованию лазерного гетеродинирования и фотон-корреляционной спектроскопии при изучении неоднородных сред. На основе проведённого анализа сделан вывод об необходимости дальнейших разработок и оптимизации экспериментальных методик для конкретных физических задач. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава «Лазерная гетеродинная фазометрическая система» посвящена разработке лазерной гетеродинной системы, как основного физического устройства для осуществления оптических исследований по теме диссертации. В вводной части дан краткий обзор существующих методов и достижений по данному направлению. Изложены принцип построения системы и ее функциональные расчёты. Приведены результаты исследований лазерных излучателей с целью их адаптации к разрабатываемой системе.

Чувствительность и точность фазометрических установок зависят, в первую очередь, от характеристик источников излучения, параметров оптической схемы, свойств фотоприемной и регистрирующей части в сочетании с условиями измерений. Были проведены экспериментальные исследования характеристик четырех типов промышленных и разработанных нами лазерных излучателей, используемых в гетеродинной системе. Были исследованы модовая структура, стабильность мощности, термоустойчивость, акустозащищенность, флуктуации частоты и шумы излучения. Сравнение результатов показало, что промышленные лазеры, даже имеющие герметизированный корпус, значительно уступают разработанному нами лазеру ЛГ-ККР по температурной стабильности. Характерные величины дрейфа частоты излучения составляют: при изменении температуры $\sim 500 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$, при изменении внешнего давления $\sim 20 \text{ МГц/тор}$. Флуктуации интенсивности имели наибольшие значения для лазера с РПТ, практически сплошная область до 200 Hz . В высокочастотной области для лазера ГЛ-105 наблюдается непрерывное движение спектральной группы с шириной, огибающей $\sim 20 \text{ МГц}$ с темпом 10 МГц/сек , связанное с динамикой страт в разряде постоянного тока и перестройкой поперечных типов колебаний. Количественная оценка уровней флуктуаций частоты показала затухающий до $\sim 80 \text{ Гц}$ спектр флуктуаций лазера с РПТ с максимальной оптической девиацией $\sim 10 \text{ МГц}$ в области единиц герц. Из полученных результатов следует вывод, что быстроедействие схемы автоподстройки лазеров должно как минимум перекрыть диапазон 100 Гц без учёта внешних возмущений.

При разработке лазерных измерительных систем широко применяются лазеры, работающие в режиме генерации нескольких продольных мод, так как они имеют более высокую выходную мощность излучения по сравнению с одночастотными лазерами, даже при сравнимых габаритах. Для изучения эффектов, связанных с частотной перестройкой излучения лазера от одномодового до трехмодового в пределах доплеровского контура усиления, была исследована короткая гелий-неоновая лазерная трубка типа ЛГ-149 с высокочастотной накачкой и мощностью излучения $\sim 0,5 \text{ мВт}$. Длина его резонатора устанавливалась равной 32 см , что соответствовало свободной спектральной зоне $\Delta\nu_{\text{FSR}} \approx 470 \text{ МГц}$.

Перестройка резонатора в пределах существования трехчастотного излучения, приводит к достижению максимальной мощности при распределении аксиальных мод в средней части доплеровского контура (рис.1). Для данного резонатора трехчастотный режим занимает порядка 60% от всего диапазона перестройки.

В трёхчастотном режиме работы лазера из-за дисперсионных и нелинейных эффектов в спектре фототока имеется сигнал комбинационных биений. Зависимость частоты комбинационных биений от подстройки резонатора лазера показана на рис.1. Амплитуда линии комбинационных биений уменьшалась с

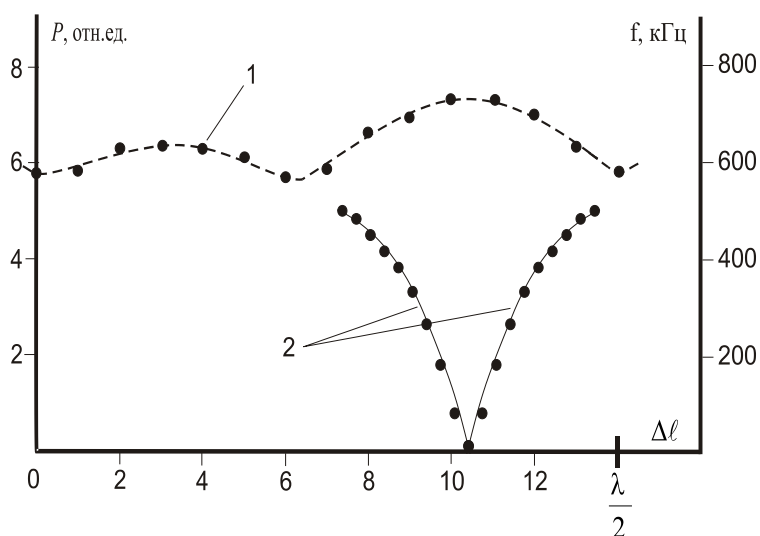


Рис. 1. Зависимость выходной мощности излучения трёхчастотного лазера – 1, и абсолютной величины частоты комбинационных биений – 2 от изменения длины резонатора

увеличением частоты f в соответствии с деградацией амплитуд крайних мод излучения, а наблюдаемая собственная ширина ее линии находилась в пределах нескольких килогерц в зависимости от участка спектра. Изменение частоты комбинационных биений было использовано в стабилизации оптических частот лазера (рис. 2). В нестабилизированном режиме частота биений испытывает общий тренд и хаотические

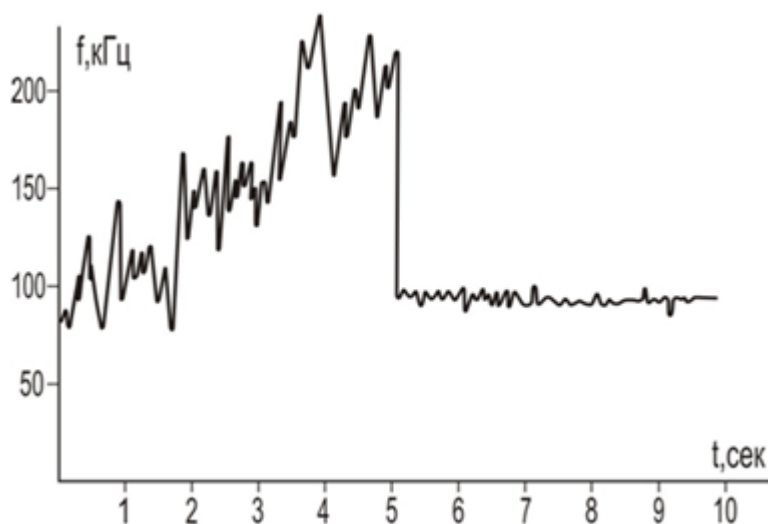


Рис. 2. Частотная девиация в отсутствии стабилизации и после ее включения

флуктуации с амплитудными значениями до 20 кГц. При включении цепи стабилизации низкочастотные биения привязываются к частоте 100 кГц и их девиация уменьшается до амплитудных значений порядка 3 кГц. В результате долговременная частотная нестабильность составила $7 \cdot 10^{-9}$ за 10 часов. Интересно отметить, что кратковременная (единицы секунд)

нестабильность имеет практически такую же величину. Это как раз и характеризуется тем, что такая стабилизация направлена на удержание лазера от долговременных тепловых расстройек, что необходимо для длительных интерферометрических измерений.

В результате исследований были решены следующие задачи: определён принцип построения гетеродинной

оптических и электронных устройств для фазометрических измерений; разработан блок частотной и фазовой синхронизации частоты излучения лазеров, которая позволила удерживать разностную частоту лазеров с относительной погрешностью 10^{-5} . В блок внедрена схема автосканирования лазеров для введения частоты биений в полосу захвата системы частотно-фазовой автоподстройки.

Далее проводится аналитический расчёт эффективности приёма и отношения сигнал/шум при лазерном гетеродинамировании в условиях практического применения. Приведены результаты натурных экспериментов в атмосфере, показавшие особенности поведения сигнала в зависимости от длины трассы и состояния турбулентности.

Для более полной оценки эффективности детектирования необходимо учитывать статистические свойства сигнала и шума. С учётом избыточных по отношению к пуассоновским флуктуациям сигнального I_s и опорного излучения отношение сигнал/шум при гетеродинном приёме получается в виде:

$$S/N|_{\text{гет}} = \frac{\overline{j_s^2}}{\overline{j_{\text{ш}}^2}} = \frac{2\eta\overline{I_s}}{(1 + \eta F_s + \eta F_g)\Delta f}, \quad (1)$$

где j_s и $j_{\text{ш}}$ – сигнальный и шумовой фототоки; η – квантовая эффективность фотодетектора; $F_i = T \frac{\sigma_i^2}{I_i}$ – параметр, характеризующий степень отличия распределения вероятности фотоотсчетов от пуассоновской для сигнального s и гетеродинного g излучений с учётом их дисперсий σ_i , Δf – полоса регистрируемых частот.

Как и представлялось, увеличение фактора нестабильности как сигнального, так и опорного излучений ухудшают обнаружительную способность гетеродинной системы, при этом для достаточно большой мощности падающего на фотодетектор излучения влияние шумов детектирования ослабляется.

Далее, вводя в анализ последетекторную обработку сигнала с учётом фильтрации и шумов фототока, а также пространственной конфигурации и когерентных характеристик полей, было получено выражение для сигнальной амплитуды гетеродинного тока:

$$\tilde{S} = \tilde{S}_0 \left[\frac{1}{A} \exp\left(\frac{\Delta}{w}\right) \right]^2 2 \iint_A d^2r d^2r' \frac{J_1(v)}{v} \exp\{i\psi - r^2\beta - r'^2\beta^* + r[2\beta\Delta \cos(\vartheta - \varphi) - ik_g\theta_g \tilde{n}\cos\vartheta] + r'[2\beta^*\Delta \cos(\vartheta' - \varphi) + ik_g\theta_g \tilde{n}\cos\vartheta']\}, \quad (2)$$

где $\tilde{S}_0$ – множитель, включающий все размерные величины сигнальной амплитуды; r – радиус вектор в плоскости детектора площадью A и ϑ – его полярный угол; Δ , w , ψ , β , θ , φ – конфигурационные параметры фотосмещения,

$$v = \frac{k_s}{R} \rho [r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\vartheta - \vartheta')]^{1/2}, \quad (3)$$

$J_1(v)$ – функция Бесселя первого порядка. Выражение (3) позволяет исследовать влияние рассогласований того или иного характера на эффективность гетеродина. Вычисления показали, что двукратная разница в кривизне фронтов на $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ приведет к 30% снижению сигнала уже при размере детектора $a_d \approx 1 \text{ мм}$, в то время как на $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ такое же уменьшение наступит лишь при $a_d = 3,5 \text{ мм}$. На рисунке 3 показаны результаты атмосферных экспериментов.

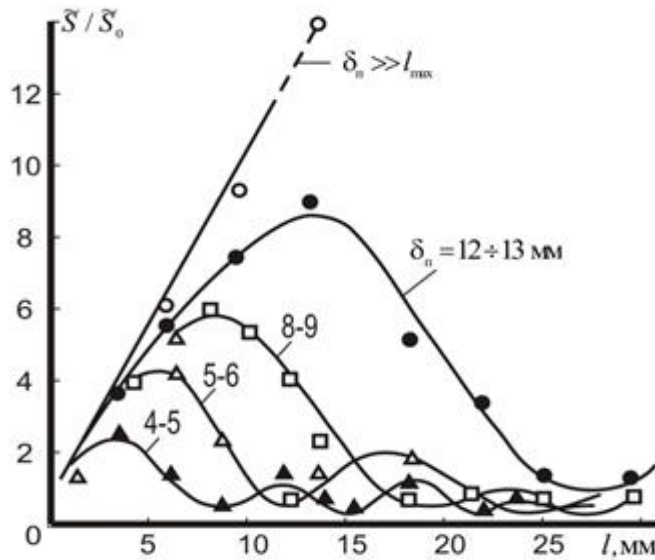


Рис. 3. Зависимость $\tilde{S} / \tilde{S}_0$ от размера апертуры при различных наклонах осей коллимированных пучков в атмосфере.

$$C_n^2 \sim 4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}, \lambda = 0,63 \text{ мкм}$$

Измерения по одноконцевой системе (с разнесёнными приёмником и передатчиком) проводились на 200-метровой трассе для слабой (в ночное время) атмосферной турбулентности. Углы рассогласования фронтов обратно пропорциональны ширине интерференционных полос δ_n отмеченным рядом с кривыми.

Как и следует из приведённого выше анализа, поведение кривых имеет осциллирующий характер. Наличие турбулентности на трассе сигнального луча ведёт к ухудшению видимости гетеродинной интерфе-

ренции из-за фазовых флуктуаций фронта волны.

Для турбулентной трассы было введено выражение для функции когерентности поля и проведены аналитические вычисления для практически важных случаев:

$$S / N \approx \frac{\eta I_s}{\Delta f} \frac{1}{\tilde{D}} \left[\sqrt{\pi} \cdot \text{erf}(l \sqrt{\tilde{D}}) - \frac{1}{l \sqrt{\tilde{D}}} (1 - e^{-l^2 \tilde{D}}) \right]^2 \quad (4)$$

где γ – степень временной когерентности, $\tilde{D} = 1.64 C_n^2 k^2 L l_0^{-1/3}$, L – длина трассы, l_0 – внутренний масштаб турбулентности, l – размер детектора; $\text{erf}(l \sqrt{\tilde{D}})$ – интегральная функция ошибок.

Измерения проводились на 50 и 200-метровой трассах с умеренной турбулентностью. Интенсивность коллимированного пучка диаметром 10 см была установлена на уровне $I_s \approx 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, интенсивность опорного излучения варьировалась от $I_g \approx I_s$ до $I_g \approx 10 I_s$. Для количественных вычислений брались вполне адекватные параметры: $\eta = 0.3$, $\gamma = 0.8$, $\Delta f = 10^4 \text{ Гц}$, $l_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На рис. 4. представлены результаты измерений сигнала и оценочные расчётные кривые, и асимптоты.

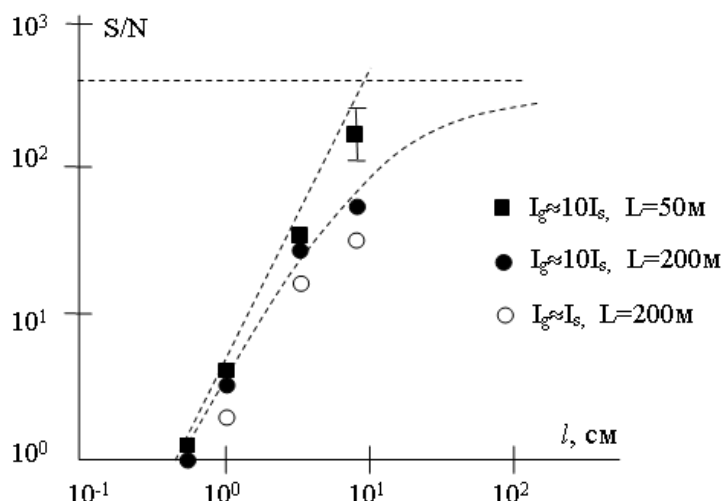


Рис. 4.

Поведение ОСШ в зависимости от диаметра приёмной апертуры для гетеродинного приёма в турбулентной атмосфере
Пунктирные линии – расчётные кривые

В подтверждение теоретических выкладок из кривых следует, что ОСШ быстро насыщается с ростом длины трассы, оптимальный размер приёмника составляет ≈ 9 см для 200 метровой трассы. С уменьшением мощности опорного излучения при постоянстве сигнального ОСШ уменьшается.

В третьей главе диссертации «Измерение корреляционных характеристик оптических полей в режиме счета фотонов» описывается метод детектирования оптических полей в режиме счета фотонов с корреляционной обработкой фотоотсчетов. Метод счета фотонов в сочетании с цифровым коррелятором становится основным направлением в корреляционной спектроскопии света. Обработка сигнала рассеяния с помощью корреляционного или Фурье анализа позволяет найти характеристические параметры сигнала, определяющие динамические характеристики рассеивающих объектов, измерить уширение и смещение спектральных линий на величину от долей герца до десятков гигагерц с предельно высокой чувствительностью к рассеянному свету. Однако разнообразие объектов и отсутствие доступных серийных приборов для фотон-корреляционной спектроскопии приводит к тому, что для практических приложений оправдана разработка оптических и радиоизмерительных средств, оптимизированных для конкретных задач.

Исходя из экспериментальных потребностей, был налажен двухканальный фотонный коррелятор, работающий в режиме привязки к заданному пороговому уровню отсчетов, и регистрирующий временные корреляционные функции в реальном времени. Нормированная корреляционная функция фотоотсчетов для одноканального клиппирования в этом случае представляется в виде:

$$g_k(\tau) = \langle n_k(t)n(t+\tau) \rangle / \langle n_k \rangle \langle n \rangle, \quad (5)$$

где $n_k=1$ при $n(T) > l_k$ – уровня клиппирования.

В случае гауссовой статистики поля она имеет аналитическую связь с корреляционной функцией поля

$$g_k(\tau) = 1 + \frac{1+l_k}{1+\langle n \rangle} |\gamma(\tau)|^2, \quad (6)$$

т.е. в случае квантования зависимость корреляционной функции от времени не искажается. Особенностью данной схемы коррелятора является то, что на

его входе установлен дестохастизатор фотоотсчетов, а также имеется регулируемое «окно» схемы совпадений.

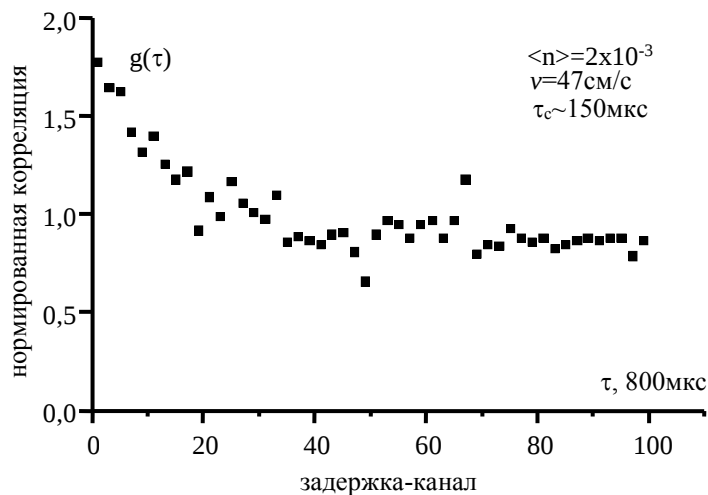


Рис. 5. Автокорреляционные функции рассеянного излучения

Разработанный фотонный коррелятор использовался при измерениях лазерного излучения после неоднородного фазового **рассеивателя** (рис. 5).

Средний поток фотоотсчетов был определён порядка 5 кГц, что соответствовало оптимальным условиям набора данных (сглаживанию статистического разброса и предотвращению перебора промежуточной памяти коррелятора). Результаты показали пропорциональное уменьшение времени кор-

реляции τ_c со скоростью рассеивателя v .

При измерениях были сделаны сопутствующие выводы. Увеличение площади детектора приводит к увеличению скорости счета и соответственно увеличивается ОСШ. Однако при этом уменьшается амплитуда пика (контраст) корреляционной функции по отношению к уровню фона. Пространственное усреднение на приёмнике проявляется при сопоставлении площади когерентности излучения A_c с площадью фотодетектора A , оно влияет как независимое мультипликативное воздействие на результирующую функцию:

$$g(\tau, A, T) = 1 + [\gamma(\tau, 0, T) - 1] \frac{1}{A^2} \iint_A d^2r \, d^2r' |\gamma(\vec{r} - \vec{r}')|^2. \quad (7)$$

Интеграл уменьшается при увеличении A , и при больших площадях детектирования второе слагаемое исчезнет вследствие усреднения.

Измерение в режиме регистрации кросскорреляционной функции сигналов от двух разнесённых фотоприемников позволяет оценить, как время корреляции между соответствующими точками в области приёма, так и пространственную деградацию поля (**рис. 6**). С увеличением расстояния r между детекторами, пик корреляции смещается пропорционально времени переноса пространственной структуры поля от одной точки до другой, а уменьшение пространственной корреляции приводит к уменьшению амплитуды этого пика.

В результате проведённых исследований были приняты с некоторыми ограничениями высказанные в рекомендации об основных принципах и режимах корреляционных измерений: несколько измерений с разной продолжительностью, но не менее десятикратной полной задержки, обеспечивает

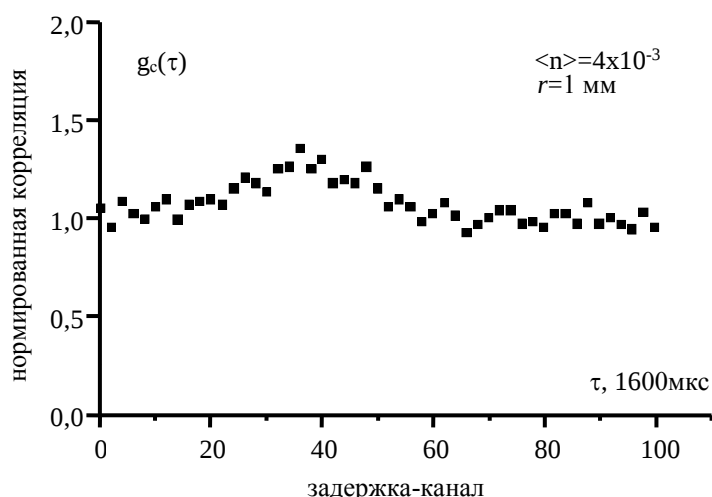


Рис. 6. Поведение кросскорреляционных функций при пространственном разнесении детекторов на расстояние r

более высокую точность, чем одно измерение суммарной продолжительности; привязку следует осуществлять к величине среднего уровня счета; оптимальные данные даёт измерение корреляционной функции до задержек, приблизительно в два раза превышающих время ее спада; площадь детектора не должна превышать площади когерентности измеряемого поля; для сигналов с негауссовой статистикой все же

лучше использовать спектроскопию оптического смещения.

Четвертая глава диссертации «**Фазометрические и корреляционные исследования неоднородных сред**» содержит результаты исследований оптически неоднородных сред с использованием разработанных методик и экспериментальных систем. Определены оптические характеристики различных турбулентных атмосферных каналов. Проведены исследования динамического рассеяния света в дисперсной среде с определением размеров, взвешенных в растворе субмикронных микрочастиц.

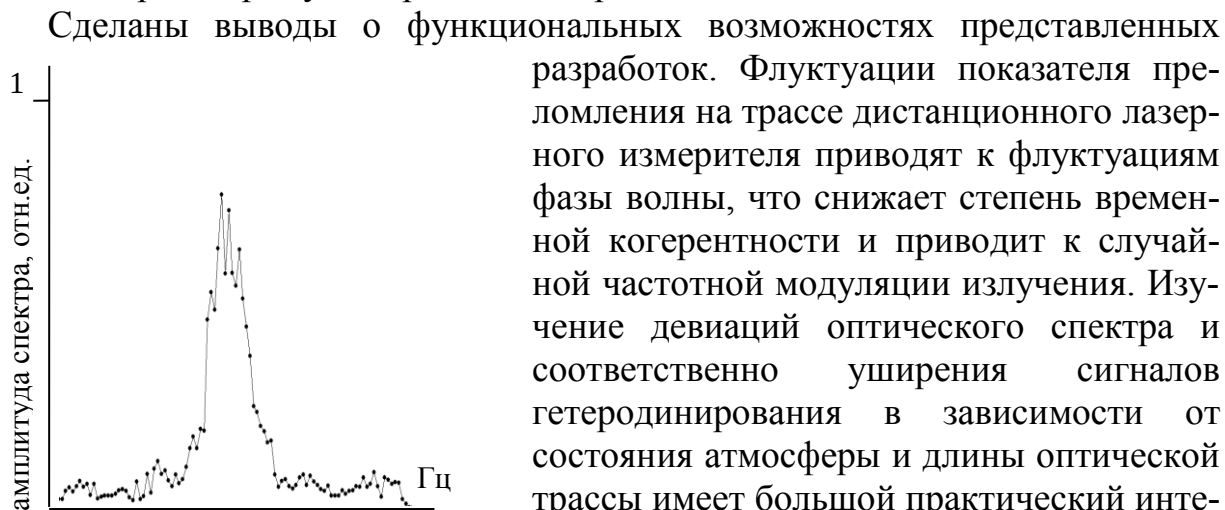


Рис. 7. Спектр уширенного лазерного излучения в атмосфере для трассы 200 м

Сделаны выводы о функциональных возможностях представленных разработок. Флуктуации показателя преломления на трассе дистанционного лазерного измерителя приводят к флуктуациям фазы волны, что снижает степень временной когерентности и приводит к случайной частотной модуляции излучения. Изучение девиаций оптического спектра и соответственно уширения сигналов гетеродинирования в зависимости от состояния атмосферы и длины оптической трассы имеет большой практический интерес, особенно когда проводятся измерения на больших базах. Уширения спектра регистрировались на трассах с длинами $L=100$ и 200 м (рис. 7).

Ширина спектрального распределения даже для определённой трассы имела значительный разброс, несмотря на то, что интервал между прописями составлял несколько минут. Это вполне соответствует представлениям о нестационарности атмосферы, когда разброс в измеряемых ширинах спектра составляет $20\div 30\%$. Результаты также показали, что спектральное уширение при распространении излучения для коротких трасс в среднем составляет не-

сколько Гц/м. Измерения проводились и для различных состояний атмосферы, при этом диапазон эффективных ширин спектра для трассы 100 м составлял 30÷80 Гц, а для трассы 200 м порядка 40÷120 Гц. Зависимость величины уширения спектра от длины трассы соответствует закону $L^{1/2}$, что согласуется с теоретическими выкладками.

Фаза оптической волны в большей степени, чем остальные параметры, подвержена влиянию турбулентной атмосферы, и ее изменения могут служить одной из основных характеристик случайно неоднородной среды. Для фазовых возмущений более важны крупномасштабные неоднородности,

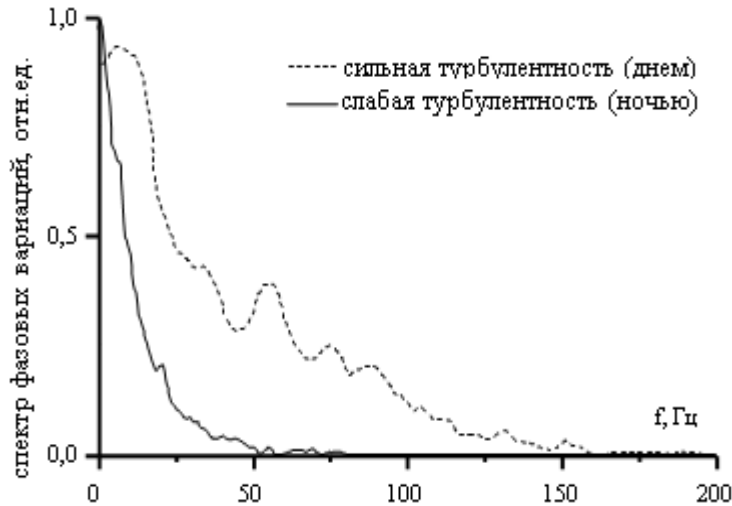


Рис.8. Спектры вариации оптической фазы между пространственно-разнесенными точками в турбулентной атмосфере

а этот участок пространственного спектра в области малых волновых чисел не имеет универсальной формы описания. Пространственные вариации фазы поля и их спектр (рис.8) позволяют определить структурные характеристики атмосферной трассы. По записи быстрых флуктуаций рассчитывались структурные функции фазы, чтобы определить структурные характеристики атмосферной трассы:

$$D_S(\rho) = \langle [\varphi(r + \rho) - \varphi(r)]^2 \rangle \quad (8)$$

которые показали участок насыщения с колебательным поведением, период которого связан с внутренним масштабом турбулентности.

Структурная постоянная показателя преломления атмосферы определялась по вычисленным значениям структурной функции

$$C_n^2 = \frac{D_S}{2.92 \cdot k^2 L \rho^{5/3}}. \quad (9)$$

Результаты определения структурной постоянной показывают, что ее увеличение связано с незначительным увеличением ширины спектра фазовых флуктуаций, в то время как максимум спектра смещается в диапазон более высоких частот.

Для канала длиной $2L=200$ м проведена пропись фазовых флуктуаций с частотой 10 отсчетов/сек. Численный анализ определил величину дисперсии фазы 250 рад^2 , откуда было получено значение структурной постоянной $C_n^2 \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ и радиуса корреляции $\rho_c \approx 3,3 \text{ см}$.

Спектр фазовых флуктуаций, полученный путём Фурье-анализа оцифрованной фазовой прописи для 200 метрового канала, представлен на рис. 9.

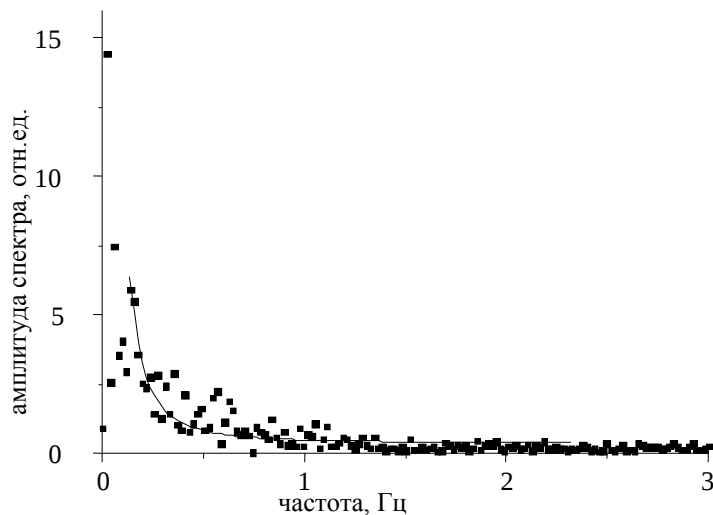


Рис. 9.

Спектральное распределение фазовых флуктуаций 200 метровой трассы. Точки – экспериментальные данные, линия – фитирование по теоретической зависимости

Из анализа этой кривой видно, что эффективные составляющие находятся в области частот до 1 Гц.

Для нашей геометрии измерения спектральную плотность фазовых флуктуаций можно описать двумя асимптотическими зависимостями для нарастающей низкочастотной и спадающей высокочастотной ветвей:

$$S(f) \approx 0,4\sigma_S^2(2L)f_1^{-1/3}f^{-2/3}, \text{ для } f < f_1, \quad (10)$$

и

$$S(f) \approx 0,08\sigma_S^2(2L)f_1^{5/3}f^{-8/3}, \text{ для } f > f_1, \quad (11)$$

где $f_1 = v/L_0$ – характерная частота, определяемая поперечной к трассе скоростью переноса неоднородностей v через внешний масштаб L_0 .

Фитирование высокочастотной ветви экспериментального спектра в соответствии с указанной зависимостью дало оценочный параметр для $f_1 \sim 0,05$ Гц, что соответствует поперечному движению атмосферы со скоростью $v \sim 0,1$ м/с. При быстром переключении трасс отмечено, что эффективная ширина спектра временных флуктуаций фазы практически не зависит от длины трассы и находится в пределах 15÷20 Гц. При увеличении скорости движения атмосферных масс максимум спектрального распределения понижается и смещается в область более высоких частот. Относительная амплитуда низкочастотной части спектра для $f < f_1$ заметно варьировалась от одной реализации записи фазы до другой, подтверждая кратковременную нестабильность этой области спектра даже при неизменном общем состоянии атмосферы.

Определение корреляционных функций поля и интенсивности излучения имеет существенное значение для оценки эффективности работы лазерных информационных систем в атмосфере. Их измерение позволяет получить спектр флуктуаций интенсивности, определить параметры когерентности и характеристики состояния атмосферы.

Измерения проводились в коллимированном пучке диаметром ~ 15 см, передаваемом на отражательное зеркало на вершине горы, длина трассы составляла ~ 1 км. Диаметр входной апертуры фотоприемников удовлетворял условию $d \ll \sqrt{\lambda L}$ и составлял 1 мм. Основные результаты определялись по кросскорреляциям, в которых устранялись мешающие автокорреляции собст-

венных шумов фотоприемников и тракта усиления, благодаря их статистической независимости (рис. 10).

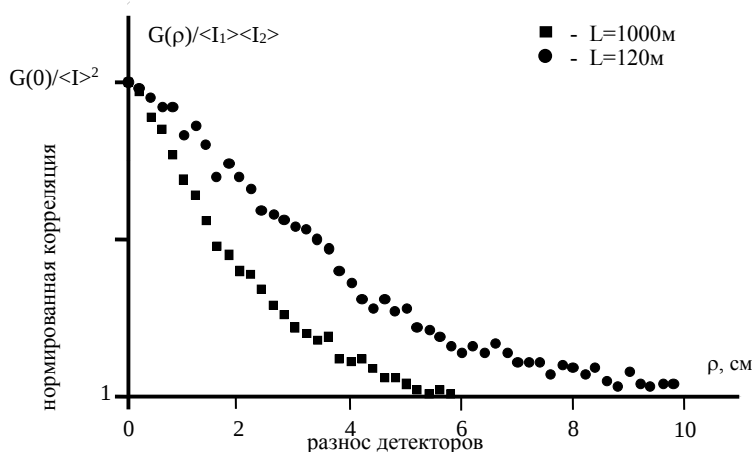


Рис. 10. Пространственные корреляционные функции интенсивности в атмосфере.

Полученные результаты показывают, что в зависимости от длины трассы и характера конкретного атмосферного состояния, радиус корреляции поля, измеренный по уровню спада функции $G(\rho)$, изменяется в несколько раз $2 \div 6$ см. В тех же условиях измерялась автокорреляционная функция фотоотсчетов.

Из характерного поведения полученной зависимости время корреляции излучения для данного состояния атмосферной турбулентности составило ≈ 2 мс.

Использование метода фотон-корреляционной спектроскопии для исследования дисперсных систем основывается на анализе рассеянного света от взвешенных в жидкости микрочастиц. Были проведены измерения диффузно рассеивающего раствора, представляющего собой моноструктурную систему со взвешенными в дистиллированной воде мелкодисперсными частицами полистирольного латекса (рис. 11).

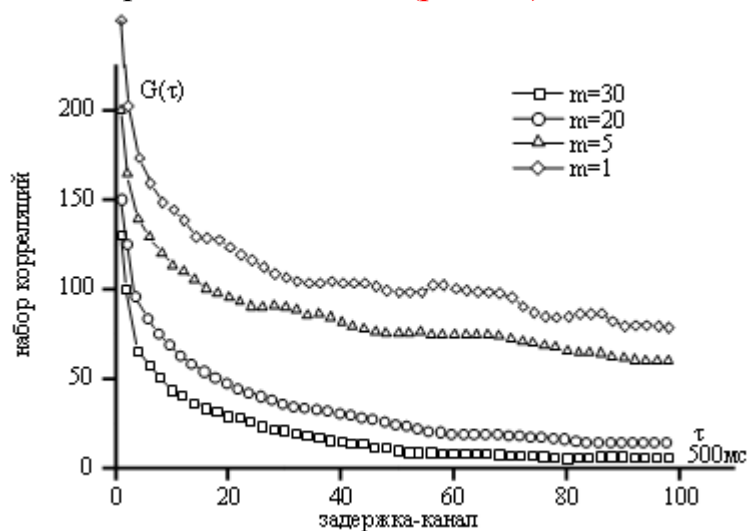


Рис. 11. Автокорреляционные функции интенсивности рассеянного в растворе света

С учётом того, что частицы имеют близкую к сферической форму, по интегральной интенсивности рассеяния была оценена их концентрация $c \sim 10^{10}$ см⁻³. Рассеяние регистрировалось при углах $\theta = 20^\circ$. Корреляционные функции в компьютере усреднялись по m реализациям. С увеличением количества усреднений наблюдается выравнивание графиков. Кроме того, при большем усреднении зависимости более эффективно спадают к фоновому уровню.

По аппроксимации измеренной коррелограммы теоретической зависимостью было получено значение времени спада $t_c \approx 30$ мс. Это соответствует ширине лоренцевого спектра рассеяния $\Gamma \approx 30$ Гц. В результате

дальнейших расчетов получено значение размеров раство-ренных частиц $d = 0,41$ мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований лазерного гетеродинамирования при фазометрических и спектральных измерениях структурных характеристик неоднородных сред сделаны следующие выводы:

1. Исследованы дисперсионные характеристики активной среды газового лазера, связанные со сдвигом частот межмодовых биений, а также параметры модовой перестройки излучения при вариациях длины резонатора и улучшена долговременная стабильность почти на порядок.

2. Выполнены теоретические расчеты и получены аналитические выражения для оценки чувствительности и эффективности гетеродинных измерений в условиях практического применения. Определен характер фототока в случае флуктуирующего лазерного излучения, что приводит к непуассоновской статистике фотоотсчетов;

3. Обоснован выбор более адекватной оценки эффективности фотодетектирования, когда в отношении сигнала к шуму входит среднеквадратичное значение флуктуаций полного выходного тока и получено выражение для ОСШ с учетом когерентных характеристик излучения и последетекторной обработки сигнала биений, а также с учетом апертур взаимодействующих пучков и наклонов их волновых фронтов;

4. Разработано электронное устройство автоподстройки лазерных резонаторов и новый принцип формирования сигналов управления лазерными излучателями при построении гетеродинной системы с синхронизированными лазерами для частотной и дополнительной фазовой привязок лазерных излучений.

5. С использованием разработанной лазерной системы определены оптические параметры различных турбулентных атмосферных трасс, характеризующие их состояние как канала передачи оптической информации и проведены оценки для оптимального размера фотодетектора в зависимости от длины трассы и состояния турбулентности;

6. Реализован метод детектирования оптических полей в режиме счета фотонов, позволяющий регистрировать статистическое распределение, а также авто- и кросскорреляционные функции фотоотсчетов.

7. Разработана методика и экспериментальная установка, предназначенная для измерения размеров микрочастиц в жидкой среде на основе гетеродинной регистрации рассеянного излучения.

8. Обоснован выбор аналитического описания метода фотон-корреляционной спектроскопии для измерения динамического рассеяния света с использованием разработанного коррелятора определены размеры взвешенных в растворе субмикронных микрочастиц.

**SCIENTIFIC COUNCIL No.DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 ON AWARD
OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE PHYSICAL AND TECHNICAL
INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER
TECHNOLOGIES, SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

ESHONKULOV GOFUR BOBOKULOVICH

**LASER HETERODYNING AND CORRELATION PROCESSING
IN MEASUREMENTS IN OPTICAL INHOMOGENEOUS MEDIA**

**01.04.11 – Laser physics
(physical and mathematical sciences)**

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY
(PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT– 2018

The theme of the doctoral (PhD) dissertation on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2018.1PhD/FM93

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at fti.uz and on the website of “Ziyonet” Information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:

Vildanov Ramil Rifgatovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant Professor

Official opponents:

Usmanov Temur Bekmuratovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Academician

Semenov Denis Ivanovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dosent

Leading organization:

Tashkent State Technical University

The defense of the dissertation will be held on “___” _____ 2018, at ___ at the meeting of the Scientific Council No. **DS****c.27.06.2017.FM/T.34.01** at the Physical and Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 2B Bodomzor yuli str., 100084 Tashkent. Tel./Fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Physical and Technical Institute (registered under No ____). Address: 2B Bodomzor yuli str., 100084 Tashkent. Tel.: (+99871) 235-30-41.

The abstract of dissertation was distributed on “___” _____ 2018.
(Registry record No. ____ dated “___” _____ 2018.)

Y

S.A.Bakhramov

Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Academician

A.V.Karimov

Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences, Professor

C.C.Kurbanov

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical
Sciences,

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research is to develop methods for measuring the structural characteristics of the turbulent atmosphere and disperse media with the development of experimental methods of laser heterodyning and correlometry.

The object of the research are the parameters of laser radiation during the passage of randomly inhomogeneous and disperse media.

Scientific novelty of the research consists of the following:

- the features of the mode tuning and the characteristics of the dispersion shift of generation frequencies of the He-Ne laser were determined, which make it possible to stabilize the optical frequency of the laser emitter;

- calculations were performed and an analytical expression was obtained for estimating the sensitivity and efficiency of heterodyne measurements under conditions of practical application;

- the principle of forming control signals for laser emitters in the construction of a heterodyne system with synchronized lasers was developed;

- a method for detecting optical fields in photon counting mode was realized, which makes it possible to register a statistical distribution, as well as auto- and cross-correlation functions of photocounts;

- using the developed laser system, the optical parameters of the turbulent atmosphere were determined, characterizing its state as a transmission channel of optical information;

- the width of the scattered radiation spectrum and the sizes of the microparticles of the monodisperse solution were determined by the method of photon-correlation spectrometry with use of the developed photon correlator.

Implementation of the research results. Based on the results of laser heterodyning studies for phase and spectral measurements of the structural characteristics of inhomogeneous media:

- the patent of the Republic of Uzbekistan for utility model (“Automated laser heterodyne system for measuring displacements” UZ No.FAP 00348 dated January 31, 2008) was obtained for determining the shifts of the optical phase of radiation. Using the developed system allowed to increase the stability and accuracy of measurements and automate the registration process;

- the developed methods and experimental sets were used in the grant БФ2-027 “Mechanism of formation and growth of metal nanoparticles and study of their nonlinear optical properties” to improve the sensitivity and efficiency of measurements (certificate of the Ministry of higher and secondary special education 89-03-1025 dated March 16, 2018). Use of scientific results allows to carry out with high accuracy monitoring and analysis of a condition of the investigated environment.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation was presented on 120 pages consisting of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and 2 appendixes.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Азаматов З.Т., Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Лазерли гетеродинлаш ва унинг амалиётда қўлланилиши. Монография. Тошкент. Университет нашриёти. 2017 йил. 96 б.

2. Патент РУз № FAP 00348. Автоматизированная лазерная гетеродинная система для измерения смещений / Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. // Расмий ахборотнома. –Ташкент, 2008. - №2.

3. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Гетеродинная система с частотной привязкой излучения // Узбекский Физический журнал. - Ташкент. 2005. - №3. - С.204-207. [01.00.00; № 5].

4. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Оптическое спектральное уширение при лазерном гетеродинировании в атмосфере // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2007. - Т.9. №.5-6. - С.342-344. [01.00.00; № 5].

5. Vildanov R.R., Eshonqulov G.B. Measuring optical characteristics of the atmosphere with a laser heterodyne system// Journal of Applied Spectroscopy. – Minsk, 2008 - Vol. 75, #6 – Pp.902-904. [№ 11. Springer; IF=0,510].

6. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Фотон-корреляционная спектрометрия для анализа микрочастиц // Вестник НУУз. - Ташкент, 2009. №2. - С.115-117. [01.00.00; № 8].

7. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Применение фотон-корреляционной спектрометрии для анализа дисперсных частиц// Uzbek J.Phys. - Ташкент, 2010. - v.12, №.3. - Pp.165-168. [01.00.00; № 5].

8. Vildanov R. R., Eshonqulov G.B. Application of a heterodyne laser system to determine parameters of turbulent atmosphere // Ukrainian Journal of Physics.- Kiev, 2011.-V.56.#1.-p.18-20. [№ 51. Academperiodika; IF=0,329].

9. Vildanov R.R., Eshonqulov G.B. Research of characteristics of multi-frequency laser radiation in case of mode retuning // Radioelectronics and Communications Systems. –Kiev, 2011, Vol. 54, No. 7, pp. 398–400. [№ 23. Springer; IF=0,462].

10. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Эффекты согласования фронтов при лазерном гетеродинировании // Uzbek J.Phys. - Ташкент, 2014, v.16, №3. с.243-246. [01.00.00; № 5].

11. Азаматов З.Т., Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Стабилизация частоты излучения газового лазера с использованием дисперсионных свойств активной среды // Uzbek J.Phys. - Ташкент, 2014, v.16, №5. с.392-395. [01.00.00; № 5].

12. Азаматов З.Т., Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Гетеродинная система для изучения динамического рассеяния света в дисперсных средах // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. - Ташкент, 2016. №6, с.18-21. [01.00.00; № 7].

13. Азаматов З.Т., Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Использование лазерного гетеродинного деформографа для сейсмометрических и атмосферных измерений // Вестник НУУз. №2/1, - Ташкент, 2016., с.286-291. [01.00.00; № 8].

II бўлим (II часть; Part II)

14. Эшонкулов Г.Б. Исследование инерционности частотной привязки лазеров // Лазерная физика и лазерная спектроскопия. Труды науч.-практ. сем. – Ташкент, 2004г. - С.90-93

15. Эшонкулов Г.Б. Фазовый детектор для лазерного интерферометра// Экспериментальная и теоретическая физика: Сб. научных трудов. -Т.:НУУз. - 2006. - С.90-93.

16. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Лазерные системы измерения движущихся объектов // 1000 летию академии Маъмун-Хорезма: Материалы межд. конф. -Хива, 2006. с.53-55.

17. Эшонкулов Г.Б. Анализ шумов лазеров в измерительных системах // Илм заковатимиз –сенга она-Ватан. Матер. респ.. конф.- ФарГУ, 2006. - С. 22-23

18. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Лазерная гетеродинная система для атмосферных измерений // Лазерные технологии в промышленности, медицине и сельском хозяйстве: Труды научно-практ.конф. -Ташкент, 2007. - С.10-13.

19. Эшонкулов Г.Б. Измерение оптических параметров турбулентной атмосферы// Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики: Матер. Респ. конф. -Ташкент, 2007. с.61-62.

20. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Коррелометр лазерного рассеяния. Оптические методы в современной физике // Материалы Республиканской конференции. - Ташкент, 2008 г. - С.131-133.

21. Эшонкулов Г.Б. Стабилизация дистанционных лазерных измерений в атмосфере // Оптические методы в современной физике: Материалы республиканской конференции - Ташкент, 2008. - С.119-121.

22. Эшонкулов Г.Б. Лазерная гетеродинная фазометрическая система // Физика конденсированных сред: от фундаментальных исследований к практическому применению: Матер. Респ. конф. –Ташкент, 2008 г.–С.21-26

23. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Влияние турбулентной атмосферы на излучение при лазерном гетеродинировании// Молодежь и наука: Материалы II-Межд. науч.-практ. конф. - Невинномысск (Россия), 2009г.- С.31-32.

24. Вильданов Р.Р., Эшонкулов Г.Б. Корреляционные измерения монодисперсного раствора // Современная физика и ее перспективы: Материалы Респ. конф. - Ташкент, 2009. - С.95-96.

25. Эшонкулов Г.Б., Вильданов Р.Р. Оценка эффективности гетеродинного приема с учетом постдетекторной обработки. // Замонавий физиканинг долзарб муаммолари” Республика илмий-амалий анжумани материаллари ТерДУ, 2013 йил, 41-44 б.

26. Эшонкулов Г.Б., Вильданов Р.Р. Эффективность гетеродинирования с учетом статистики сигнала. // Международная конференция “Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред”, СамГУ 29-31 май, 2013 г. с.173

27. Эшонкулов Г.Б., Вильданов Р.Р. Лазерный гетеродинный деформограф в натурных измерениях // Оптика и фотоника: труды международного семинара - Самарканд, 2013 г. с. 50-52

28. Эшонкулов Г.Б., Вильданов Р.Р. Лазерный деформограф с системой стабилизации для атмосферных измерений. // Замоновий физика ва астрофизиканинг долзарб муаммолари. Республика илмий – амалий анжумани материаллари. ҚарДУ. 2015 й, 192-193 бетлар

29. Эшонкулов Г.Б., Вильданов Р.Р. Применение лазерного гетеродинирования для регистрации динамического рассеяния света // Материалы Республиканской конференции «Оптические методы в современной физике» г.Ташкент, 27-28 май 2016 г., с. 98-100

30. Eshonqulov G.B., Vildanov R.R. // Laser heterodyne deformograph for seismic and atmospheric measurements // International symposium: New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects. 10-11 November 2016, Tashkent, P.229-230

31. Eshonqulov G.B., Vildanov R.R. // Laser heterodyne deformograph for atmospheric measurements // “Физиканинг долзарб муаммолари” Республика илмий-амалий конференцияси тўплами. Тошкент, 2017 йил 61-63 бетлар