

Улсын бүртгэлийн
дугаар.....
Аравтын бүрэн
ангиллын код

Нууцын зэрэглэл: А

Төсөл хэрэгжүүлэх
гэрээний дугаар:

ШИНЖЛЭХ УХААНЫ АКАДЕМИ ФИЗИК, ТЕХНОЛОГИЙН ХҮРЭЭЛЭН

ЛАЗЕРЫН СПЕКТРОСКОПЫН ТЕХНОЛОГИЙН СУДАЛГАА

Суурь судалгааны төслийн тайлан
2018-2020

Төслийн удирдагч:

С.Энхбат, доктор (Sc.D), Академич

Санхүүжүүлэгч байгууллага:

Захиалагч байгууллага:

Тайлан өмчлөгч:

Шинжлэх ухаан технологийн сан
Боловсрол, Шинжлэх Ухааны яам
Физик, технологийн хүрээлэн
Энхтайваны өргөн чөлөө, 54Б
Улаанбаатар 13330
Утас: 452819, 99198136
Э-хаяг: senkhat@rocketmail.com

Улаанбаатар

ГАРЧИГ

РЕФЕРАТ.....	3
ТҮЛХҮҮР ҮГ:.....	4
ГҮЙЦЭТГЭГЧДИЙН НЭРСИЙН ЖАГСААЛТ:.....	4
ТӨСЛИЙН ҮР ДҮНГИЙН ДААЛГАВАР.....	4
УДИРТГАЛ.....	5
ЛАЗЕРЫН СПЕКТР СУДЛАЛ.....	6
ЛАЗЕРЫН СПЕКТРОМЕТРИЙН ТӨРЛҮҮД.....	6
Лазерын шингээлтийн спектрометр.....	6
Раман спектрометр.....	6
Хэт хурдан лазерын спектрометр.....	6
Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометр.....	6
ИНТЕРФЕРОГРАМЫН ДОХИОГ БҮРТГЭХ, ДАМЖУУЛАХ ТЕХНИК.....	7
Интерферограм өгөгдөл түүвэрлэлт.....	7
Алхамт-скан ба Үргэлжилсэн-скан.....	8
Түүвэрлэлтийн үе.....	10
Өгөгдөл цуглуулагч.....	11
Өгөгдөл цуглуулагчийн техникийн хэлбэрүүд.....	11
Аналог оролт.....	11
Интерферограмын хэмжилтийн эхлэл.....	12
Спектрийн дохионы дохио-шуугианы харьцаа.....	13
ЛАЗЕРЫН СПЕКТРОМЕТРИЙН ТЕХНИКИЙН ЗАГВАР.....	14
ОПТИК СИСТЕМИЙН ЗАГВАР.....	14
Оптик замын тооцоо.....	14
Хөдөлгөөнт толины удирдлага.....	15
ИНТЕРФЕРОГРАМЫГ БҮРТГЭХ, ХУВИРГАХ.....	20
Детектор.....	20
PDA10D2 детектор.....	20
DET10A2 детектор.....	21
Аналог тоон хувиргуур.....	23
МЭДЭЭЛЭЛ ДАМЖУУЛАХ ИНТЕРФЕЙС.....	31
ХҮЛЭЭН АВАХ ПРОГРАМ ХАНГАМЖ.....	32
ТУРШИЛТ БА ҮР ДҮН.....	34
ТУРШИЛТЫН БЭЛТГЭЛ АЖИЛ.....	34
ЛАЗЕРЫН НЭГ ҮҮСГҮҮРИЙН ИНТЕРФЕРОГРАМ.....	38
ЛАЗЕРЫН ХОС ҮҮСГҮҮРИЙН ИНТЕРФЕРОГРАМ.....	40
ДҮГНЭЛТ.....	44
НОМ ЗҮЙ.....	45
ХАВСРАЛТ 1.....	48
ХАВСРАЛТ 2.....	70
ХАВСРАЛТ 3.....	81

РЕФЕРАТ

Суурь судалгааны төслөөр лазер ашигласан спектрометрийн харьцуулсан судалгааг явуулсан. Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийн төхөөрөмжийн дохио бүртгэл, боловсруулалтын аргуудыг судалсан ба Майкольсоны интерферометр дээр суурилсан ПЛИС* ашигласан хос лазерын үүсгүүр бүхий спектрометрийг зохион бүтээсэн. Суурь судалгааны төслийн хүрээнд дараах ажлуудыг гүйцэтгэв:

- Лазерын спектрометрийн төхөөрөмжүүдийн хэрэглээ, шаардлага, технологийн боломж зэргийг харьцуулан судалж Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийг сонгосон.
- Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийн оптик систем, дохио бүртгэх систем болон боловсруулалтын аргуудыг судалж Майкольсоны интерферометр дээр суурилсан спектрометрийн үндсэн элементийн баазыг тодорхойлсон.
- Интерферограмыг бүртгэх аргуудыг харьцуулан судалж үргэлжилсэн-скан хийх аргыг хэрэгжүүлэхэд шаардагдах детектор, түүний гаралтыг хөрвүүлэх аналог тоон хувиргуурын техникийн нөхцөлийг математик семуляц болон туршилтаар тодорхойлсон.
- PIC, Arduino микроконтроллерууд болон Spartan 6 ПЛИС-ийг ашиглан мэдээллийг дамжуулах, урьдчилсан боловсруулалтын програм хангамж бүхий дамжуулах интерфэйсийг зохион бүтээж туршсан.
- Бүртгэсэн интерферограмын боловсруулах, түүнээс спекторыг ялгах програм хангамжийг LabVIEW болон MATLAB програмууд дээр гүйцэтгэсэн.

Дээрх судалгаа туршилтын үр дүнгүүдийг нэгтгэн “RED2” хос лазерын спектрометрийг зохион бүтээсэн. Үүний зэрэгцээ уг төслийн үр дүнд тулгуурлан модульчилсон спектрометрийг бүтээх технологийн суурь судалгааг цаашид гүнзгийрүүлэх ажлын эхлэл болох болно.

*ПЛИС – програмчлагддаг логик интеграл схем

ТҮЛХҮҮР ҮГ: лазер, спектр судлал, интерферограм, интерферометр.

ГҮЙЦЭТГЭГЧДИЙН НЭРСИЙН ЖАГСААЛТ:

(овог нэр, эрдмийн зэрэг, цол, албан тушаал)

1. С.Энхбат – доктор (Sc.D), Академич, ЭШТА;
2. О.Бөхцоож – доктор (Ph.D.);
3. Б.Зандан – ЭШДэдА, аспирант;
4. Б.Наранбат – ЭШДэдА, аспирант;
5. Ц.Батцэнгүүн – ЭШДадаА, магистрант;
6. А.Пүрэв-Очир – Инженер;
7. Н.Наранцэцэг – ЭШ-ний туслах ажилтан.

ТӨСЛИЙН ҮР ДҮНГИЙН ДААЛГАВАР

/техникийн даалгавар/

№	Төслөөр бий болох үр дүн	Тоо хэмжээ	Үр дүнгийн үзүүлэлт	Биелэлт (%)
1	NIR мужийн лазерыг ашиглан, нийлмэл шингэн орчны анализ явуулах судалгаа, туршилт	1	ЭШ-ний өгүүлэл	100
2	Детекторуудыг компьютертай холбох төхөөрөмж, интерфейс, програм хангамжийг судлаж, туршина.	1 1	ЭШ-ний өгүүлэл, төхөөрөмж	100 100
3	Раман спектроскопын төхөөрөмжийн судалгаа хийгдэнэ.	1	ЭШ-ний өгүүлэл	100

УДИРТГАЛ

Лазерын спектр судал гэдэг нь лазерын цацрагийн үүсгүүрүүдийг хэрэглэсэн, спектрийн үзэгдэх болон нил улаан туяаны мужууд дахь спектрийн аргуудын цогц юм.

Өндөр эрчимтэй, монохромат, цацрагийн задрал багатай лазерын цацрагуудыг ашиглах нь спектр судлалын уламжлалт аргуудын боломжийг эрс дээшлүүлжээ. Үүнээс гадна, лазерын хэрэглээ нь физикийн цоо шинэ зарчмууд дээр суурилсан аргуудыг шинээр үүсгэх боломжийг өгсөн ба туршилтын техник ч ихээхэн өөрчлөгдсөн.

Спектрометрийн төхөөрөмжүүдийн ялгах чадвар хэдэн сая дахин өсөж, мэдрэх чадвар нь нэгж атом эсвэл молекулын бүртгэлээр хязгаарлагдсан төвшин хүртэл өссөн ба $10^{-12} - 10^{-14}$ сек хүртэл хугацаанд өнгөрч буй процессуудыг хэмжих боломж бий болсон.

Лазерын спектр судлалын технологи хурдтай хөгжихийн хэрээр үүнтэй холбоотой судалгаа ихээр явагдаж буй боловч манай улсын хувьд энэ чиглэлийн судалгаа, ялангуяа техник, технологи, аргачлалтай холбоотой судалгаа бага байна.

Технологи хөгжихийн хэрээр спектрометрийн төхөөрөмжүүд нь модуль хэлбэртэй болж байгаа нь энэхүү технологийг өөрсдийн боломжид тулгуурлан нэвтрүүлэх боломжийг олгож байна. Мөн спектрометрийн төхөөрөмжүүд нь олон тооны судалгаа, шинжилгээнд хэрэглэгдэж цар хүрээ нь өссөөр байна.

Тус төслийн хүрээнд нил улаан туяаны болон раман спектрометрийн төхөөрөмжүүдийн технологи, аргачлалын судалгааг явуулахаар төлөвлөсөн.

Эдгээр спектр судлалын аргууд, төхөөрөмжийн технологийг судалж, өөрсдийн хэрэгцээ, шаардлагад нийцсэн хэрэгслүүдийг зохион бүтээж сурах нь цаашдаа улсын шинжлэх ухаан, судалгаа, туршилтын ажилд ихээхэн ач тусаа өгөх юм.

ЛАЗЕРЫН СПЕКТР СУДЛАЛ

Спектр судлал гэдэг нь гэрэл бодистой харьцан үйлчлэх үзэгдлийг ашигладаг хэмжил зүйн арга. Лазерыг гэрлийн эх үүсвэр болгон ашигладаг спектр судлалыг лазер спектроскоп эсвэл лазер спектрометр гэж нэрлэдэг. Лазерын спектр судлал нь зөвхөн бодит лазер төдийгүй оптик параметрийн осциллятор, давтамж давхарлагч, ялгаатай давтамж холигч зэрэг шугаман бус давтамж хувиргах төхөөрөмжүүдийн гаралтыг багтаасан лазертай төстэй эх үүсвэрийг ашигладаг гэж ойлгож болно.

ЛАЗЕРЫН СПЕКТРОМЕТРИЙН ТӨРЛҮҮД

Лазерын шингээлтийн спектрометр

Энэ арга нь хамгийн өргөн хэрэглэгддэг арга юм. Энэ аргын үед нарийн зурвасын өргөнтэй, долгионы уртыг өөрчлөх боломжтой лазерыг өөр долгионы уртад шилжүүлэн дээжид тусган хэмжилт хийдэг. Гаргах спектрийн нарийвчлал нь лазерын зурвасын өргөнөөс шалтгаалдаг.

Лазерын шингээлтийн спектрометрийн олон төрөл байдаг. Хэмжилтийн нарийвчлал, мэдрэг чанар зэрэгт үндэслэн тохируулж хэрэглэдэг.

Раман спектрометр

Раман спектрометр нарийн зурвасын үргэлжилсэн долгионы лазер нь зөвхөн ижил оптик давтамжтай гэрлийг цацаргадаггүй гэдэг онолд үндэслэдэг. Раман спектрометрээр молекулын хэлбэлзлийг тодорхойлдог. Энэ аргыг ихэвчлэн тухайн дээжид ямар молекул байгаа вэ? гэдгийг танихын тулд ашигладаг.

Раман спектрометрийг төрөл бүрийн судалгаанд өргөнөөр хэрэглэдэг. Жишээ нь биологи болон анагаах ухаанд, урлагийн бүтээлийн анализ, тэсрэх бодисын илрүүлэлт гэх мэт.

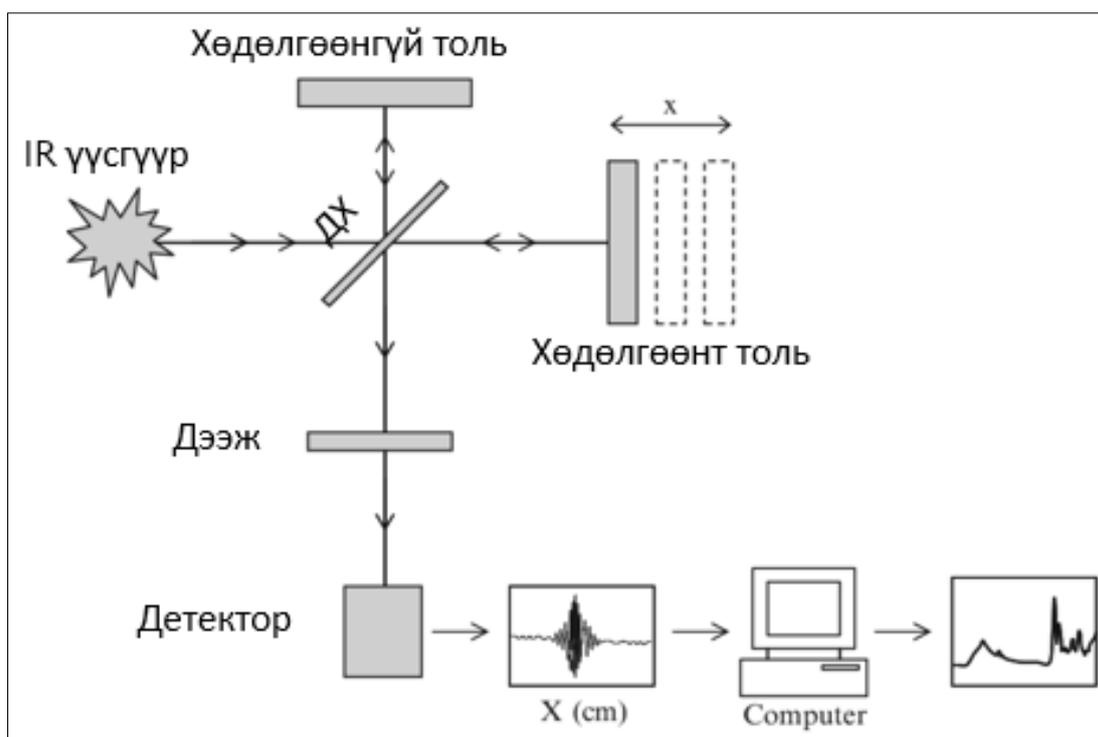
Хэт хурдан лазерын спектрометр

Ихэнх лазерын спектрометрийн техникүүд нь үргэлжилсэн долгионы лазерыг ашигласан байдаг боловч хэт богино импульсийг үүсгэдэг “mode-locked” лазерыг ашигладаг тохиолдлууд байдаг.

Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометр

Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометр нь хатуу, шингэн, хийн шингээлт эсвэл цацаргалтын нил улаан туяаны спектрийг гаргадаг техник юм. Орчин үеийн аналитик химийн лабораториуд бүрд Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийг өргөнөөр ашигладаг болсон. Органик нэгдлүүдийн бүтцийн судалгаанд цөмийн соронзон резонанс, масс спектрометр, рентген кристаллографийн багажуудыг ашигладаг. Эдгээрээс нил улаан туяаны спектрометр нь хямд өртөгтэй байдаг. Мөн нил улаан туяаны спектрометр нь дээжид ямар нэгэн сөрөг нөлөө үзүүлэхгүй тул үйлдвэрлэлтийн процессыг судлахад үр дүнтэй. Нил улаан туяаны ойрын мужийн спектр нь $800-2600\text{нм}$ долгионы урттай буюу $4000-12500\text{см}^{-1}$ долгион тоо бүхий долгионуудыг хамарна. OH , NH , CH , SH – ийн устөрөгчийн холбоосноос үүссэн агших сунах хэлбэлзлийн бусад мужид гардаггүй спектр нь зөвхөн нил улаан туяаны

ойрын мужид ажиглагддаг ба энэхүү хэлбэлзэл нь маш тодорхой утгыг гаргадаг учир бусад нил улаан туяаны мужаас давуу юм. Мөн $9000 - 15000 \text{ см}^{-1}$ мужид хэд хэдэн электроны шилжилтүүд ажиглагддаг. Полихроматик гэрлийн тархалтын спектрометр нь долгион бүрээр салган хэмжилт хийдэг бол Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометр нь интерферометрийг ашигласнаар энэхүү үйлдлийг хийхгүйгээр нэг л удаа хэмжилт хийх давуу талтай (Зураг 1). Хоёр долгионы интерферометрүүд нь хэрэгцээ шаардлагаасаа шалтгаалан өөр өөр байдаг ч ажиллах зарчим нь ижил. Майкольсоны интерферометр нь энгийн бөгөөд ашиглахад хялбар тул нил улаан туяаны спектрометр хэрэглэхэд тохиромжтой. Майкольсоны интерферометрт цацаргалтын долгионыг хоёр хэсэгт хуваан, хөдөлгөөнт толь хөдөлсний улмаас фазын зөрөө үүссэний дараа хоёр долгионыг буцаан нийлүүлдэг. Үүний үр дүнд интерференц үүсдэг.



Зураг 1. FTIR спектрометрийн зарчим

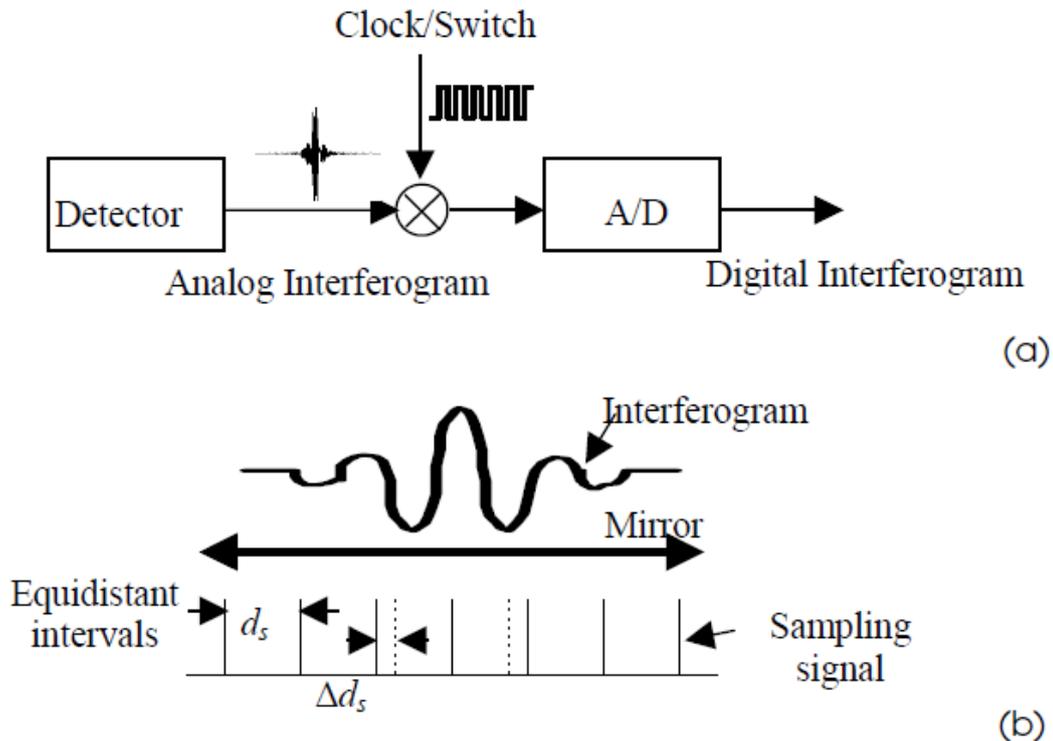
Алдаагүй спектр гарган авахын тулд хөдөлгөөнт толь нь өндөр нарийвчлалтай буюу ямар ч өөрчлөлтгүй тогтмол хурдаар хөдөлдөг байх ёстой. Үүний шийдэл нь толийг суурьтай нь тогтмол хурдаар хөдөлдөг тавцан дээр байрлуулах. Уг тавцан нь тогтмол хурдтайгаас гадна, хэмжилтийн хугацааг бага байлгахын тулд өндөр хурдтай байх шаардлагатай [1-15].

ИНТЕРФЕРОГРАМЫН ДОХИОГ БҮРТГЭХ, ДАМЖУУЛАХ ТЕХНИК

Интерферограм өгөгдөл түүвэрлэлт

Детекторын бүртгэсэн аналог интерференцийн дохиог тохирох эсвэл урьдчилан тогтоосон оптик замын ялгаврууд дээр барьж тоон дохио болгох шаардлагатай. Интерферограмын өгөгдлийг олж авахдаа тоон импульс “англи хэл *clock*”-ийг үүсгэдэг

дэд системийг ашигладаг. Энэхүү дэд системийг цагийн систем “англи хэл *clocking system*” эсвэл интерферограмын цагийн систем “англи хэл *intreferogramm clocking system*” гэж нэрлэдэг. Зураг 2.а нь цагийн системийн энгийн схемийг харуулсан бол зураг 2.б нь интерферограмыг түүвэрлэх үйл явцыг харуулсан. Хөдөлгөөнт толины байрлалаар синхрончлогдсон тоон импульсийг өгөгдөл цуглуулахад ашигладаг.



Зураг 2. а) Интерферограмын цагийн системийн энгийн схем,

б) Интерферограмыг түүвэрлэх хугацааны диаграмм

d_s - тэнцүү завсартай тоон импульс, Δd_s - нь тоон импульсийн алдаа.

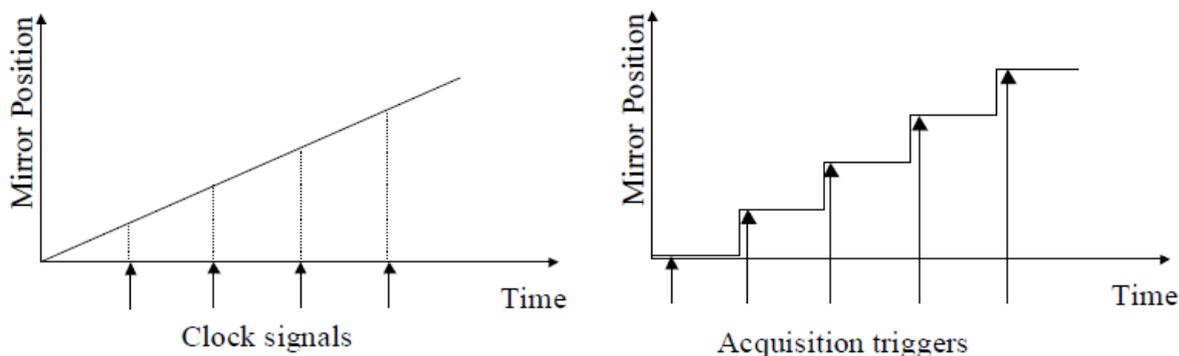
Интерферограм цагийн системийн гурван үндсэн шаардлага байдаг:

- (1) түүвэрлэлтийн болон завсарлагын хугацаа бага байх,
- (2) оптик замын уртын зөрөөний нарийвчлал өндөр байх,
- (3) скан хоорондын давталт өндөр байх.

Алхамт-скан ба Үргэлжилсэн-скан

Интерферограмыг түүвэрлэхдээ алхамт-скан хийх эсвэл үргэлжилсэн скан хийх гэсэн хоёр схемийг ашигладаг (Зураг 3). Алхам алхмаар скан хийх явцад хөдөлж буй толь нь шинэ байршилд шилжиж, өгөгдлийг олж авахаас өмнө зогсдог. Энэ нь спектрийн нарийвчлалын шаардлагыг хангах эцсийн цэгт хүртэл олон удаа давтагддаг. Үргэлжилсэн скан хийж байх үед хөдөлж буй толь нь өгөгдлийг олж авах үед тогтмол хурдтайгаар хөдөлдөг. Хөдөлгөөнт толийг нааш цааш хөдөлгөх шаардлагатай бөгөөд

ижил байрлал дахь өгөгдлийг нэгтгэн дохио-шуугианы харьцааг сайжруулах зорилготой байдаг.



Зураг 3.а) Үргэлжилсэн-сканы үеийн хөдөлгөөнт толины байрлал ба хугацааны хамаарал, б) Алхамт-сканы үеийн хөдөлгөөнт толины байрлал ба хугацааны хамаарал.

Хугацаанаас хамааралтай үзэгдлийн хэмжилтийн хувьд алхам алхмаар скан хийх шаардлагатай байдаг. Ихэнх бусад хэрэглээнд “хурдан” хөдөлгөөнт толийг ашигладаг үргэлжилсэн скан хийх нь давуу талтай байдаг. Хоёр аргын ерөнхий давуу болон сул талуудыг нэгтгэн харуулав (Хүснэгт №1).

Хүснэгт №1

Алхамт-скан (Step-scan)	Үргэлжилсэн-скан (Continuous scan)
Дохио шуугианы харьцааг сайжруулахын тулд тогтмол гүйдлийн дохиог модуляцлах шаардлагатай. Механик таслагч ба түүний электроникт шүүлтүүр ашиглахаас өмнө зурвасын өргөн нарийсах аргыг ашиглах шаардлагатай.	Дохио нь аль хэдийн модуляцлагдсан бөгөөд хөдөлгөөнт толины хурд ба цацрагийн долгионы уртаар тодорхойлогддог давтамжийн хүрээтэй байдаг. Тиймээс зурвасын өргөнийг нарийсгах аргыг шууд ашиглаж болно.
Хэмжилтийн хугацааны урт нь бүртгэлийн давтамж ба хоцролтын зайн хамт пропорционал хэмжээгээр нэмэгддэг.	Ерөнхийдөө илүү хурдан хэмжих хугацаа; хэмжилт хийх хугацааны урт нь хоцрогдсон зайнаас хамаардаг боловч түүврийн давтамжийн шаардлага үүнд нөлөөлөхгүй.
Зөвхөн шүүлтүүр ашиглахаас гадна илүү шуугианыг бууруулах боломжтой механик таслагч, түгжигч өсгөгч детектор ашиглахыг зөвшөөрдөг.	Фурье фильтр гэх мэт шүүлтүүр хийх арга нь илрүүлсэн зурвасын өргөнийг хязгаарладаг боловч шуугиан, үндсэн дохиог тэдний фазад үндэслэн ялгадаггүй.
Цахилгааны саатал, детекторын зурвасын өргөний хязгаараас шалтгаалсан бүртгэх алдаа гардаггүй. Мэдрэгчийн алдаанаас болж бүртгэлийн алдаа гарна.	Цахилгааны саатал, детекторын зурвасын өргөний хязгаараас шалтгаалан бүртгэх алдаа гарч болно; ялангуяа хурдан сканердах интерферометрийн хувьд асуудалтай.

Түүвэрлэлтийн үе

Синусоид дохиог зөв тоон дохио болгохын тулд хамгийн бага түүврийн давтамж f_s нь Найквистын шалгуураар тухайн дохионы давтамжаас хамгийн багадаа хоёр дахин их байх ёстой. Өргөн зурвасын дохионы хувьд хамгийн өндөр давтамж (хамгийн богино долгионы урт) нь Найквистын давтамжийг тодорхойлдог. Өгөгдсөн долгионы уртын λ_0 хувьд конструктив хөндлөнгийн оролцоо нь толин тусгал буурах зайны $\lambda_0/2$ бүрд тохиолддог. Тиймээс долгионы уртын хамгийн бага λ_{\min} агуулсан цацрагийн хувьд интерферограм дахь хамгийн хурдан хувиргадаг дохио нь $\lambda_{\min}/2$ хугацаатай бөгөөд энэ нь $1/2v_{\max}$ -тай тэнцүү юм. Тиймээс Найквистын шалгуурын дагуу түүвэрлэлтийн хугацаа d_s нь дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ.

$$d_s \leq \frac{\lambda_{\min}}{4} = \frac{1}{4v_{\max}} \quad (1.1)$$

Үргэлжилсэн скан хийх явцад тоон импульсийн муж дахь түүврийн давтамжийг бас анхаарч үзэх хэрэгтэй. Хөдөлгөөнт толины хурд v -ийн хувьд интерферограм дахь хамгийн их давтамжийг үзүүлнэ.

$$f_{\max} = 2v_{\max} \quad (1.2)$$

Детектор ба электроникийн зурвасын өргөн нь f_{\max} -аас ихээхэн өндөр байх шаардлагатай. Энэ нь Найквистын шалгуураар хугацааны муж дахь түүврийн давтамж нь дараах хэлбэртэй болно.

$$f_s \geq 2f_{\max} = 4v_{\max} \quad (1.3)$$

Тоон импульсийн дохионы хэмжилтийн агшинд тэгийг дайрч байвал интерферограмын далайц нь тэг бүртгэгдэнэ.

Бодит интерферограмын дохио нь зарим шуугианыг агуулдаг. Иймд интерферограмын цагны системийг зохион бүтээхдээ детекторын электроник, үүсгүүр болон орчны нөлөөллөөс үүсэх өндөр давтамжийн шуугианыг анхаарах хэрэгтэй. Үүнийг anti-aliasing шүүлтүүрийг ашиглан арилгах боломжтой. Anti-aliasing шүүлтүүр нь өндөр давтамжийг шүүх аналог шүүлтүүр ба энгийн RC шүүлтүүрийг ашиглаж болно. Шүүлтүүрийн зурвасын өргөн нь Найквистын давтамжаар хязгаарлагдана.

Оптик замын ялгаврын нарийвчлал

HeNe лазерыг түүвэрлэлтийн тоон импульсийг гаргахад ашиглах бөгөөд өөр бусад байрлал тогтоох төхөөрөмжүүдийг ашиглаж болно. Түүвэрлэх давтамж нь өндөр байхаас гадна оптик замын ялгавар нь түүвэрлэх тоон импульстэй өндөр нарийвчлалтайгаар таарч байх шаардлагатай. Түүвэрлэлтийн үед алдаа гардаг ба энэ алдаа нь хөдөлгөөнт толины хурдны өөрчлөлт ба цахилгаан саатлын хосолсон нөлөөнөөс үүсдэг.

$$\Delta d_s = \Delta v \times t_{delay} \quad (1.4)$$

Давтагдах тоон импульсийн байрлал

Үргэлжилсэн скан хийх горимд дохио шуугианы харьцааг сайжруулахын тулд хэд хэдэн интерферограмуудыг нэгтгэдэг. Гэвч дундаж өгөгдлийн цэгүүд нь ижил оптик замын ялгавраас гаралтай байх шаардлагатай.

Техникийн ач холбогдол

Гомодин-лазер интерферометрийн систем нь хөдөлж буй толиор дамжин өнгөрч буй зайтай ойролцоо d_l үеийг харуулсан синусоид дохио үүсгэдэг. d_l -ыг дараах томъёогоор тодорхойлно.

$$d_l = \frac{\lambda_{laser}}{2} \quad (1.5)$$

Өгөгдөл цуглуулагч

Өгөгдөл цуглуулагч (ӨЦ) нь аналог дохиог тоон өгөгдөлд хувиргах, тухайн хувиргасан өгөгдлийг дэлгэцэд харуулах болон цаашдын дохио боловсруулалтад зориулж компьютерт илгээх үүрэгтэй шалгалт, хэмжлийн нэг салбар юм. Өнөөдөр сувгийн тоо, хамгийн их хурд болон нарийвчлал гэх мэтээс хамаарсан төрөл бүрийн хэрэглээнд зориулагдсан янз бүрийн ерөнхий зориулалтын ӨЦ төхөөрөмжүүд байна.

Өгөгдөл цуглуулагчийн техникийн хэлбэрүүд

Дотоод, гадаад гэсэн хоёр үндсэн ӨЦ-ын техник хангамжийн формат байдаг. Гадаад системүүд нь өргөжүүлэх (олон суваг, дохио боловсруулалтад зориулагдсан төхөөрөмжүүд) болон тохиромжтой холболттой байх давуу талтай байдаг. Тиймээс тэд олон оролт, гаралтыг шаардах хэрэглээнүүдэд илүү тохиромжтой байдаг. Нэмэлт ӨЦ нь шууд өгөгдлийн шугамын холболттой байдаг. Тиймээс өгөгдөл дамжуулах өндөр хурдны чадамжтай байдаг. Гадаад төхөөрөмжийн өгөгдөл дамжуулалт нь ихэвчлэн цуваа, зэрэгцээ эсвэл USB дамжуулалтын портоор хязгаарлагддаг.

Аналог оролт

Аналог оролтын авч үзэх шаардлагатай зарим чухал зүйл нь боломжит сувгийн тоо болон хамгийн их хэмжилтийн хурд, тэдгээрийн нарийвчлал (битийн тооноос хамаарсан), өсгөлтийн цар хүрээ (өсгөлт нь програмаар сонгогдох боломжтой эсэх) болон нарийвчлал “*англи accuracy*” юм. Дараах дэд хэсгүүдэд эдгээрийг товч хэлэлцэнэ.

Сувгийн тоо

Фурье хувиргалттай спектрометр нь гол интерферограмыг хэмжихэд хамгийн багадаа нэг суваг шаарддаг. Хэдий тийм ч өргөжүүлэлтэд зориулж нэмэлт сувагтай байх нь тохиромжтой байдаг. Нэмэлт сувгууд нь гэрлийн үүсгүүрийн шилжилтийн засвар болон температурын хэлбэлзлийн засвар гэх мэт засварын техникийг гүйцэтгэхэд шаардагддаг.

Хэмжилтийн хурд

Ихэвчлэн секунд бүр дэх хэмжилтийн нэгжээр өгөгддөг хамгийн их хэмжилтийн хурд нь өгөгдсөн хугацаанд цуглуулах боломжтой өгөгдлийн хамгийн их тоо хэмжээг тодорхойлдог. Техникийн үзүүлэлт нь суваг бүрийн хамгийн их хурдтай холбогддог эсвэл хэрэглэгдсэн суваг бүрээр хуваалцах хамгийн их хурдыг ойлгох нь чухал юм. Хэрэв нэг аналог тоон хувиргуур (АТХ) нь олон тооны сувгаар хуваалцаж буй бол хувиргагч нь сэлгэн залгагддаг. Энэ тохиолдолд суваг бүрийн боломжит хурд нь сувгийн тоонд урвуу хамааралтай байдаг. Жишээлбэл хэмжилтийн хурд нь $1МГц$, 4-н сэлгэн залгах сувагтай бол суваг бүрийн хурд нь $250кГц$ болно. 16 битийн болон бусад дохио боловсруулалтын үйл ажиллагаанаас шалтгаалж хурд нь 10–20мксек болдог.

Аналог тоон хувиргуурын битийн нарийвчлал

Хэрэв АТХ-ыг 12 битийн нарийвчлалаар хэмжилт хийвэл 4096 утга авна. Хэрэв 16 битийн нарийвчлалаар хэмжилт хийвэл 65536 утга авна. 16 битийн хувьд нарийвчлал сайтай боловч хэмжилтийн хурд нь удаан болдог.

Аналог тоон хувиргуурын оролтын хүчдэлийн хэмжээ

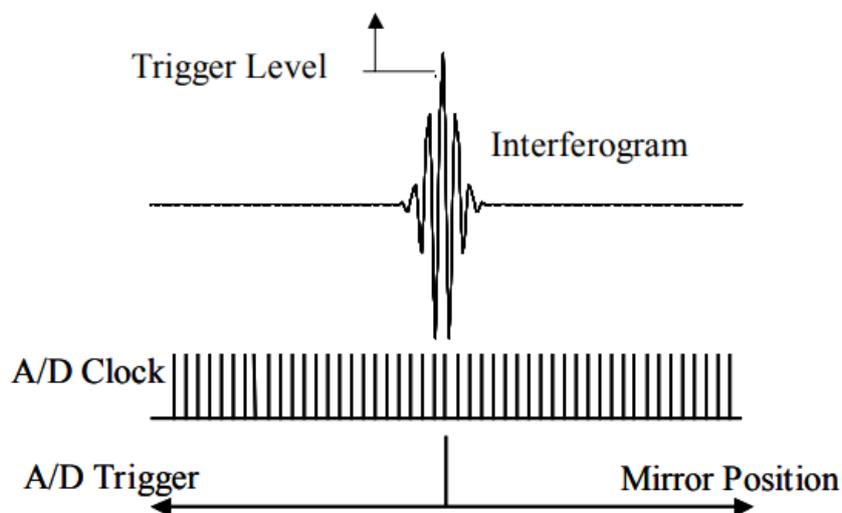
ӨЦ-ын оролтын сигналын өсгөлтийг програмын аргаар хялбар хийдэг байх ёстой.

Хэмжилтийн нарийвчлал

Хэмжилтийн нарийвчлал нь LSB буюу АТХ-ын хамгийн бага битийн утгаар тодорхойлогдоно. Өөрөөр хэлбэл 12 битийн үед $0-5В$ -ын хязгаарт 1LSB нь $0.0012В$ болно. 16 битийн хувьд 1LSB нь $0.000076В$ болно.

Интерферограмын хэмжилтийн эхлэл

Интерферограмын хэмжилтийг хоёр аргаар эхлүүлдэг (Зураг 4). Лазерын тоон импульсээр болон интерферограмын хамгийн их эрчим буюу оптик замын ялгаврын тэг цэг дээрээс эхлүүлнэ. Эдгээр сигналуудыг компаратор төхөөрөмж ашиглан бүртгэнэ.



Зураг 4. Интерферограмын тоон импульсийн болон төвшиний хэмжилт

Спектрийн дохионы дохио-шуугианы харьцаа

Спектрийн дохионы дохио-шуугианы харьцаанд АТХ-ын b битээр авсан интерферограмын дохио шуугианы харьцаа нь дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ.

$$SNR_{Digitization}^I = \sqrt{\frac{3}{2}} k 2^b \quad (1.6)$$

Интерферограмаас спектр байгуулах үед дохио шуугианы харьцааг $N_I^{1/2}$ коэффициентоор ихэсгэдэг. N_I нь интерферограмын цэгийн тоог төлөөлдөг.

$$SNR_{Digitization}^S = SNR^I \times N_I^{1/2} \quad (1.7)$$

Монохромат дохионы хувьд спектрийн дохио шуугианы харьцаа нь дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ.

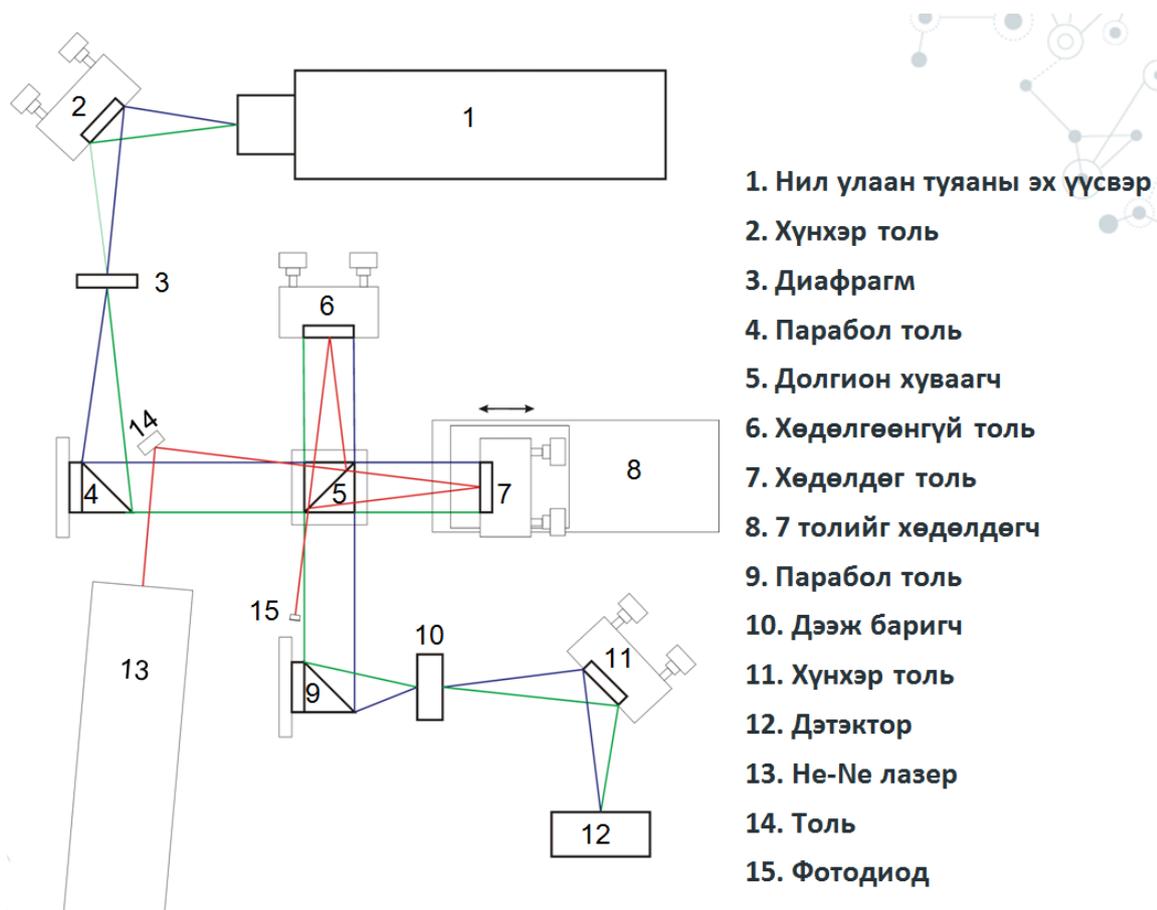
$$SNR_{Digitization}^S \approx \sqrt{2} \times SNR^I \times N_I^{1/2} \times \frac{\rho(\nu)}{\rho_{total}} \quad (1.8)$$

$\frac{\rho(\nu)}{\rho_{total}}$ - спектрийн нягтын харьцаа [16-22].

ЛАЗЕРЫН СПЕКТРОМЕТРИЙН ТЕХНИКИЙН ЗАГВАР

ОПТИК СИСТЕМИЙН ЗАГВАР

Майколсоны интерферометр бүхий спектрометрийн төхөөрөмжийн гол төлөөлөл нь Фурье хувиргалттай спектрометрүүд байдаг ба өргөн тархсан хэлбэр нь Фурье хувиргалттай ойрын мужийн нил улаан туяаны спектрометр юм. Иймд судалгаа туршилтын спектрийг бүртгэх төхөөрөмжийн оптик системийн загварыг боловсруулсан (Зураг 5) .



Зураг 5. Майколсоны интерферометр бүхий нил улаан туяаны ойрын мужийн спектрометрийн оптик системийн схем

Оптик замын тооцоо

Хүнхэр толины фокусын зай нь 25мм боловч нил улаан туяаны гэрэл нь перпендикуляраар тусаагүй үед толины фокусын зайг тодорхойлох шаардлагатай. Тиймээс симуляци хийн толины байрлал болон тухайн толиноос ойсон гэрлийн чиглэл зэргийг тодорхойлсон. Парабол толины хувьд 1016 мм-ийн ойлтын фокусын зайтай 45° налуутай толь сонгосон. Энэхүү толины хувьд ойлтын фокусын зайг тооцож парабол толины өмнөх болон дараах элементийн байрлалыг тодорхойлох шаардлагатай. Мөн эхний удаад багажаа угсрахдаа зайг хэт шахуу биш байлгахыг зорьсон. Дээрх бүгдийг үндэслэн нил улаан туяаны ойрын мужийн спектрометрийн оптик системийн загварыг Зураг 5 дээрх байдлаар гаргасан.

Нил улаан туяаны ламп SLS202L/M – ийн оптик чадал нь 400мВт . Ашиглаж буй детектор нь хамгийн ихдээ, өөрөөр хэлбэл ханалтын чадал нь 1.2мВт . Хэрвээ ханалт үүсвэл детектор эвдрэх болно. Тиймээс лампын гаралтын 400мВт чадлыг детектор дээр очихдоо 1.2мВт хүртэл бууруулах шаардлагатай. Иймээс загвар дээрээ гэрлийн “Урвуу квадрат хууль”-ийг ашиглан детекторт ирэх чадлыг тооцоолсон.

Нил улаан туяаны гэрлийн гаралтаас эхний хүнхэр толь хүртэл зай 230мм . Үүн дээр урвуу квадрат хуулийн тэгшитгэлийг бичвэл:

$$400\text{мВт} \cdot (110\text{мм})^2 = p_1 \cdot (340\text{мм})^2 \rightarrow p_1 = 41.87\text{мВт} \quad (1.9)$$

Энэ нь эхний хүнхэр толь дээр нил улаан туяаны гэрэл нь 41.45мВт чадлаар тусаж байна гэсэн үг юм. Хүнхэр толины ойлгох чадвар нь хамгийн ихдээ 99% тул $41.87\text{мВт} \cdot 0.99 = 41.45\text{мВт}$ чадлаар ойлсон гэрэл тусна. Энэ мэтчилэн оптик элементүүдийн ойлт нэвтрүүлэлтийн хувийг тооцоолон детектор дээр ирэх чадлыг тооцоход 1.22мВт гарсан [23-25].

Хөдөлгөөнт толины удирдлага

Майкольсоны интерферометрийн интерферограм үүсэх процессыг динамикаар удирдах боломжийг олгож буй хэсэг нь хөдөлгөөнт толины шилжилт юм. Иймээс хөдөлгөөнт толийг харьцангуй жигд хурдаар өндөр нарийвчлалтай хөдөлгөх зорилгоор DDSM50/M маркын шугаман хөтлөгчтэй тавцан (ШХТ)-г ашигласан (Зураг 6).



Зураг 6. DDSM50/M маркын шугаман хөтлөгчтэй тавцан

DDSM50 маркын ШХТ нь 500нм нарийвчлалтай, хамгийн ихдээ 500мм/сек хурдтайгаар 50мм шилжилт хийх боломжийг олгодог. Мөн KBD101 сойзгүй моторын удирдлага болон “Thorlabs APT, Kinesis” зэрэг програм хангамжийн интерфэйсийн хамт “plug and play” системийг бүрдүүлдэг. Иймээс уг систем нь гэрлийн интерферограмыг үүсгэхэд хэрэглэгдэх толины хөдөлгөөнийг компьютераас удирдах боломжийг олгож байна.

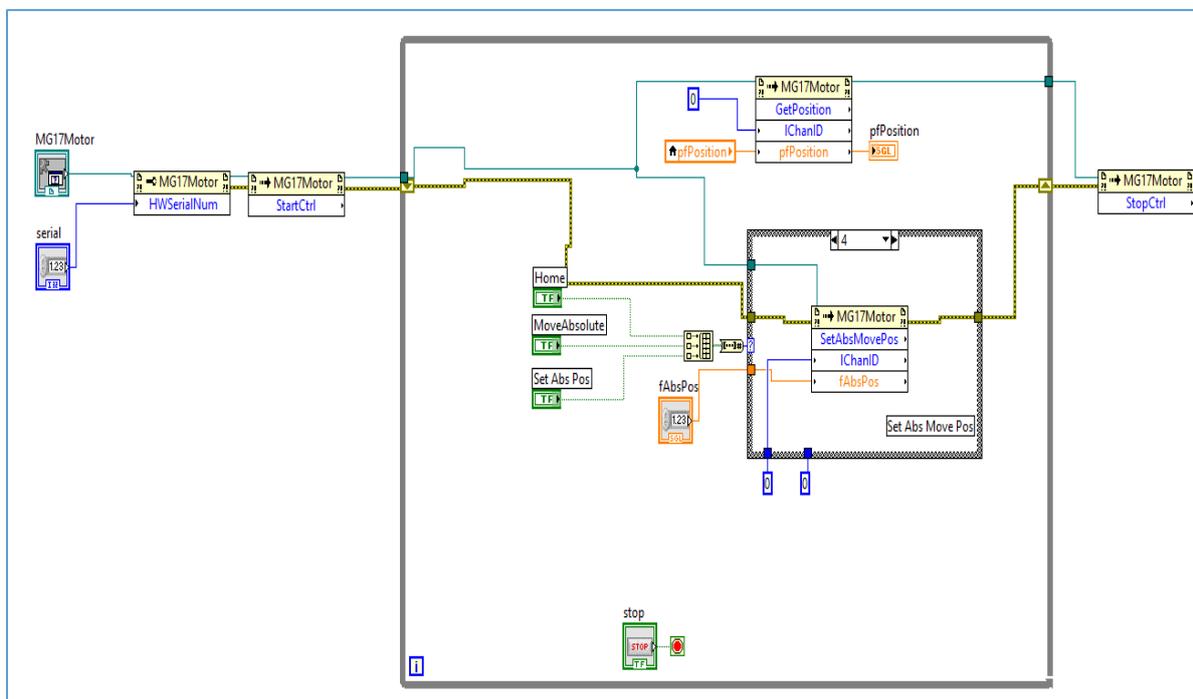
Сойзгүй тогтмол гүйдлийн моторын KBD101 K-Cubes удирдлагыг өндөр хурд ($>100\text{мм/сек}$) болон өндөр нарийвчлалтай энкодер ($<100\text{нм}$) шаардлагатай хөдөлгөөнийг удирдахад хэрэглэгддэг (Зураг 7).



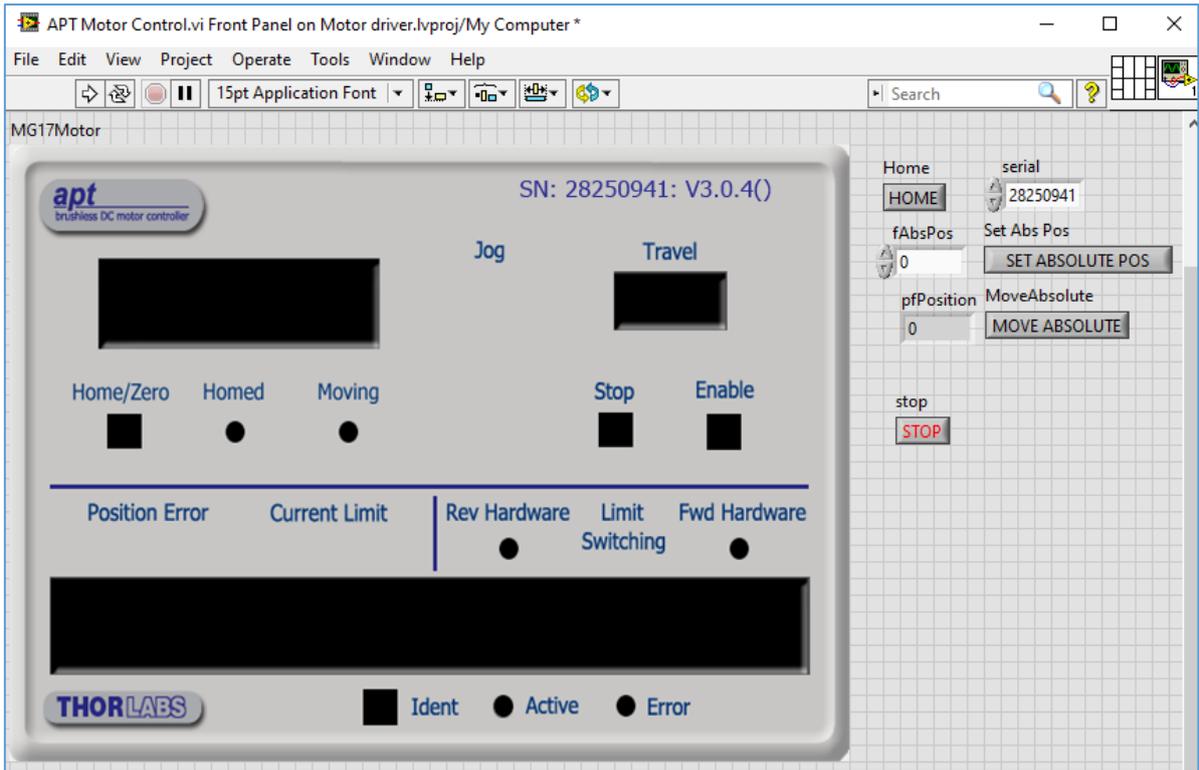
Зураг 7. KBD101 маркын тогтмол гүйдлийн сойзгүй моторын удирдлага

KBD101 удирдлага нь USB 2.0 портоор компьютерт холбогддог ба тогтмол гүйдлийн 15В, 1А тэжээлийн блокоор тэжээгддэг. Өөр дээрээ хурд, алхам болон бусад тохируулгыг хийх удирдлага, хяналтын дэлгэцийг агуулдаг.

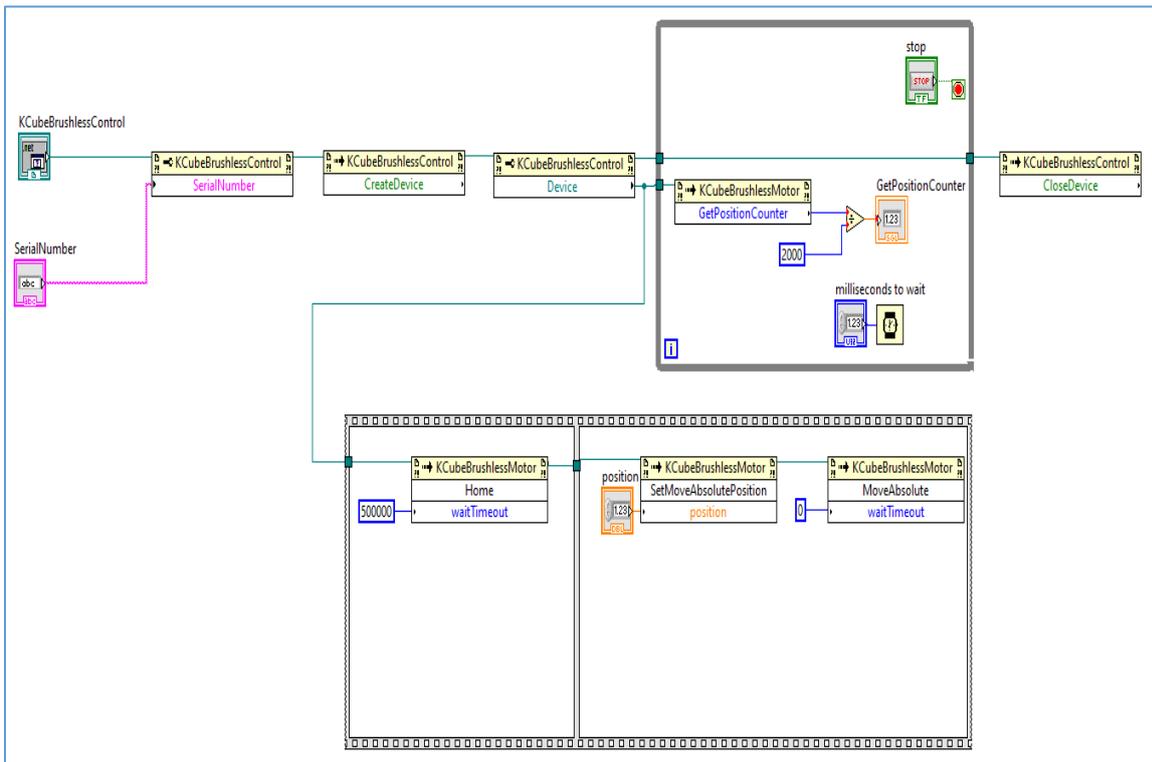
ШХТ-ын удирдлагын програмыг “Thorlabs APT, Kinesis” интерфэйсийн санг ашиглан LabVIEW програм дээр “ActiveX control” болон “.NET framework” гэсэн системийн интерфэйсийн хоёр хувилбараар боловсруулан удирдлагын функцүүдийг туршсан (Зураг 8, 9).



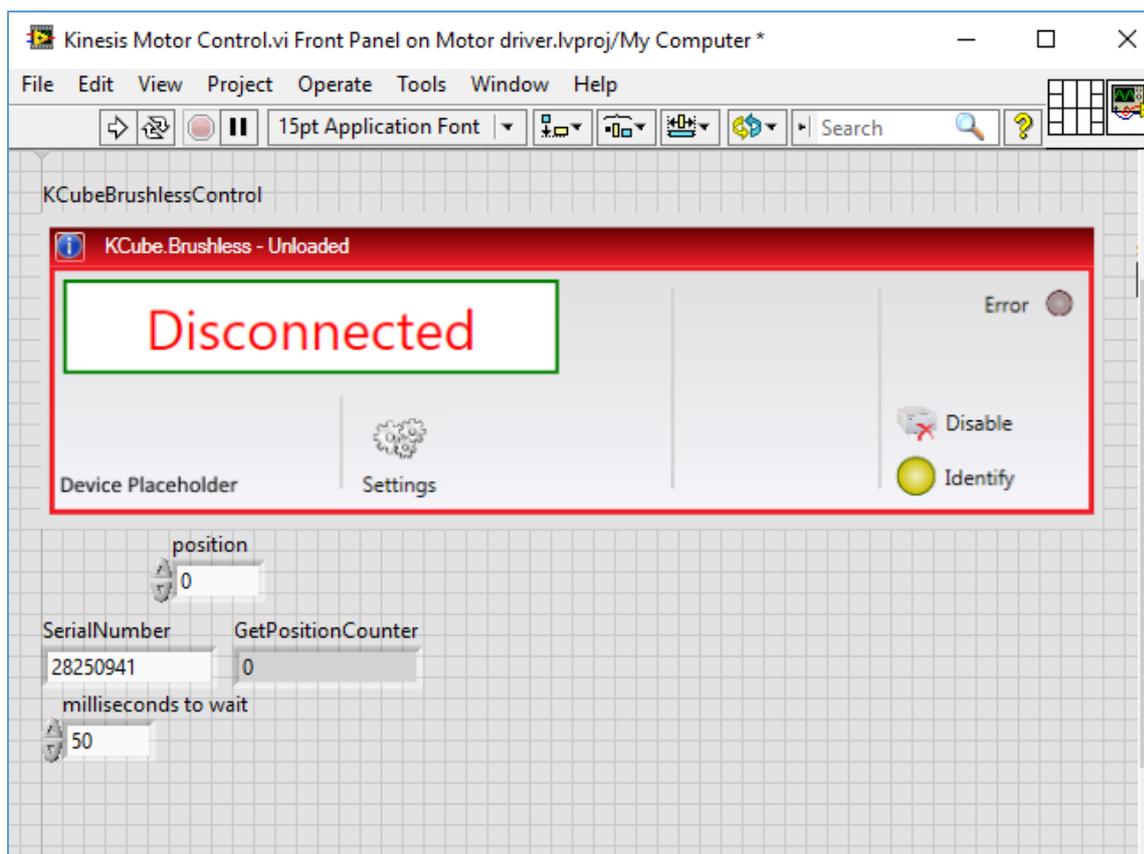
Зураг 8.а) “ActiveX control” бүхий удирдлагын програмын блок схем



Зураг 8.б) “ActiveX control” бүхий удирдлагын програмын интерфэйс



Зураг 9.а) “.NET framework” бүхий удирдлагын програмын блок схем



Зураг 9. “.NET framework” бүхий удирдлагын програмын интерфэйс

Цаашид судалгаа туршилтын ажилд “.NET framework” дээр суурилсан удирдлагын програм хангамжийг ашиглахаар сонгосон [26-29].

Шугаман хөтлөгчтэй тавцангийн хэлбэлзэл

Интерферометрт ашиглах ШХТ алдааг шалгах болон долгион хуваагчийн ажиллагааг судлах туршилт хийсэн. DDSM50/М ШХТ-ын хурдыг 0.001мм/сек, 0.01мм/сек, 0.1мм/сек байх үед өгөгдсөн замыг туулах хугацааны тооцооны болон туршилтаар хэмжсэн утгуудыг харьцуулсан (Хүснэгт №2).

Хүснэгт №2.

Зам $S(мм)$	Хурд $V(мм/сек)$	Хугацаа		Алдаа (%)
		Тооцоо $t_{тооцоо}(сек)$	Туршилт $t_{туршилт}(сек)$	
1.0	0.001	1000.0	1343.0	34.3
1.0	0.01	100.0	103.0	3.0
1.0	0.1	10.0	10.0	0.0

Долгион хуваагчид ирж буй болон түүгээр хуваагдсан гэрлийн эрчмийн тодорхойлох зорилгоор долгион хуваагч, хөдөлгөөнт болон хөдөлгөөнгүй толины

байршил дээр ирж буй гэрлийн эрчмийг PDA10D2 детектор ашиглан MDO-2072EX осциллоскопоор хэмжсэн (Хүснэгт №3).

Хүснэгт №3

Гэрлийн чиглэл	Гэрлийн далайц $U(B)$	
	1-р хэмжилт	2-р хэмжилт
Долгион хуваагчруу ирж буй	6.0	6.0
Хөдөлгөөнт толируу ирж буй	3.2	3.1
Хөдөлгөөнгүй толируу ирж буй	3.3	3.2

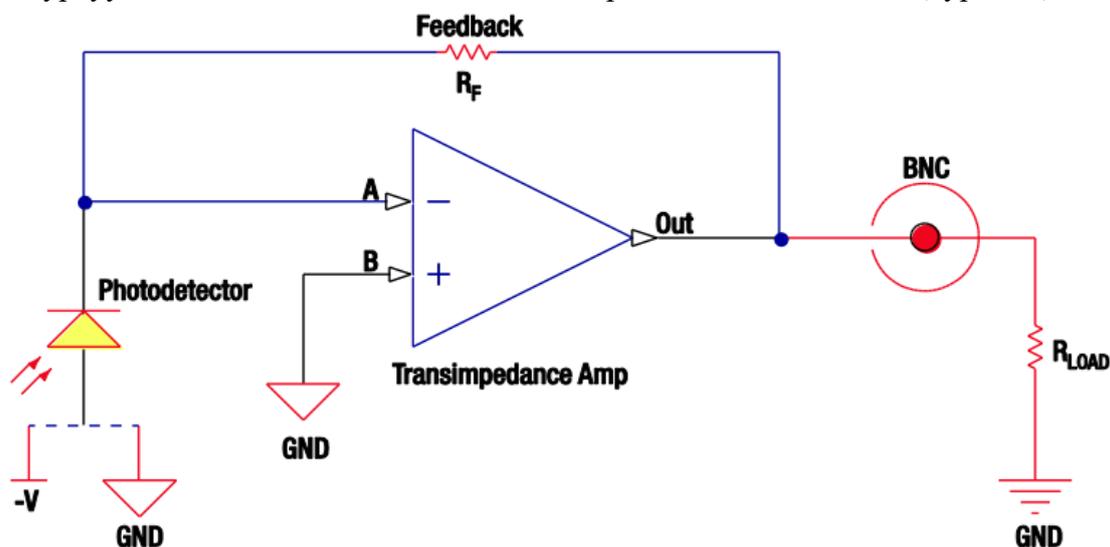
ИНТЕРФЕРОГРАМЫГ БҮРТГЭХ, ХУВИРГАХ

Детектор

Интерферограмыг бүртгэхдээ PDA10D2 болон DET10A2 маркын детекторуудыг ашигласан. PDA10D2 детектор нь 900–2600нм, DET10A2 детектор нь 200–1100нм мужид мэдрэх чадвартай фото диодыг агуулсан байдаг. Эдгээр детекторуудын техникийн үзүүлэлтийн тухай хураангуйлан тодорхойлбол [30]:

PDA10D2 детектор

PDA10D2 нь 900–2600нм мужид гэрлийг мэдрэх зориулалттай Индиум галлийн арсенид (*InGaAs*) детектор. Энэхүү детекторын гаралтыг 500м-ын коаксиал кабелиар осциллоскоп болон аналог тоон төхөөрөмжид холбон ашиглаж болдог. Энэ үед гаралтын хүчдэл нь 0–5В байдаг. Хэрэв хүлээн авах төхөөрөмжийн оролтын эсэргүүцэл нь 500м-оос их бол детекторын гаралтын хүчдэл нь 0–10В болдог. PDA10D2 нь PIN фото диод болон урвуу чиглэлтэй дохио өсгөгч хэлхээг өөртөө багтаасан байдаг (Зураг 10).



Зураг 10. PDA10D2 детекторын дотоод бүтцийн схем.

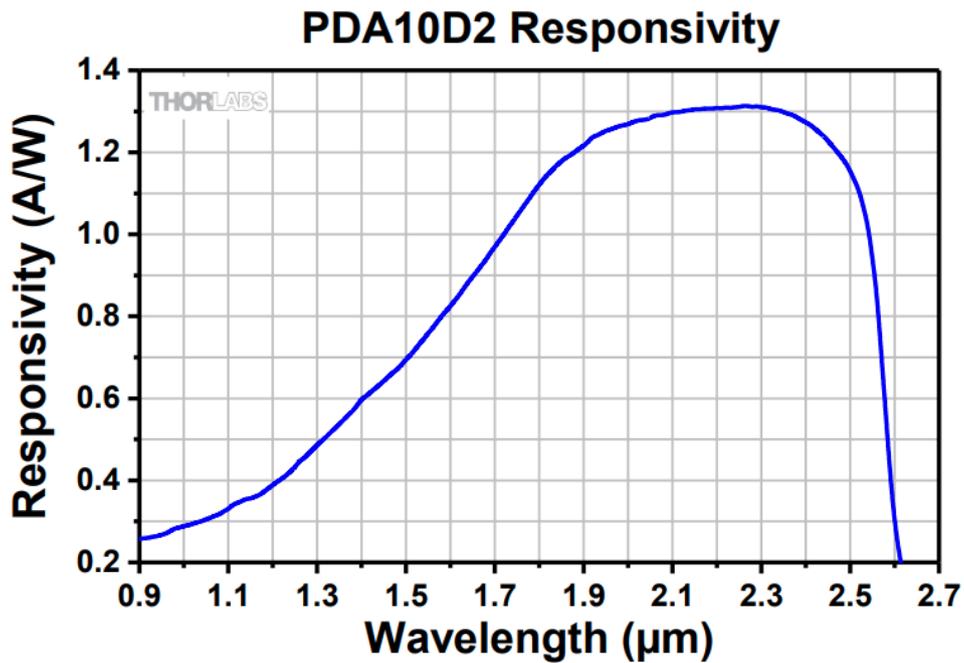
Фотодиодын мэдрэлт нь өгөгдсөн долгионы уртад харгалзан диодын үүсгэсэн фотогүйдэл I_{PD} болон туссан гэрлийн эрчмийн P харьцаагаар тодорхойлогдоно.

$$R(\lambda) = \frac{I_{PD}}{P} \quad (1.10)$$

Мэдрэгчийн өсгөлт нь гэдрэг холбооны эсэргүүцлээс R_F хамаарах ба зурвасын өргөн нь дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ.

$$f(-3dB) = \sqrt{\frac{GBP}{4\pi R_F \times C_D}} \quad (1.11)$$

Энд GBP нь өсгөлтийн зурвасын өргөн, C_D нь фотодиодын шилжилтийн болон өсгөгчийн багтаамжийн нийлбэр.



Зураг 11. PDA10D2 детекторын долгионы уртаас хамаарсан мэдрэх мурий.

PDA10D2 детекторын техникийн үзүүлэлтийг Хүснэгт №4-д үзүүлэв [31].

Хүснэгт №4.

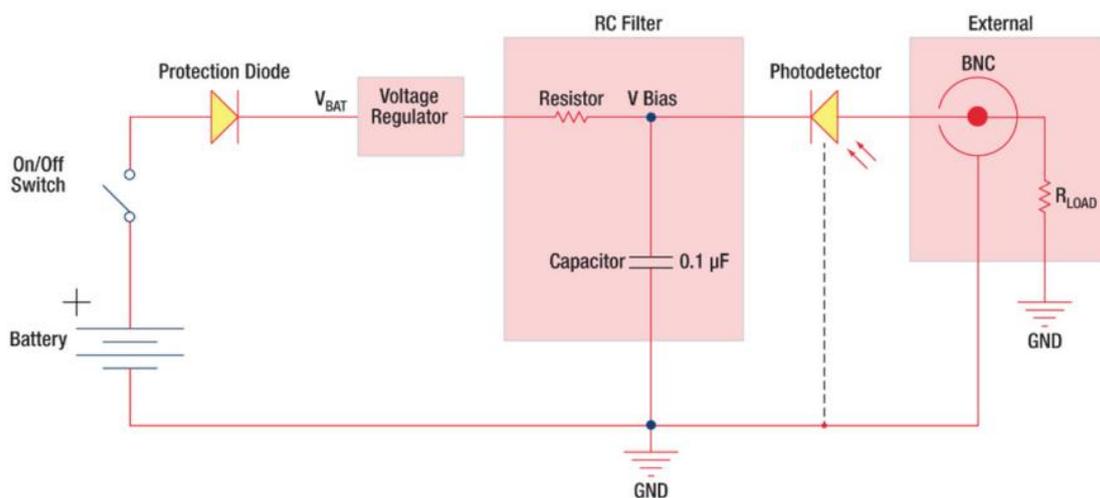
Мэдрэгчийн материал	Индиум галлийн арсенид
Талбай	Ø1.0мм(0.8мм ²)
Долгионы урт	900 – 2600нм
Хамгийн өндөр утгад харгалзах долгионы урт	2300нм
Шуугианы үйлчлэх утга (RMS)	2.5мВ
Гаралтын гүйдэл	100мА
Ачааны гаралтын бүрэн эсэргүүцэл	> 50Ом
Гаралтын хүчдэл	0 – 5В(50Ом) 0 – 10В(> 50Ом)

DET10A2 детектор

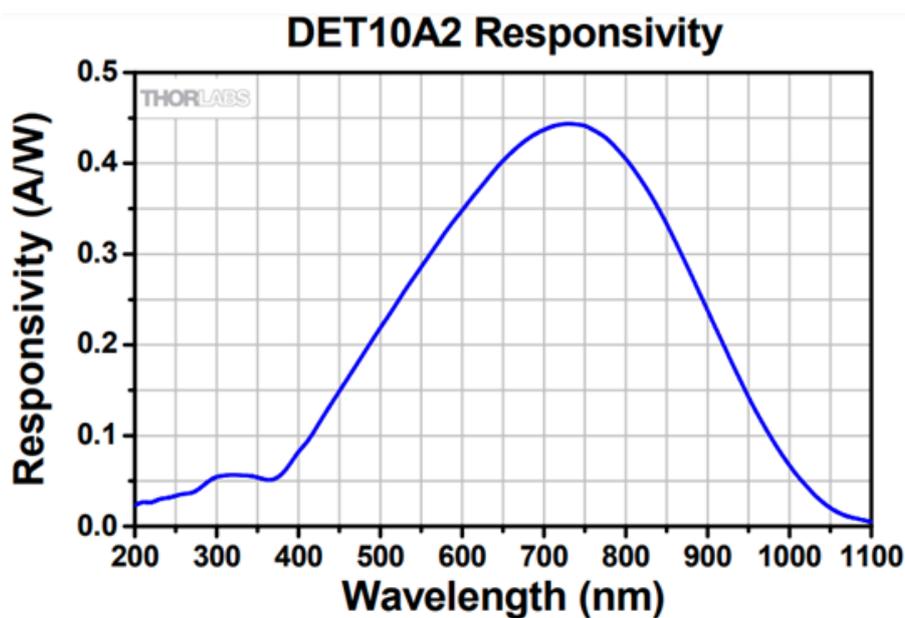
DET10A2 детектор нь 200–1100нм хүртэлх гэрлийн дохиог хүлээн авах зориулалттай цахиуран (Si) детектор. Уг детектор нь 12В батарейгаар ажилладаг тул тэжээлийн үүсгүүрээс ирэх шуугианаас тусгаарлагдаж чаддаг. DET10A2 детектор нь батарей тууль хамгаалалтын диод, хүчдэл тогтворжуулагч, RC шүүлтүүр болон фото диодыг агуулсан байдаг (Зураг 12).

DET10A2 детектор нь зураг 12-т үзүүлсэн схемийн дагуу гэрлийг цахилгаан дохионд хувиргана. Детекторын мэдрэгч элемент нь гэрлийг фотогүйдэлд хувиргана.

Үүссэн фотогүйдэл нь туссан гэрлийн эрчим ба долгионы уртаас хамаарна. RC шүүлтүүр нь оролтын өндөр давтамжийн шуугианыг шүүнэ.



Зураг 12. DET10A2 детекторын дотоод бүтцийн схем.



Зураг 13. DET10A2 детекторын долгионы уртаас хамаарсан мэдрэх мурий.

DET10A2 детекторын техникийн үзүүлэлтийг Хүснэгт №5-д үзүүлэв.

Хүснэгт №5.

Мэдрэгчийн материал	Цахиур
Талбай	$\varnothing 1.0 \text{ нм} (0.8 \text{ мм}^2)$
Долгионы урт	200–1100 нм
Хамгийн өндөр утгад харгалзах долгионы урт	730 нм
Харанхуйн гүйдэл	Дундаж – 0.3 нА Хамгийн их – 2.5 нА
Шилжилтийн багтаамж	6 нкФ

Хүчдэл	10В
Гаралтын гүйдэл	0–10мА

DET10A2 детектор нь батарейнаас тэжээгддэг тул батарейн хүчдэлийг хэмжих шаардлагатай. Дээрх үйлдэлд зориулсан батарей шалгах товчлууур детектор дээр байх ба түүнийг ашиглан гүйцэтгэнэ. Шалгалтын үр дүн нь батарейн хүчдэлтэй харгалзах хүчдэл детекторын гаралтад гарна. Энэ нь дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгддэг.

$$U_{\text{гар}} = U_{\text{бат}} \left[\frac{R_{\text{ачаа}}}{R_{\text{ачаа}} + R_{\text{хяз}}} \right] \quad (1.12)$$

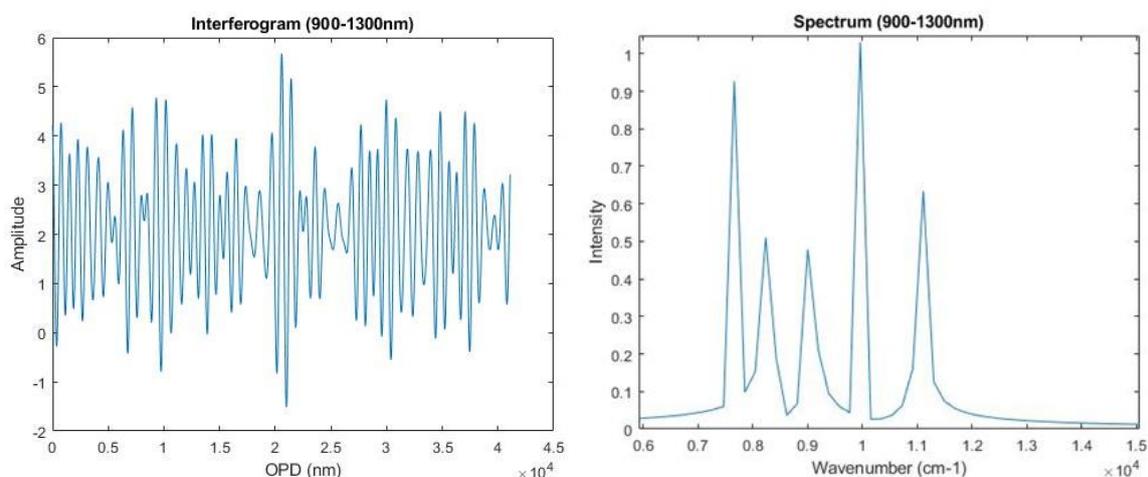
Энд: $U_{\text{гар}}$ -гаралтын хүчдэл, $U_{\text{бат}}$ -батарейн хүчдэл, $R_{\text{ачаа}}$ -ачааны эсэргүүцэл, $R_{\text{хяз}}$ - гүйдлийн хязгаарлагч эсэргүүцэл [32].

Жишээ: $U_{\text{бат}} = 9В$, $R_{\text{ачаа}} = 500Ом$, $R_{\text{хяз}} = 25400Ом$ бол $U_{\text{гар}} \approx 0.17В$ болно.

Аналог тоон хувиргуур

PDA10D2 болон DET10A2 детекторуудын гаралтын дохионы хэлбэр болон төвшинд үндэслэн 0–10В оролттой АТХ ашиглах шаардлагатай. АТХ-ын оролтын суваг нь 1-4, 10-16 битийн тоон гаралттай, дотоод өсгөлт нь 1-8, I2C, SPI, RS232, USB гэх мэт цуваа болон 8-16 битийн зэрэгцээ дамжуулалттай байж болно [35-36].

MATLAB програм дээр АТХ –аас дохио хүлээн авах симуляцыг хийж гүйцэтгэсэн. Симуляцид МСР3428 загварын дельта-сигма АТХ –ын 12 битийн тоон гаралт, 240SPS хэмжилтийн хурд зэрэг үзүүлэлтүүдийг тохируулсан. Симуляцаар 900, 1000, 1100, 1200, 1300нм урттай долгионуудын интерферограм болон түүнээс Фурье хувиргалт ашиглан спектрийг гарган авсан (Зураг 14).



Зураг 14. 900-1300нм интерферограм болон спектрууд

632.8nm долгионы урттай лазерын интерферограмыг бүртгэн авахын тулд 240SPS хурдтай АТХ ашиглах тохиолдолд ШХТ-ын хурдыг 0.1, 0.01, 0.001мм/сек -ээр сонгох үед бүртгэн авах цэгийн тоог тодорхойлсон (Хүснэгт №6).

Хүснэгт №6

ШХТ-ын хурд V (мм/сек)	Интерферограмын үе T (млсек)	АТХ-ын бүртгэх цэгийн тоо
0.001	316.4	76.0
0.01	31.64	7.6
0.1	3.164	0.76

Дээрх хүснэгтээс харахад 240SPS хурдаар өгөгдлийг хувиргадаг АТХ ашиглавал ШХТ-ыг 0.01мм/сек -ээс бага хурдтай хөдөлгөх шаардлагатай нь харагдаж байна.

Гэвч туршилтаар 0.01мм/сек -ээс бага хурдаар ШХТ-г хөдөлгөх үед дохионы шилжилтийн үргэлжилсэн байдал алдагдаж байгаа нь ажиглагдсан (Зураг 15).



Зураг 15. 0.01мм/сек -ээс бага хурдтай хөдөлгөх үед үүссэн алдаа.

Тиймээс ШХТ-г 0.01мм/сек -ээс дээш хурдтайгаар хөдөлгөх ба АТХ нь 12 битийн 240SPS -ээс дээш хурдтай бүртгэдэг байх шаардлагатай байна.

Хэрэв дохионы нэг бүтэн үеэс хамгийн багадаа 20 утгыг бүртгэнэ гэвэл дараах томъёог ашиглан шаардлагатай АТХ-ын хурдыг тооцоолно.

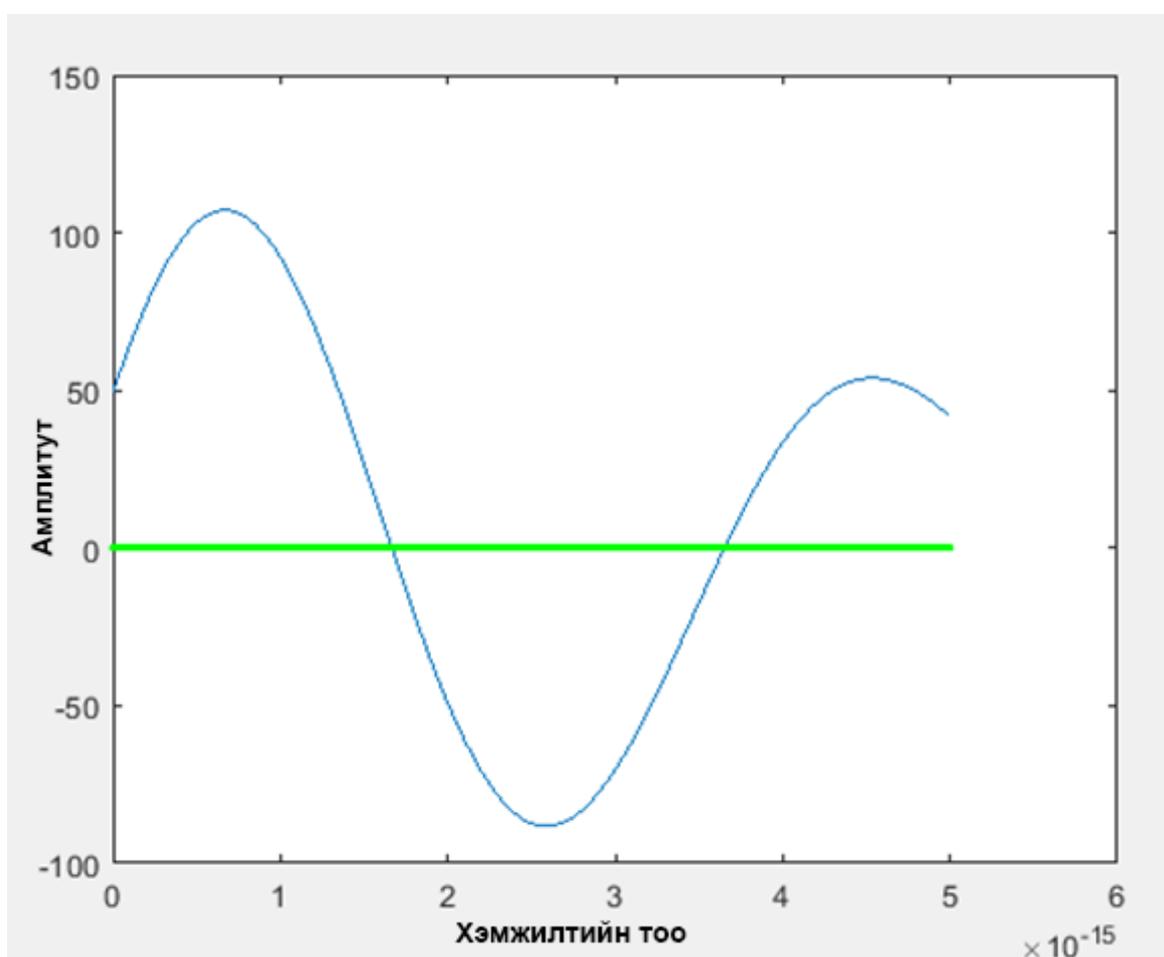
$$SPS = \frac{20}{T} = \frac{20}{31.64 \cdot 10^{-3}} = 632SPS \quad (1.13)$$

Энд T нь дохионы үе болно.

Дээрх тооцооны үр дүнд ШХТ-ыг 0.01мм/сек хурдтай хөдөлгөх үед АТХ нь хамгийн багадаа секундэд 632 утга бүртгэдэг байх шаардлагатай байна.

МСР3428 АТХ нь 240SPS буюу шаардагдах хурднаас 2.6 дахин бага тул интерферограмыг богино хугацаанд алдаа багатай бүртгэх тохиолдолд ашиглах боломжгүй байна.

Гэвч 240SPS үзүүлэлттэй АТХ-ыг ашиглан интерферограмыг сэлгэн бүртгэхэд шаардлагатай хэмжилтийн тоог MATLAB програм дээр тооцоолсон. Тооцооны үр дүн нь 8192 гэж гарсан. Энэ нь нэг бүтэн үеийг хэмжихэд 32 секундийн хугацаа шаардлагатай. Тооцооны үр дүнгийн график (Зураг 16).



Зураг 16. 900-1300нм нил улаан туяаны интерферограмыг хэмжихэд шаардлагатай хэмжилтийн тоог тооцоолсон график

Дээрх үр дүнг бодит систем дээр ажиллуулахад МСР3428 АТХ, Arduino Due микроконтроллерыг ашиглахаар тооцоолон Arduino болон LabVIEW програм дээр програмчилсан.

Arduino due нь 8192 ширхэг 16 битийн утгуудыг дамжуулах шаардлагатай ба ингэхийн тулд нэмэлт ялгах байтуудыг нэмснээр 122880 байт-ыг 115200 бум/сек

хурдаар дамжуулах програм бичив. Энэ хурдыг ихэсгэх шаардлагатай. Зураг 17-д програмын кодын хэсгийг харуулав.

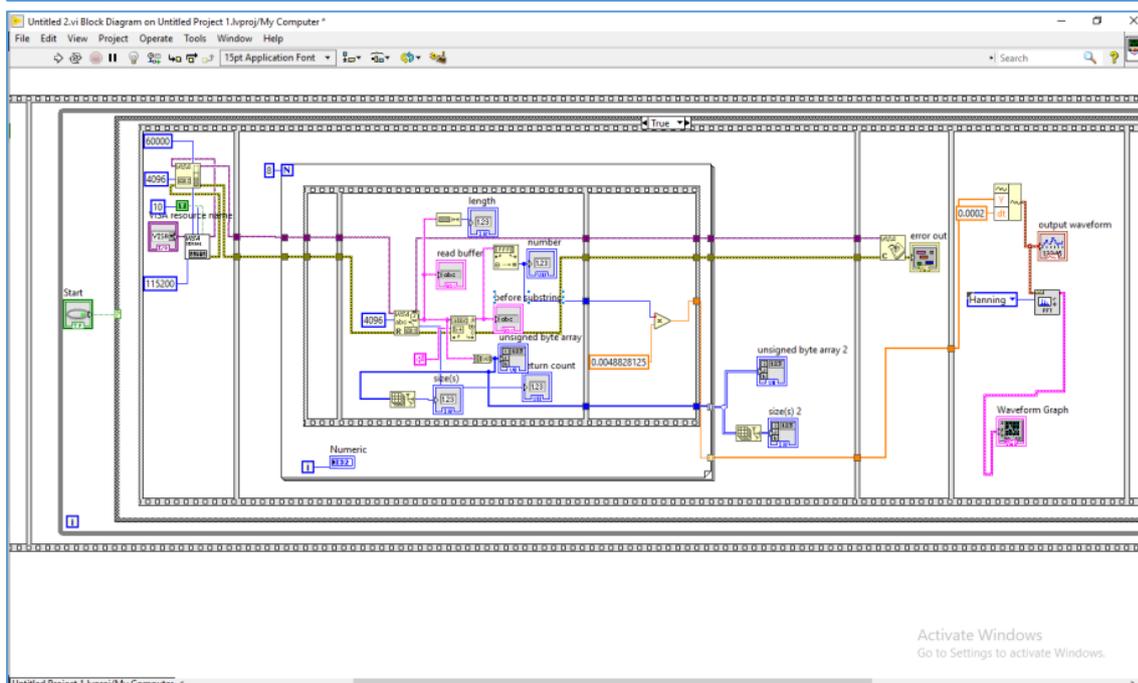
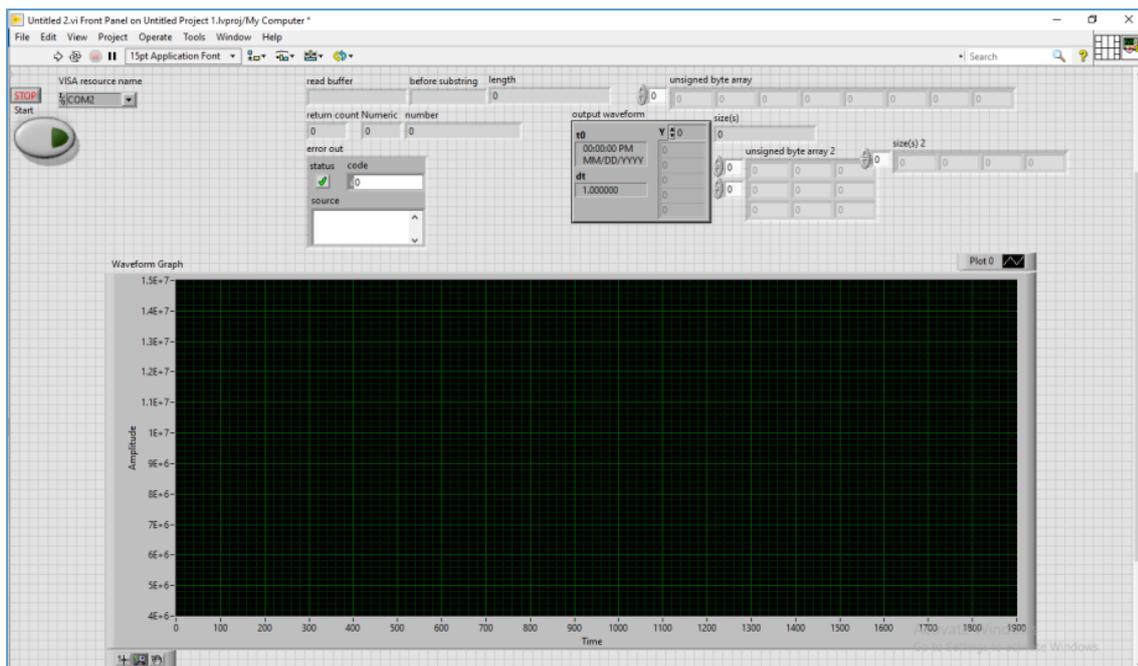
```

1 // MCP3428 ATX удирдах програм Arduino Due 28
2 #include <Wire.h> 29
3 #define I2C_ADDR 0x68 30
4 unsigned int data[3]; 31
5 unsigned long time1, time2, time3; 32
6 int raw_adc; 33
7 int result_mat[8192]; 34
8 int flag=0; 35
9 int flag2=0; 36
10 void setup(){ 37
11 Wire.begin(); 38
12 Wire.setClock(400000); 39
13 Serial.begin(115200); 40
14 Wire.beginTransmission(I2C_ADDR); 41
15 delay(1000); 42
16 } 43
17 void loop(){ 44
18 Wire.beginTransmission(I2C_ADDR); 45
19 Wire.write(0x10); 46
20 Wire.endTransmission(); 47
21 time1=millis(); 48
22 flag2=0; 49
23 int kk=500; 50
24 for(int i=0;i<kk;i++){ 51
25 do{ 52
26 | flag=0; 53
27 | data[0]=0; 54
28 | data[1]=0;
29 | data[2]=0;
30 | Wire.requestFrom(I2C_ADDR,3);
31 | int lp=0;
32 | while(Wire.available())
33 | { data[lp]=Wire.read();
34 | | lp++;
35 | }
36 | flag=data[2]&0x80;
37 | if(data[2]==0){
38 | flag2++;
39 | Wire.begin();
40 | Wire.beginTransmission(I2C_ADDR);
41 | Wire.write(0x14);
42 | Wire.endTransmission();
43 | delay(1);
44 | flag=0x80;
45 | }
46 | }while(flag==0x80);
47 | raw_adc=(data[0]&0xFF)*256+data[1];
48 | result_mat[i]=raw_adc;
49 | }
50 | Serial.print('B');
51 | for(int i=0;i<kk;i++){
52 | Serial.print(result_mat[i],DEC);
53 | Serial.print(',');
54 | }

```

Зураг 17. Arduino-д бичсэн програмын код

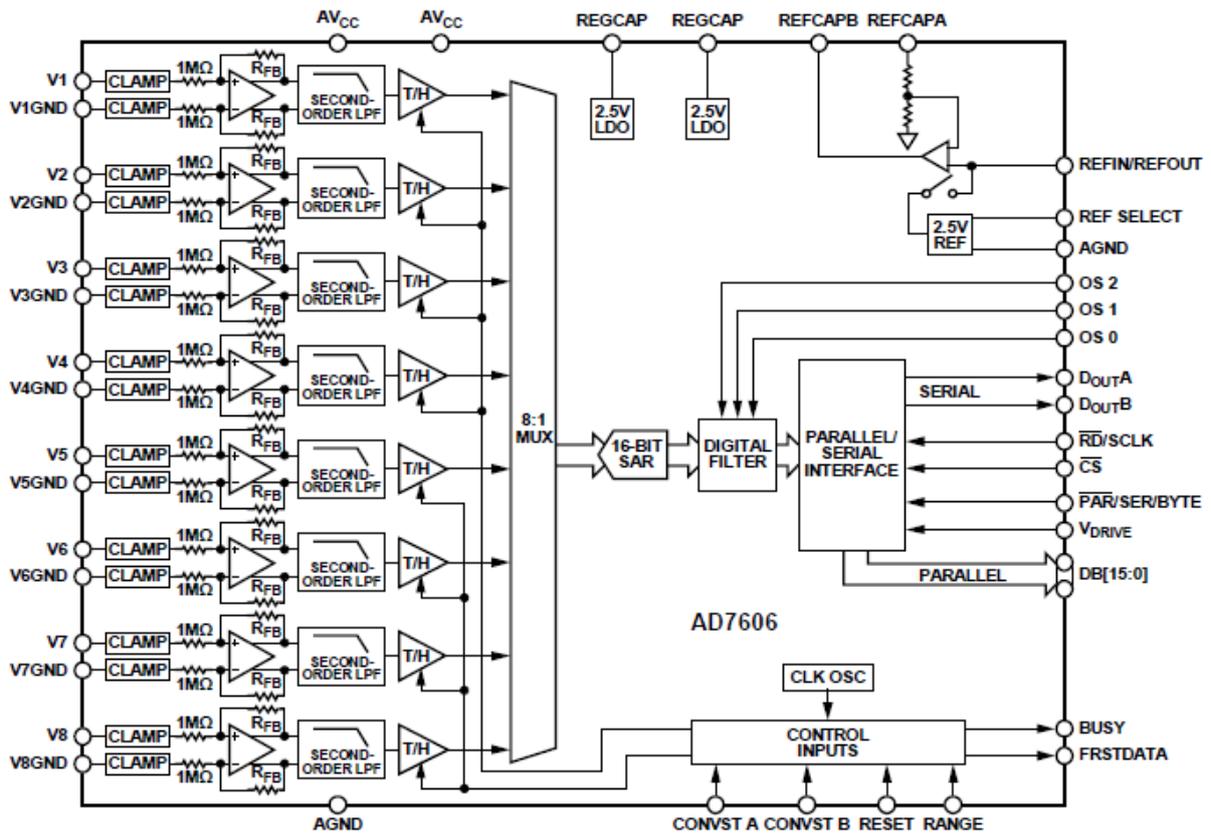
Arduino due-аас компьютерт ирэх мэдээллийг хүлээн авах, боловсруулах програмыг LabVIEW-д бичсэн. Энэ програм нь цуваа байтаар өгөгдлийг хүлээн авч, зохимжтой тоон утгаруу шилжүүлэн, хадгалах мөн графикаар үзүүлэх үүрэгтэй. Зураг 18-д програмын кодын хэсэг болон интерфэйсийг харуулав.



Зураг 18. LabVIEW-д бичсэн програмын интерфейс болон блок диаграм

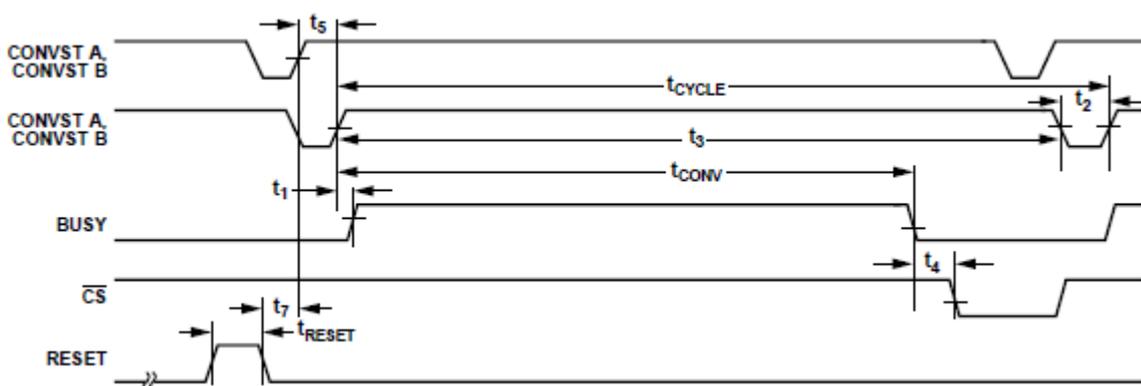
Бага хурдтай АТХ-ыг ашиглах тохиолдолд дээрх шийдэл нь хэрэглэгдэж болох боловч өндөр хурдтай тооцооллын хэрэглээнд тохиромжгүй юм.

Өндөр хурдтай тооцооллын үед ШХТ-г 0.01 мм/сек -ээс дээш хурдаар хөдөлгөх шаардлагатай. Энэ үед интерферограмын нэг үеийг хэмжихэд 632 SPS -ээс дээш хурдтай АТХ-ыг ашиглах шаардлагатай ба AN7606 АТХ нь 200 kSPS хурдтай тул дээрх хурдыг бүрэн хангаж байна (Зураг 19).

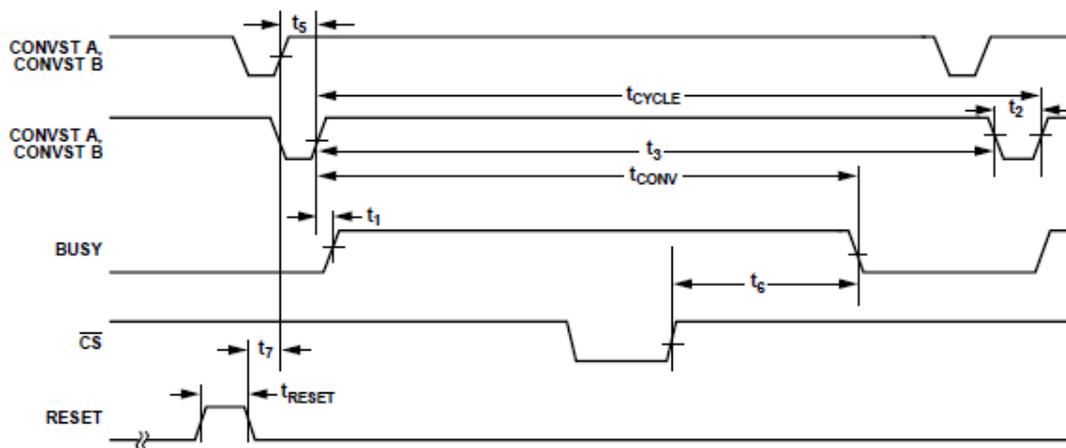


Зураг 19. AD7606 ATX-ын схем.

АТХ-ын ажиллагааны нэн чухал ойлголт нь хүлээн авсан дохиог хувиргах хугацааны диаграмм байдаг (Зураг 20). Хугацааны диаграммын дагуу удирдлагын дохиог зөв тохируулснаар алдаагүй үр дүнг хүлээн авдаг.



a)



b)

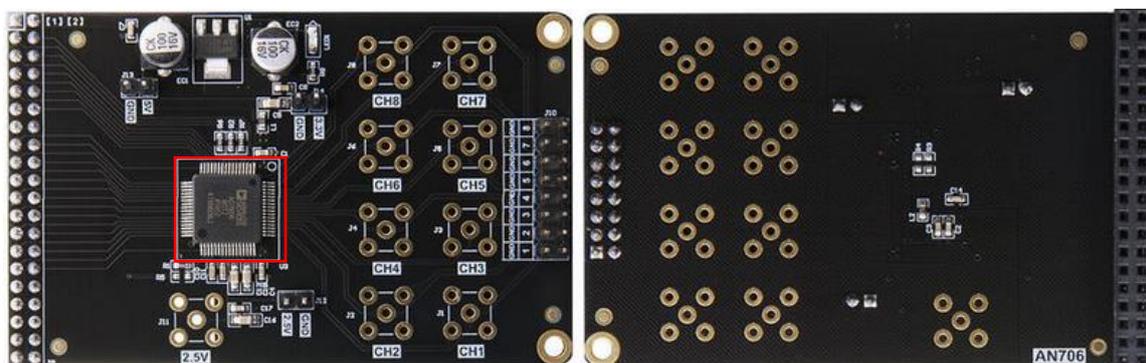
Зураг 20. AD7606 ATX-ын хугацааны диаграмм. а) хувиргалт хийсний дараа уншилтыг гүйцэтгэх, б) хувиргалтыг хийх үед уншилтыг гүйцэтгэх.

Дээрх диаграммаас харахад RESET оролт нь тухайн ATX-ын региструудийн утгыг анхны утгад оруулдаг оролт. CONVST A ба CONVST B нь хувиргалтыг эхлүүлдэг оролтууд. CONVST A нь 1,2,3,4-р сувгуудын хувиргалтыг эхлүүлэх оролтуудыг харин CONVST B нь 5, 6, 7, 8-р сувгуудын хувиргалтыг эхлүүлэх оролтууд юм. CS оролт нь хувиргасан өгөгдлийн дамжуулалтыг зөвшөөрдөг оролт юм. Мөн BUSY гаралт нь логик 1 бол хувиргалт гүйцэтгэгдэж буйг харуулна. Үүнээс гадна DB[0:15] хөл нь өгөгдлийнх бөгөөд эдгээр хөлөөр хувиргасан 16 битийн өгөгдлийг хүлээн авна.

Интерферограмын дохиог бүртгэхэд AN7606 ATX-т суурилан бүтээгдсэн AN706 ATX-ын модулийг ашигласан (Зураг 21).

AN706 ATX-ын модулийн техникийн үзүүлэлт:

- $\pm 10V$, $\pm 5V$ хоёр туйлт аналог оролттой,
- $1M\Omega$ оролтын эсэргүүцэлтэй,
- 12, 14, 16 битийн хувиргалттай,
- $200kSPS$ хурдтай,
- Тэжээлийн хүчдэл $5V$,
- 8 сувагтай.



Зураг 21. AN706 аналог тоон хувиргуурын модуль.

Зураг 21-ын зүүн талын зураг дээрх микросхем нь AN7606 ATX болно. Энэ модуль нь AN7606-г тэжээх тэжээлийн хэсэг, ажиллуулахад шаардлагатай бусад электроникийн элементүүд болон гадаад төхөөрөмжийн оролт гаралтуудыг багтаасан байдаг. Мөн аналог дохиог тоон хэлбэрт хувирган гаралтын өгөгдлийг 16 битээр зэрэгцээгээр дамжуулна.

AN706 ATX-ын модуль нь ALINX AX309 ПЛИС* хавтантай зохицон ажиллах боломжтой. ALINX брэндийн AX309 хавтан нь хямд үнэтэй, бага чадлын XILINX SPARTAN-6 хөгжүүлэгч хавтан юм. Энэхүү хавтан нь дараах бүрдэл хэсгүүдийг агуулдаг. Үүнд:

- Xilinx Spartan-6 XC6SLX9 ПЛИС процессор
- On-board JTAG програмчлалын порт
- 256Мбит SDRAM санах ой
- 64Мбит SPI FLASH санах ой
- 5000000 pixels OV5640 камерын модулийг дэмжих порт
- 4 товчлуур, 4 LED гэрэл, 6 7-сегментийн индикатор, 1 хонх
- 50МГц осциллятор
- RTC цагийн модуль
- 24LC04 EEPROM санах ой
- VGA модуль
- 1.2В, 5В, 3.3В тэжээлийн үүсгүүр
- On-board USB-RS232 модуль
- 2 ширхэг 40 хөлтэй өргөтгөлийн порт

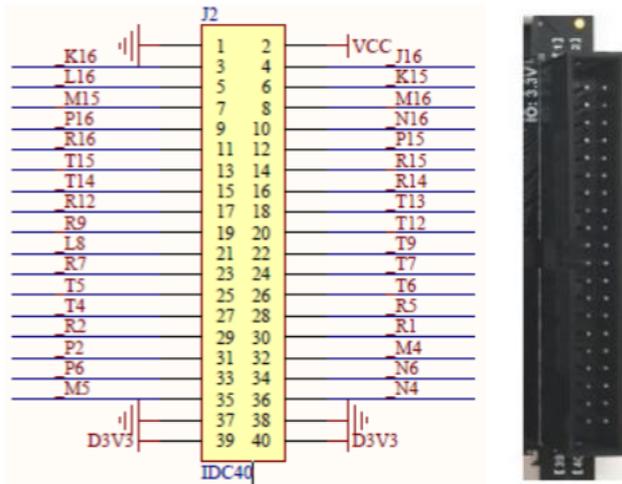
AX309 хавтан нь хэмжилтийг гүйцэтгэн, өөр дээрээ хэмжилтийн утгыг буферлэн хадгална. Эдгээр утгыг компьютерт дамжуулна. Дээрх жагсаалтаас харахад дотоод синхронжих импульс нь 20нсек-ын үетэй. AX309 хавтангын харагдах байдлыг Зурагт 22-д үзүүлэв.



Зураг 22. ALINX AX309 ПЛИС хавтан.

*ПЛИС – програмчлагддаг логик интеграл схем

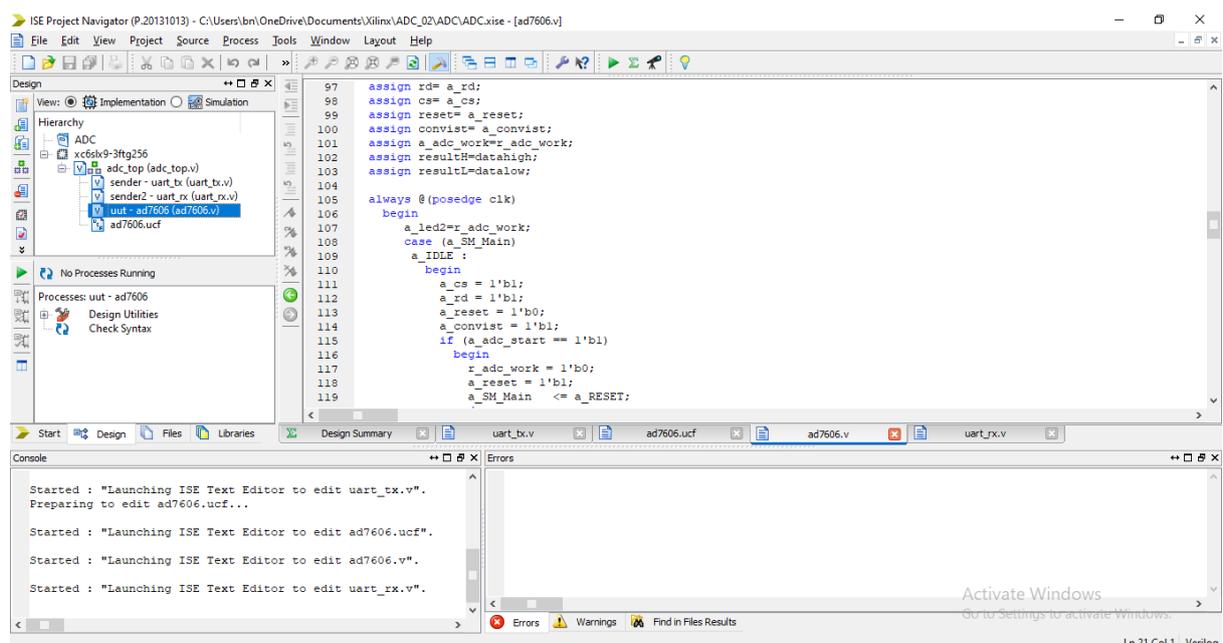
АХ309 хавтан нь програмчлагч хүссэн тохируулгаар ажиллах боломжтой TTL түвшний 40 хөлтэй өргөтгөх портыг агуулдаг (Зураг 23). Энэ нь нэмэлтээр АТХ-ыг холбон ажиллуулах боломжийг олгодог. Мөн процессор нь гадаад төхөөрөмжтэй зэрэгцээ ажиллах боломжтой нь хурдтай мэдээлэл солилцох нөхцөлийг бүрдүүлдэг [36].



Зураг 23. 40 хөлтэй өргөтгөх порт.

МЭДЭЭЛЭЛ ДАМЖУУЛАХ ИНТЕРФЕЙС

АХ309 ПЛИС-ийн програм нь АТХ-ыг унших, өгөгдлийг 1Мбит/сек хурдаар компьютерт дамжуулах гэсэн хэсгүүдээс бүрдэнэ. ПЛИС-ийн програмчлалыг ISE design програм дээр бичсэн (Зураг 24) [38]. Програмын дэлгэрэнгүйг хавсралт №2-оос үзнэ үү.

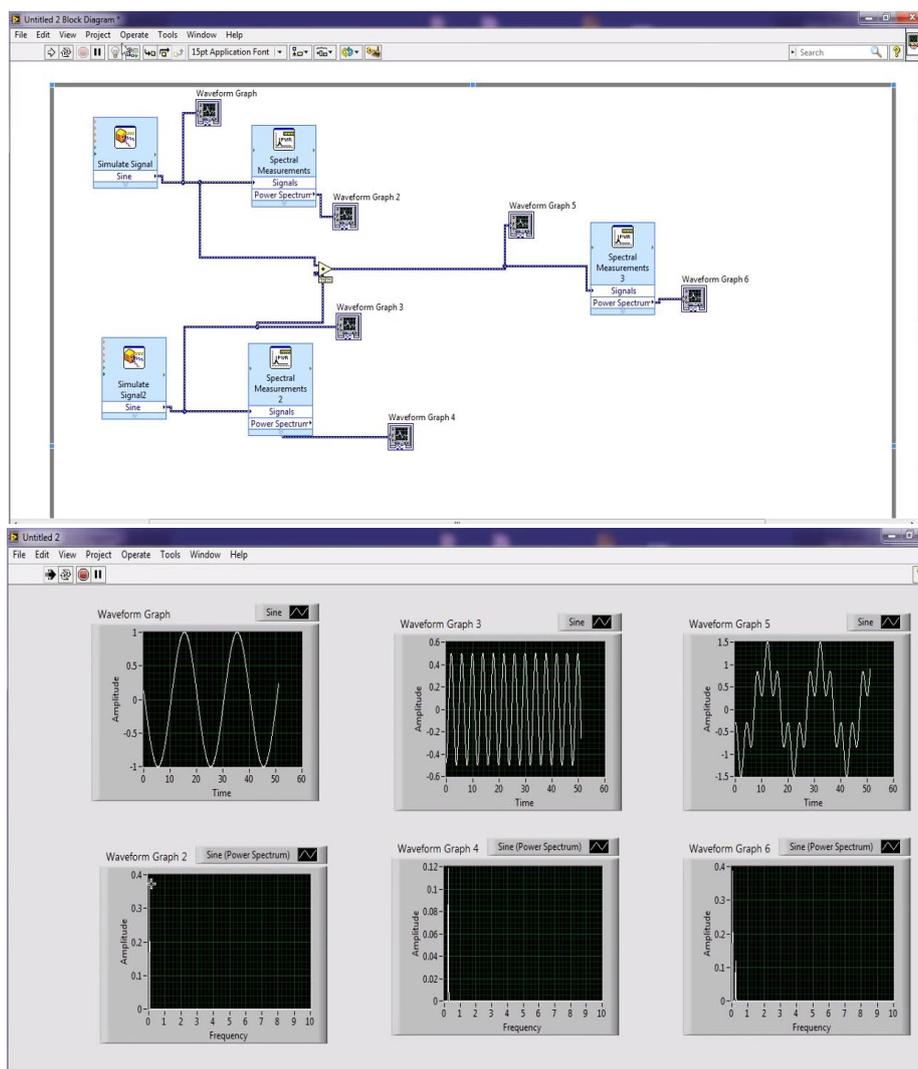


Зураг 24. ISE design програм

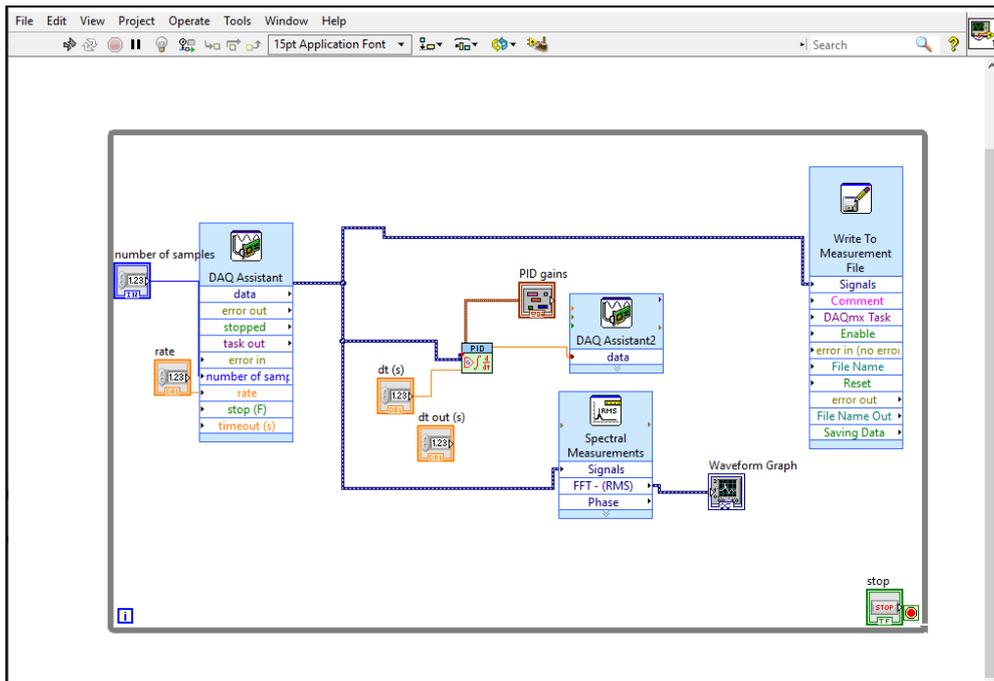
ХҮЛЭЭН АВАХ ПРОГРАМ ХАНГАМЖ

АТХ –ын дохиог компьютерт оруулан Фурье хувиргалт хийж спектрээ гарган авна. Үүний тулд тоон дохионд математик үйлдэл хийх програмыг програмчлалын аль нэг хэл (C++, C#, гэх мэт)-ээр алхам бүрээр нь бичих эсвэл MATLAB, LabVIEW гэх мэт програмуудын бэлэн функцүүдийг хөгжүүлэх замаар боловсруулж болно. LabVIEW програм нь програмчлалыг хурдтай гүйцэтгэх, өөрчлөлт хөгжүүлэлтийг хялбар хийх боломжийг олгодог. Иймд LabVIEW програмын бэлэн функцүүдийг хөгжүүлэн өөрсдийн интерфэйс програмыг бий болгосон [39].

Виртуалаар дохио үүсгэн түүн дээрээ хөрвүүлэлт хийх, эгшин бүрд дохио хүлээн авах програмуудыг боловсруулсан (Зураг 25, 26).

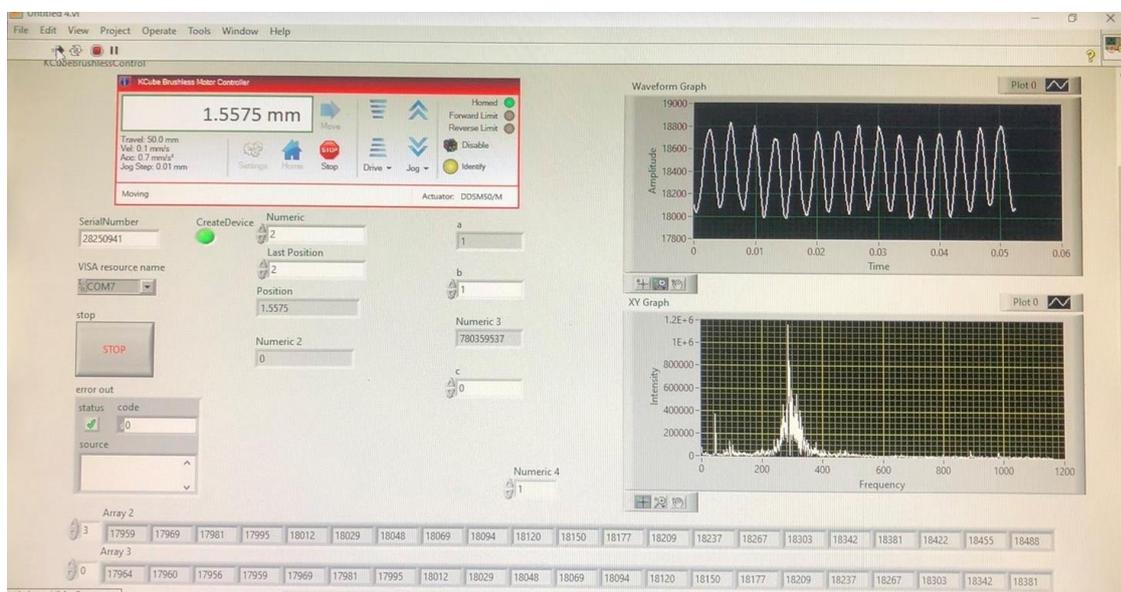


Зураг 25. LabVIEW програм дээр хэд хэдэн синусоид долгионуудыг нэмж, Фурье хувиргалт хийсэн байдал.



Зураг 26. LabVIEW програм дээр дохиог тухайн агшинд хүлээн авах програм

Интерферограмыг хүлээн авч дэлгэцэд харуулах, Фурье хувиргалт (ФХ) хийж спектрийг гаргах, үр дүнг Excel sheet-д хадгалах интерфейс програмыг LabVIEW дээр бичсэн (Зураг 27).



Зураг 27. Интерферограмыг бүртгэх програмын интерфейс.

ТУРШИЛТ БА ҮР ДҮН

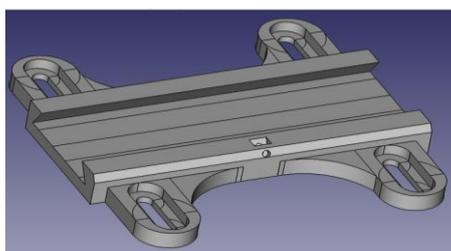
ТУРШИЛТЫН БЭЛТГЭЛ АЖИЛ

Оптик элементүүдийн өндөршилийн төвшинг тэгшитгэгч суурь [40]. Суурь нь элемент бүрд өөр өөр өндөртэй байх ёстойг тооцоолон гаргасан (Хүснэгт №7).

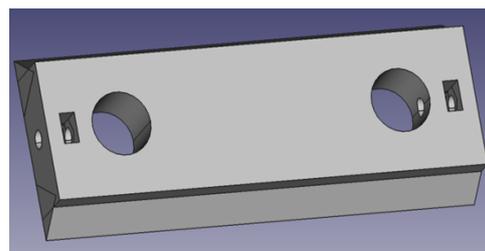
Хүснэгт №7.

№	Оптик элементийн нэр	Суурийн өндөр (мм)
1	Нил улаан туяаны үүсгүүр	26.25
2	Хүнхэр толь	35.0
3	Диафрагм	29.0
4	Парабол толь	35.0
5	Долгион хуваагч	41.3
6	ШХТ+толь	0
7	Детектор	35.4

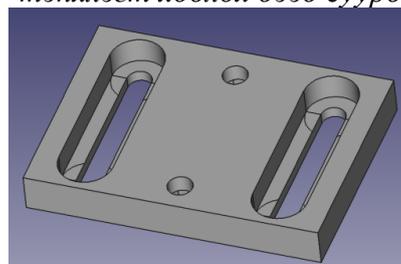
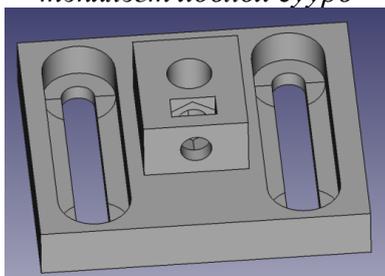
Төхөөрөмжийн элементүүд бүрд тохирох 3 тэнхлэгт хөдлөх боломжтой суурийн загварыг 3 хэмжээсээр FreeCAD програм дээр боловсруулсан. 3 тэнхлэгт хөдлөх учир сууриуд нь дээд болон доод гэсэн 2 хэсгээс бүрдэнэ. Доод суурь нь X тэнхлэгт, дээд хэсэг нь Y тэнхлэгт, дээд хэсэг нь голдоо нүхтэй ба Z тэнхлэгт хөдлөх боломжтойгоор элементүүдтэй холбогдох резбатай төмөр голуудыг суулгахаар тооцож боловсруулсан.



Зураг 28. Гэрлийн үүсгүүрийн X тэнхлэгт хөдлөх суурь



Зураг 29. Гэрлийн үүсгүүрийн Y болон Z тэнхлэгт хөдлөх дээд суурь



Зураг 30. Толины X тэнхлэгт хөдлөх суурь

Зураг 31. Толины Y болон Z тэнхлэгт хөдлөх суурь

Зураг 30, 31 дээрх суурийг хүнхэр толь, диафрагм, парабол толь, долгион хуваагч, детектор зэрэгт ашиглахаар зургийг гаргасан.

FreeCAD програм дээр боловсруулсан зургаар 3D принтерээр элементүүдийг хэвлэсэн.



Зураг 32. Гэрлийн үүсгүүрийн доод суурь



Зураг 33. Гэрлийн үүсгүүрийн дээд суурь



Зураг 34. Гэрлийн үүсгүүрийн суурь



Зураг 35. Толины доод суурь



Зураг 36. Толины дээд суурь



Зураг 37. Толины суурь

Хэвлэсэн суурь дээр элементүүдийг байрлуулан системийг угсарсан (Зураг 38). Элемент тус бүрийн өндөр, хоорондын зайг тохируулагч лазераар нарийн тохируулсан. Спектрометрийн оптик ширээг ДСП* хавтан дээр дагуу болон тууш 5 см-ийн зайтай хэмжээс гаргаж торлон, огтлолцлын цэгүүд дээр бмм диаметртэй нүхэлж бэлтгэсэн.



Зураг 38. Элементүүдийг суурин дээр байрлуулан өндөр, зайг тохируулан байрлуулсан байдал

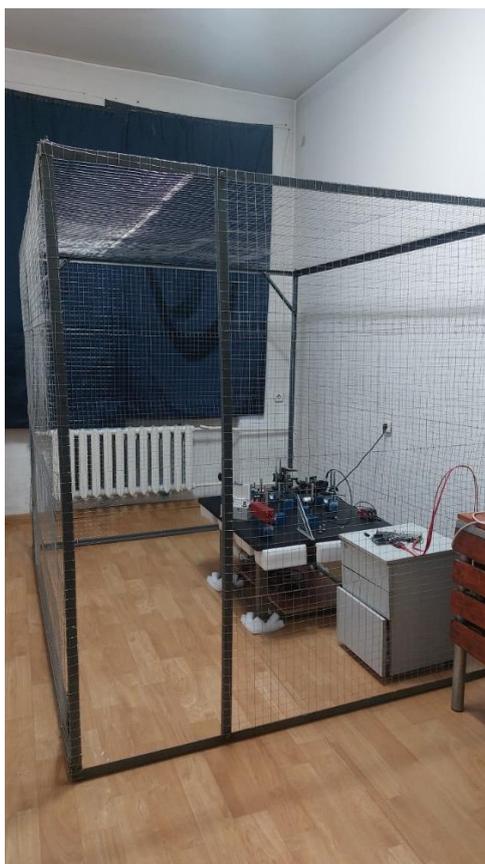
Спектрометр байрлах өрөөний гэрлийн шуугианыг багасгах зорилгоор нарны гэрэл нэвтэрдэггүй хаалт хийсэн (Зураг 39).

** ДСП – модны үрдсийг тусгай цавуутай хольж шахаж хэвлэсэн хавтан.*



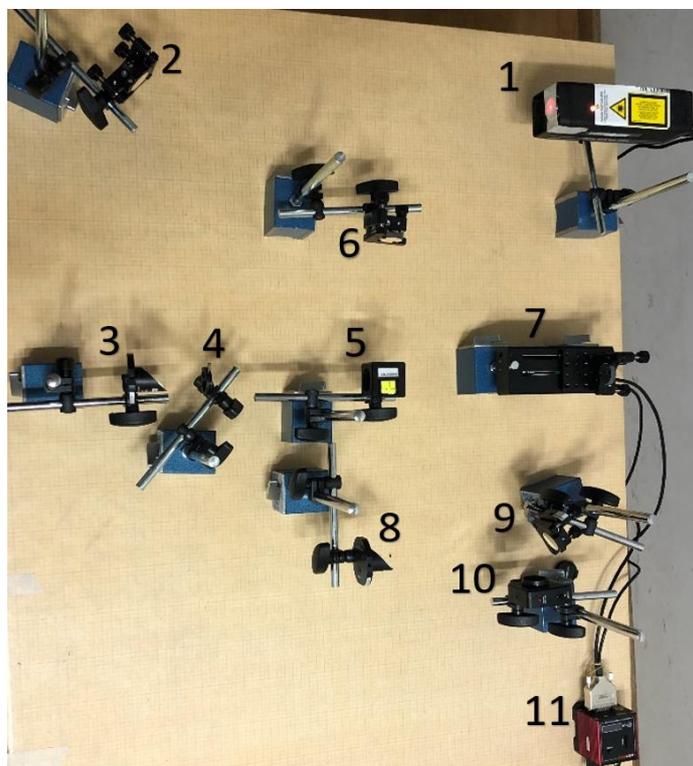
Зураг 39. Гэрэл нэвтэрдэггүй хаалтыг туршилтын өрөөнд байрлуулсан.

Зураг 38, 39-д үзүүлсэн нөхцөлөөр туршилтыг явуулахад детекторт орчны шуугиан ихтэй дохиог хүлээн авсан. Иймд системийн тогтворжилтыг хангахын тулд лазерын лабораторийн өрөөг Физик, Технологийн Хүрээлэнгийн 333 тоотод байгуулсан (Зураг 40). Системд нөлөөлж буй орчны цахилгаан соронзон дохионы шуугианыг багасгах зорилгоор Фарадейн торыг үүсгэсэн.



Зураг 40. Лазерын туршилтын лаборатори

Зэвэрдэггүй ган суурь, суурийг ширээнд бэхлэх соронзон суурь ашиглан, He-Ne лазерыг ашигласан, FTIR-т ашиглагдах Майкольсоны интерферометрийг угсралтыг зураг 41-д, FTIR системийг угсралтыг зураг 42-д үзүүлэв.



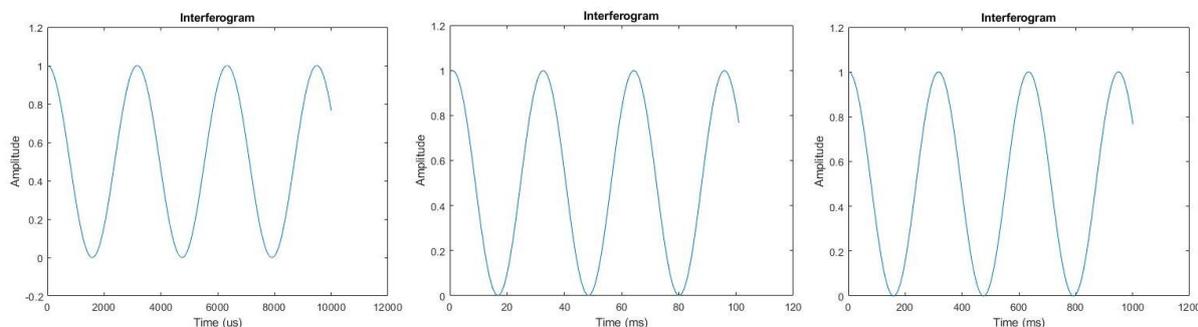
Зураг 41. Лазер болон Майкольсоны интерферометрийн систем. 1. He-Ne лазер, 2. Хүнхэр толь, 3. Парабол толь, 4. Долгион хуваагч, 5. Хөдөлгөөнгүй байрлах толь, 6. ШХТ- дээр байрлуулсан толь, 7. Парабол толь



Зураг 42. FTIR спектрометрийн элементүүдийг ширээнд угсарсан байдал

ЛАЗЕРЫН НЭГ ҮҮСГҮҮРИЙН ИНТЕРФЕРОГРАМ

Майкольсоны интерферометрийн зөв ажиллаж буй эсэхийг шалгах арга нь интерферограм ажиглагдаж буй эсэх юм. Иймд He-Ne лазерын интерферограммын симуляцийг хөдөлгөөнт толь 0.1 мм/сек , 0.01 мм/сек , 0.001 мм/сек хурдтай байх үеүдэд хийсэн (Зураг 43).



Зураг 43. Хөдөлгөөнт толь харгалзан зүүн талаас

0.1 мм/сек , 0.01 мм/сек , 0.001 мм/сек хурдтай байх үеийн интерферограммын симуляц

Майкольсоны интерферометрээс гарч буй гэрлийг цулгуй гадаргууд тусган интерферограм үүсэж байгааг шалгасан (Зураг 44).



Зураг 44. Интерферограммын ажиглалтын зураг. Зурвас үүссэн байдал

Систем тохирсны дараа интерферометрээс гарч буй гэрлийг детекторт тусган дохиог осциллоскопоор ажигласан (Зураг 45).

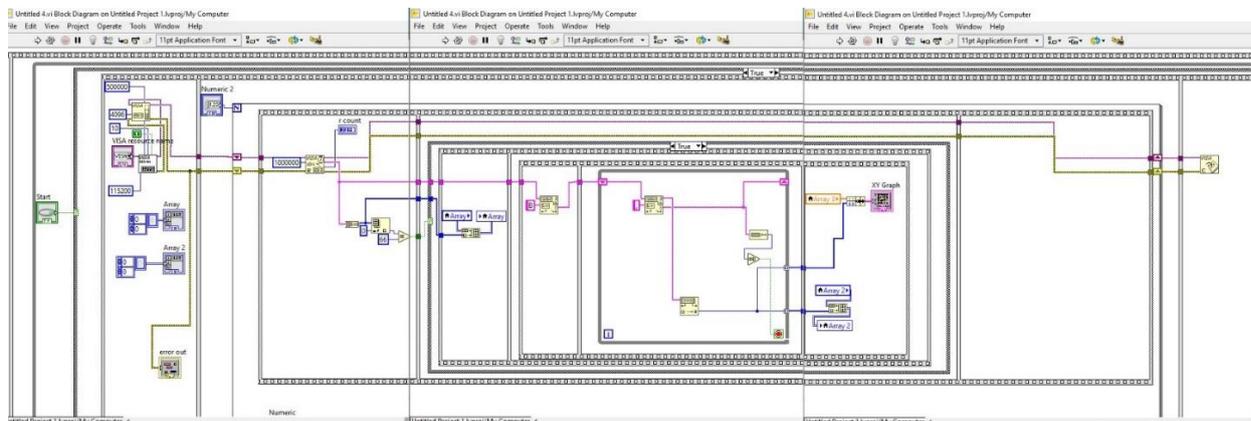


Зураг 45. Хөдөлгөөнт толь харгалзан зүүн талаас

0.1 мм/сек , 0.01 мм/сек , 0.001 мм/сек хурдтай байх үеийн осциллоскоп дээрх интерферограммын дохионы ажиглалтын зураг.

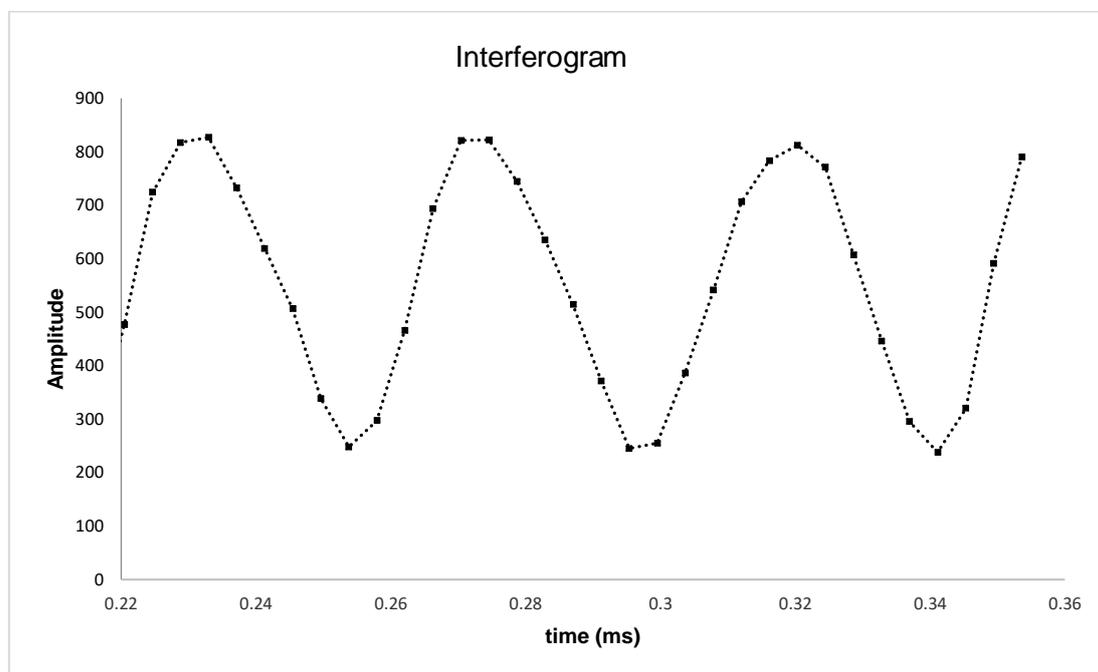
Зураг 43, 45 –аас интерферограмын симуляцийн утга болон хэмжилтийн утгууд нь ижил байгааг харж болно.

NI -LabVIEW програмд АТХ – ын дохиог хүлээн авах програм бичсэн ба зураг 46-д програмын блок схемийг харуулав. Энэ програм нь 8.32 секундэд 2000 өгөгдөл хүлээн авч дэлгэцэд гаргах, цуглуулсан өгөгдлийг Microsoft Office Excel програмд хөрвүүлэн хадгалдаг.



Зураг 46. LabVIEW програм дээр бичсэн дохио хүлээн авах, боловсруулах интерфэйсийн блок схем

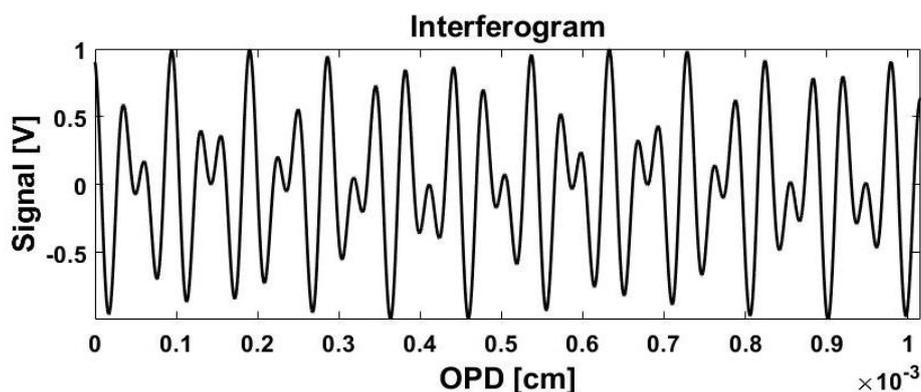
Тухайн интерфэйс дээр хөдөлгөөнт толь 0.01мм/сек хурдтай байх үеийн интерферограмын дохиог хүлээн авсныг Зураг 47-т үзүүлэв.



Зураг 47. Хөдөлгөөнт толь 0.01мм/сек хурдтай хөдлөх үед үүсэх He-Ne лазерын интерферограмыг LabVIEW програм дээр харуулсан байдал

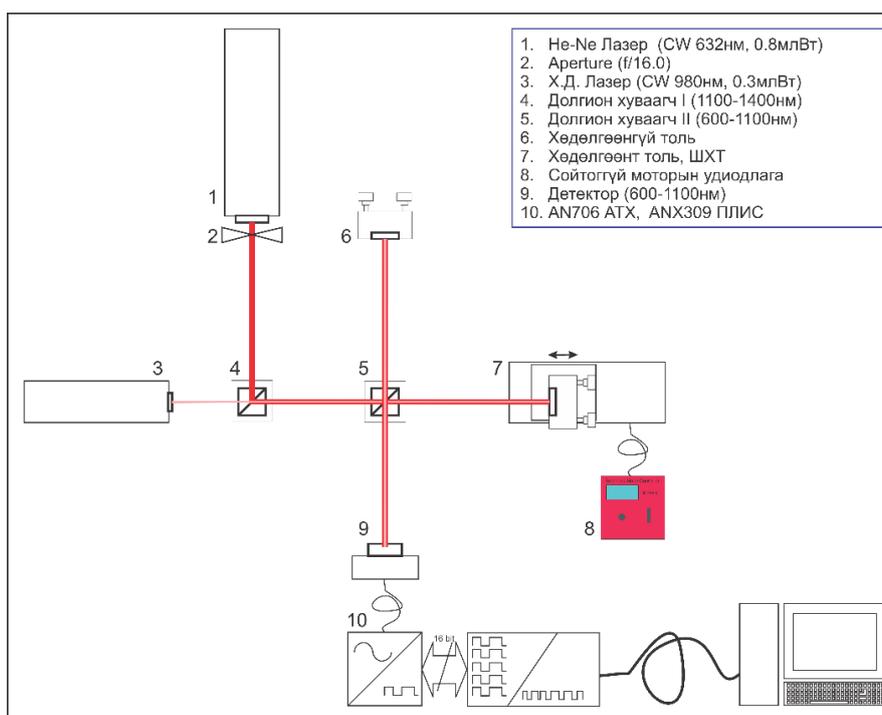
ЛАЗЕРЫН ХОС ҮҮСГҮҮРИЙН ИНТЕРФЕРОГРАМ

Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийн төхөөрөмжийн хамгийн гол хэсэг нь Майкольсоны интерферометр (МИ) болон түүгээр үүсгэсэн интерферограм дохиог зөв бүртгэх байдаг. Иймд интерферограм дохиог бүртгэх техникийн судалгаа, туршилтыг гүйцэтгэлээ. МИ системийг хоёр ширхэг долгион хуваагчтайгаар угсарч 632.8нм , 0.8млВт (He-Ne лазер) болон 980нм , 0.3млВт (хагас дамжуулагч лазер) долгионы урттай лазерын үүсгүүрүүдийг ашиглан туршсан. Туршилтад ашигласан лазерын цацрагуудын нийлмэл дохионы интерферограмыг MATLAB програм ашиглан загварчилсан (Зураг 48).

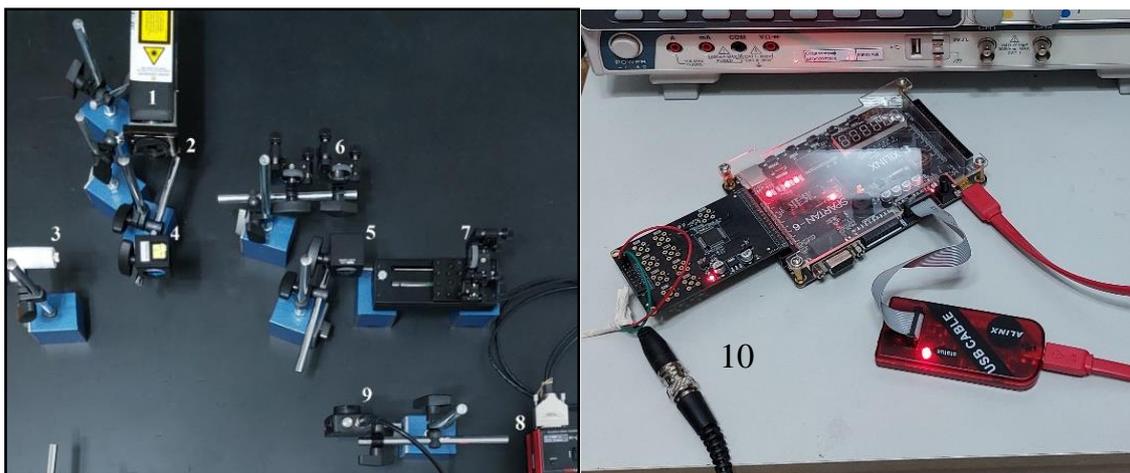


Зураг 48. Нийлмэл дохионы интерферограмын загварчлалын үр дүн

Лазерын цацрагуудыг эхний долгион хуваагчийн нэвтрүүлэх болон ойлгох чадварыг ашиглан нэгтгэж хоёр дахь долгион хуваагчаар интерферограмын дохиог үүсгэн детекторт хүлээн авч түүнийгээ компьютерт бүртгэх МИ-ийн системийг угсарч туршсан (Зураг 49).



Зураг 49. Лазерын хос үүсгүүр бүхий МИ-ийн системийн загвар

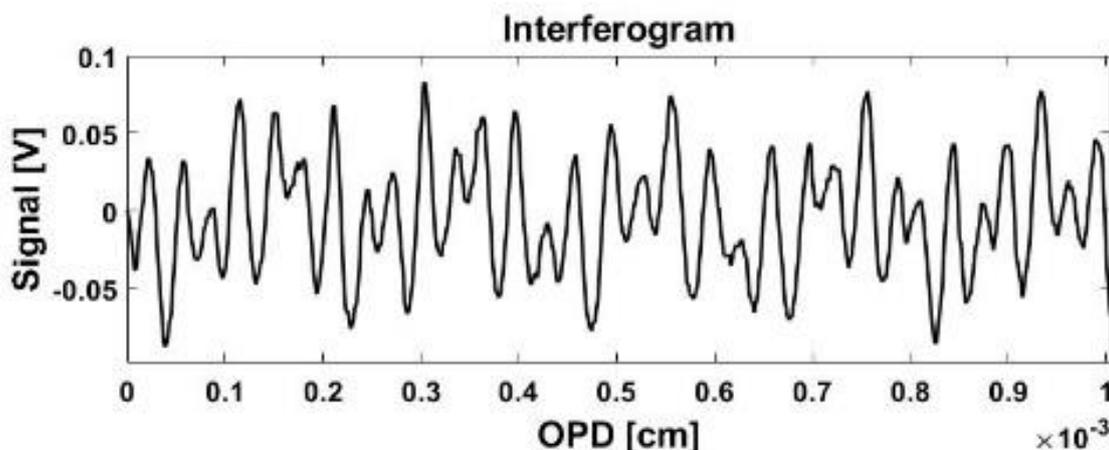


Зураг 50. Туршилтад ашигласан МИ-ийн систем

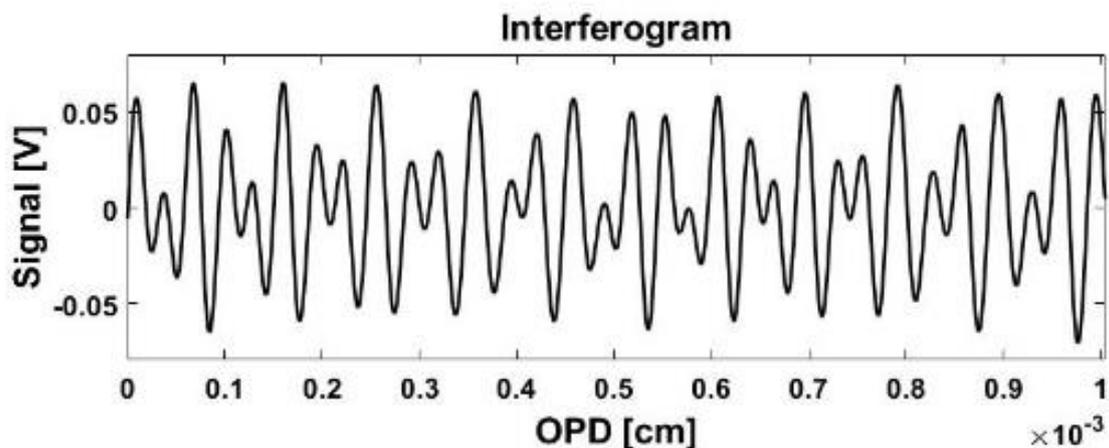
- 1) He-Ne лазер 2) диафрагм 3) Хагас дамжуулагчийн лазер 4,5) долгион хуваагч
- 6) хөдөлгөөнгүй толь 7) хөдөлгөөнт толь 8) ШХТ-ийн удирдлага
- 9) Детектор 10) AN706 ATX-ын модуль, ANX309 ПЛИС хавтан

Лазерын цацаргуудын детекторт ирэх эрчмийг хэмжихэд He-Ne лазерын эрчим нь хагас дамжуулагчийн лазерын эрчмээс их байсан тул бууруулах зорилгоор диафрагмыг (зураг 49.2) ашигласан. Интерферограмын дохиог DET10A2 фото-детекторт (Зураг 49.9) хүлээн авсны дараагаар AD7606 аналог-тоон хувиргуур (АТХ) бүхий AN706 модулийг ашиглан хөрвүүлэлт хийн тоон дохио болгон хувиргаж АХ309 ПЛИС хавтангаар дамжуулан компьютерт бүртгэсэн.

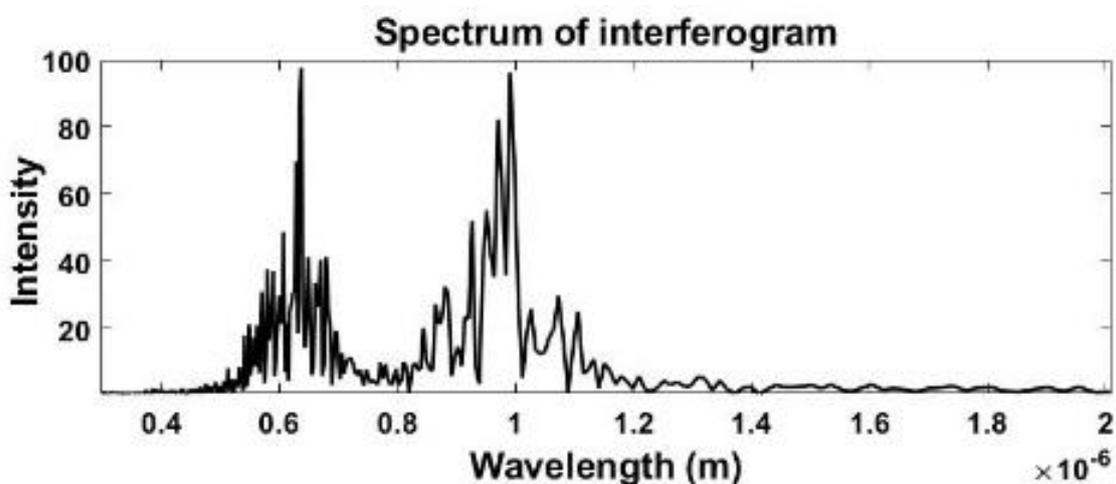
Хоёр лазерын нийлмэл цацрагийн интерферограмыг бүртгэсэн туршилтын үр дүн (Зураг 51). Бүртгэгдсэн дохионд ФХ хийн спектрийг харахад хүлээн авсан дохионд хөндлөнгийн нам давтамжийн шуугиан буюу 50 Гц орчмын шуугианы их байсан. Иймд бүртгэсэн дохиог нам давтамжийн шүүлтүүр дамжуулан ФХ хийн интерферограмын спектрийг гарган авсан (Зураг 52).



Зураг 51. Туршилтаар бүртгэсэн хоёр лазерын нийлмэл цацрагийн интерферограм



а)



б)

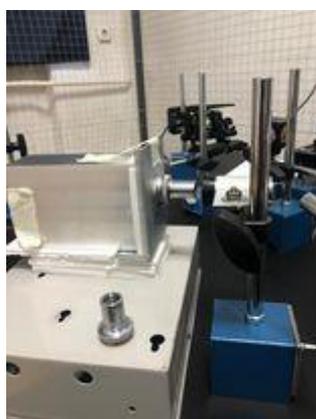
Зураг 52. Хос лазерын интерферограм боловсруулалтын үр дүн а) Нам давтамжийн шүүлтүүрээр орсон интерферограм, б) Шүүсэн интерферограмын спектр

Туршилтын үр дүнгээс харахад угсарсан МИ систем нь зөв ажиллаж байгааг 2 янзаар үнэлсэн. Дээрх үр дүнгүүдээс харахад загварчлал болон туршилтаар гарган авсан интерферограмууд нь хэлбэр болон бүтцийн хувьд тохирч байна. Мөн туршилтаар бүртгэсэн интерферограмын спектрийн оргилууд нь 634.3нм болон 984.2нм дээр гарсан. Хэмжилтийн алдаа нь тус бүр 0,237% болон 0,428% байгаа нь угсарсан МИ систем дохиог алдаа багатай бүртгэж буйг батлах ба цаашид уг МИ системийг ФХ спектрометрүүд болон өөр конфигурациудад ашиглах боломжтойг харуулсан.

FTIR багажийн нил улаан туяаны үүсгүүрээр өөр өөр гэрлүүдийг ашиглаж туршилт хийсэн. Эхний тохиолдолд бидний өдөр тутмын амьдралдаа хэрэглэдэг улайсдаг ламп нь өөрөөсөө нил улаан туяаг цацаргадаг учир туршилтад 8В, 20Вm -ын лампыг нил улаан туяа нэвтрүүлэх фильтрийн хамт ашигласан (Зураг 53). Хоёр дугаарт 12В, 60Вm -ын галоген ламп болон нил улаан туяа нэвтрүүлэх фильтр ашиглан нил улаан туяаны интерферограмыг гарган авах туршилт хийсэн (Зураг 54).



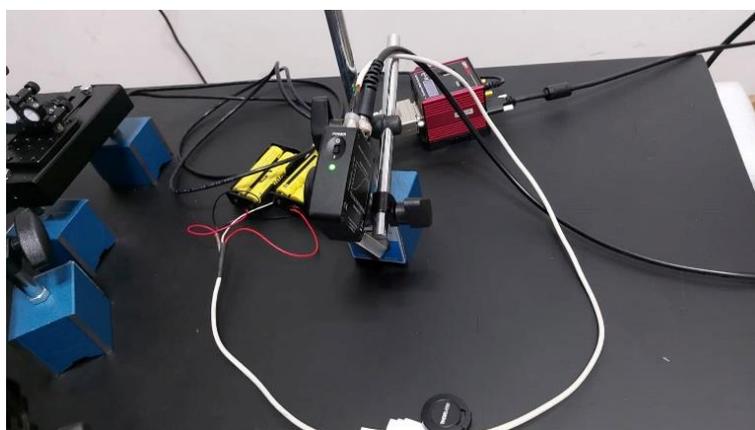
Зураг 53. Гэрлийн үүсгүүрийн эхний туршилт.



Зураг 54. Галоген ламп болон нил улаан туяаны шүүлтүүрийн зураг.

Хоёр тохиолдолд аль алинд филтрээс гарах гэрлийн эрчим нь хэт бага байсан учраас интерферограмын дохиог гарган авч чадаагүй.

Нил улаан туяаны мужийн PDA10D2 мэдрэгч нь $\sim 220V \rightarrow \pm 12V$ тэжээлийн хувиргагчаар тэжээгддэг ба тэжээлийн хувиргагчийн шуугиан нь гаралтын дохионд нөлөөлж байсан. Иймээс $\pm 12V$ Li-ion батарейн системийг угсарч мэдрэгчийг тэжээж туршсан.



Зураг 55. $\pm 12V$ Li-ion батарейн холболт

ДҮГНЭЛТ

Лазерын спектроскопын технологийн судалгаа суурь судалгааны төслийн хүрээнд Майкольсоны интерферометр дээр суурилсан Фурье хувиргалттай спектрометрийн төхөөрөмжийн оптик системийн тооцоог хийн, техникийн шийдлийг боловсруулан, загварыг угсарч туршсан.

Спектрометрийн төхөөрөмжийн гэрлийн үүсгүүрийн долгионы уртад нийцүүлэн хөдөлгөөнт замыг удирдах, детекторын гаралтын аналог дохиог хувирган компьютерт хүлээн авч, интерферограмыг дэлгэцэд дүрслэх, спектрийг байгуулах, өгөгдлийг хадгалах алгоритмыг боловсруулан хэрэглэгчийн програмын интерфэйсийг бүтээсэн.

Уг ажлаар Майкольсоны интерферометрээс гарч буй интерферограмын дохиог бүртгэх, хувиргахад шаардлагатай судалгаа, тооцоо болон туршилтын үр дүнгээр эрдэм шинжилгээний хурлуудад 3 илтгэл хэлэлцүүлэн, эрдэм шинжилгээний 3 өгүүлэл хэвлүүлж, лазерын (632.8нм, 0.8млВт болон 980нм, 0.3млВт) хоёр үүсгүүр бүхий Майкольсоны интерферометрт суурилсан спектрометрийн төхөөрөмж “Хос лазерын спектрометр RED2” -г зохион бүтээсэн.

Мөн төслийн хүрээнд лазерын туршилтын лабораторийг Физик, технологийн хүрээлэн дээр байгуулсан.

Энэхүү судалгааны ажил нь спектрометрийн дохиог бүртгэх, хувиргах ажлын тооцоо, техникийн шийдлийн эхлэл суурь болсон гэж үзэж байгаа бөгөөд цаашид уг судалгааг гүнзгийрүүлэн явуулах шаардлагатай байна.

HOM 3YŦ

1. D.A.Skoog, F.J.Holler, S.R.Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th edition, Boston, 2016.
2. A.Michelson, E.Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science, 34 (1887), 333–345.
3. R.J.Marks II, *Introduction to Shannon Sampling and Interpolation Theory*, Seattle, USA, 1991.
4. Herzberg.G., *Molecular Spectra and Molecular Structure II: Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules*, Krieger Publishing, 1991.
5. Nandi Sayantan, *Raman spectroscopy*". 10.13140/RG.2.2.24191.33445, 2021.
6. Laserna.J.J., *An introduction to raman spectroscopy: introduction and basic principles, Raman/Infrared Spectroscopy*, 2014.
7. Long, Derek Albert, *The raman effect: a unified treatment of the theory of raman scattering by molecules*, 2002.
8. McCreery, Richard. L., "Raman spectroscopy for chemical analysis", Vol. 225 (John Wiley & Sons), 2005.
9. Schlucker, Sebastian, Michael.D.S., Scott.W.H., Ira.W.L., *Raman microspectroscopy: a comparison of point, line, and wide-field imaging methodologies*, Analytical Chemistry 75 (16), 4312–4318, 2003.
10. Carey.P.R., "Biochemical Applications of Raman and Resonance Raman Spectroscopies", Academic Press, 1982.
11. P.R.Griffiths, J.A.Haseth, *Fourier Transform – Infrared Spectrometry*, 2nd edition, 2007.
12. B.C.Smith, *Fundamentals of Fourier transform infrared soectroscopy*, 2011.
13. A.Q.Vo, H.He, J.Zhang, S.Martin, R.Chen, M.I.A.Repka, *Application of FT-NIR Analysis for In-line and Real-Time Monitoring of Pharmaceutical Hot Melt Extrusion: a Technical Note*, AAPS PharmSciTech, 2018.
14. D.A.Skoog, D.M.West, F.J.Holler, *Analytical Chemistry: An Introduction (Saunders Golden Sunburst Series)*, 7th edition, 1999.
15. Y.Ozako, W.F.McClure, A.A.Christy, *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology*, 2006.
16. V.Saptari, *Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering*, Washington,

USA, 2004.

17. D.A.Skoog, J.J.Leary. *Principles of Instrumental Analysis, 4th Ed.*, 1992.
18. N.Jaggy, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, Handbook of Applied Solid State Spectroscopy, 2007.
19. M.Lucki, L.Bohac, R.Zeleny, *Fiber Optic and Free Space Michelson Interferometer - Principle and Practice*, Optical Sensors - New Developments and Practical Applications, 2014.
20. Berthomieu.C, Hienerwadel.Rainer, *Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy*, Photosynthesis research. 101. 157-70. 10.1007/s11120-009-9439-x, 2009.
21. Griffiths Peter, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, Science (New York, N.Y.), 222, 297-302, 10.1126/science.6623077, 1983.
22. P.C.D.Hobbs, *Building electro-optical systems, making it all work, 2nd edition*, New York, 2009.
23. C.S.Willett, *Introduction to Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms*, 1974.
24. M.Gilo, *Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube*, Optical Society of America, 1992.
25. T. Hasegawa, *Quantitative Infrared Spectroscopy for Understanding of a Condensed Matter*, 2017.
26. S.Li, Y.Zhang, M.Gao, *A Moving Mirror Driving System FT-IR Spectrometer for Atmospheric Analysis, Electronics and Signal Processing*, 2011.
27. ThorLab, *KBD101K-Cube Brushless DC Servo Driver* user guide.
28. ThorLab, *Kinesis LabVIEW Guide* user guide.
29. ThorLab, *Thorlabs APT Controllers Host-Controller Communications Protocol* user guide.
30. H.J.Haugan, S.Elhamri, F.Szmulowicz, B.Ullrich, G.J.Brown, W.C.Mitchel, *Study of residual background carriers in midinfrared InAs/GaSb superlattices for uncooled detector operation*, Applied Physics Letters. 92, 2008.
31. ThorLab, *PDA10A2 Si Amplified Fixed Gain Detector*, user guide.
32. ThorLab, *DET10A2 Si Biased Detector*, user guide.
33. ThorLab, *HNLS008R, HNLS008L Self Contained, Red HeNe Laser System*, user guide.
34. ThorLab, *SLS201L(/M), SLS202L(/M) Stabilized Tungsten Light Sources* user guide.
35. Analog Devices Inc, *The data conversion handbook*, 2005.
36. *AX309 Xilinx Spartan-6 Development Board* users guide.

37. R. Seeber, A. Ulrici, *Analog and digital worlds: Part 1. Signal sampling and Fourier Transform*, ChemTexts, 2016.
38. Richard E. Haskell, Darrin M. Hanna, *Introduction to Digital Design Using Digilent FPGA Boards-Block Diagram / VHDL Examples*, Oakland University, LBE Books Rochester Hills, 2009.
39. Nasser Kentarnavaz, “*Digital signal processing laboratory*”, LabVIEW-based FPGA implementation, 2010.
40. Harris.D.C., Bertolucci.M.D., *Symmetry and spectroscopy: an introduction to vibrational and electronic spectroscopy*, Oxford University Press, 1978.



FT-NIR СПЕКТРОМЕТРИЙН ТЕХНИКИЙН СОНГОЛТ, УРЬДЧИЛСАН ТООЦООЛОЛ

П.Батцэнгүүн^{*a}, С.Энхбат^a, Б.Зандан^a,
Б.Наранбат^a, О.Бөхцоож^b

^a ШУА, Физик, технологийн хүрээлэн,
Хэрэглээний физикийн салбар

^b Москвагийн Эрчим хүчний Их Сургууль

Удиртгал

Энэ өгүүлэлд нил улаан туяаны ойрын мужид ажиглаах Фурье хувиргалттай спектрометрийн өмнө судлагдсан байдалд үндэслэн, тухайн багажийг хамгийн өндөр үр ашигтай ажиллахад шаардлагатай тохирох элементүүдийг сонгож, шаардагдах тооцооллыг хийв. Мөн оптикийн элементүүдийг угсрах оптик замын судалгааг симуляцын програм дээр хийж, нил улаан туяаны эх үүсгүүрээс гарах гэрлийн 400мВт чадлыг детекторт ирэхдээ 1.219мВт хүртэл бууруулах тооцооллыг хийсэн ба спектрийн програм хангамжийн судалгааг гүйцэтгэв.

Түлхүүр үгс: Спектрометр, ойрын мужийн спектрометр, оптикийн тооцоо, Фурье хувиргалт, нэвтрүүлэлт

1 ОРШИЛ

Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометр нь хатуу, шингэн, хийн шингээлт, эсвэл нэвтрүүлэлтийн нил улаан туяаны спектрийг гаргадаг техник юм. Органик нэгдлүүдийн бүтцийн судалгаанд цөмийн соронзон резонанс, масс спектрометр, рентген кристаллографын багажуудыг ашигладаг. Эдгээрээс нил улаан туяаны спектрометр нь харьцангуй хямд өртөгтэй байдаг. Мөн нил улаан туяаны спектрометр нь дээжид ямар нэгэн сөрөг нөлөө үзүүлэхгүй тул үйлдвэрлэлтийн процессыг судлахад үр дүнтэй юм [1]. Нил улаан туяаны ойрын мужийн спектр нь цахилгаан соронзон долгионы 4000 - 12500см⁻¹ долгионы тоо бүхий мужид хамардаг. Ийм спектрын мужид NH, CH, SH-ийн устөрөгчийн молекулууд энерги шингээнээр найрлагад оролцсон атомуудын хэлбэлзлийн спектр өөрчлөгддөг. Мөн 9000–15000

* e-mail: battsenguun_p@mas.ac.mn

см^{-1} мужид хэд хэдэн электроны шилжилтүүд ажиглагддаг [2]. Тиймээс нил улаан туяаны ойрын мужийн спектрометрийн багажийг зохион бүтээхийн тулд урьдчилсан тооцооллыг гүйцэтгэсэн.

2 ТЕХНИКИЙН СОНГОЛТ БА ТООЦООЛОЛ

Интерферометр:

Полихроматик гэрлийн тархалтын спектрометр нь долгионы урт бүрд харгалзсан олон давталттай хэмжилт хийдэг бол Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометр нь интерферометрийг ашигласнаар нэг хэмжилтээр харгалзах бүх долгионы уртыг бүртгэдэг давуу талтай [3]. Интерферометрүүд нь хэрэгцээ шаардлагаасаа шалтгаалан өөр өөр байдаг ч ажиллах зарчим нь ижил [4]. Майкольсоны интерферометр нь энгийн бөгөөд ашиглахад хялбар тул нил улаан туяаны спектрометрт хэрэглэхэд тохиромжтой. Цацаргалтын долгионыг хоёр хэсэгт хуваан, хөдөлгөөнт толины тусламжтайгаар фазын зөрөө үүссэний дараа хоёр долгионыг буцаан нийлүүлдэг. Үүний үр дүнд интерференц үүсдэг [5]. Алдаагүй спектр гарган авахын тулд хөдөлгөөнт толь нь өндөр нарийвчлалтай, тогтмол хурдаар шилждэг байх ёстой [6]. Үүний шийдэл нь толийг суурьтай нь тогтмол хурдаар хөдөлдөг зам дээр байрлуулах юм. Уг зам нь тогтмол хурдтайгаас гадна, хэмжилтийн хугацааг бага байлгахын тулд өндөр хурдтай байх шаардлагатай.

Лазерын үүрэг:

Детекторт бүртгэж буй энерги нь v_m хурдаар хөдөлдөг толь болон хөдөлгөөнгүй толиноос ирж буй гэрлийн долгионуудын нийлбэр юм. Иймд эрчим E нь дараах байдлаар бичигдэнэ.

$$|E|^2 = 2A^2(1 + \cos 2\pi ft) \quad (1)$$

Үүнд f нь давтамж ба $2\pi/\lambda = 2\pi\tilde{\nu}$ гэдгийг тооцвол:

$$2\pi f = 2\pi\tilde{\nu} \cdot 2v_m \rightarrow f = 2\tilde{\nu}v_m \quad (2)$$

Энэхүү давтамжийг модуляцийн давтамж гэнэ [7]. $\tilde{\nu}$ нь нил улаан туяаны гэрлийн долгион тоо бөгөөд маш өргөн мужийг хамарна. Иймээс модуляцийн давтамжийг хялбарчлахын тулд өндөр нарийвчлалтай лазерыг “тогтмол”-оор ашигладаг [8]. Улаан He-Ne(Гелий-Неон) лазер нь үзэгдэх гэрлийн мужийн лазеруудаас хамгийн хямд бөгөөд хэрэглэхэд хялбар, нарийвчлал сайтай [9]. Тиймээс нил улаан туяаны спектрометрт энэ лазерыг ашиглах боломжтой. Агаарт He-Ne лазерын долгионы урт нь 632.816 нм учир долгион тоо нь:

$$\tilde{\nu} = 1/\lambda = 15,802.4\text{см}^{-1} \quad (3)$$

Хэрвээ хөдөлгөөнт толины хурд нь $v_m = 2.5313$ см/сек бол модуляцийн давтамж нь $f = 80$ кГц байх ба энэ нь анхны нил улаан туяаны эх

үүсгүүрийн маш өндөр давтамж 1×10^{10} Гц-ээс 125,000 дахин бага. Иймд тухайн хялбарчлал нь спектр гарган авах процессыг илүү хялбар болгоно.

Фотодетектор:

Нил улаан туяаны ойрын мужийн спектрометрт ихэвчлэн InGaAs (инди, галли, арсенид) эсвэл Ge-ийн фотодетекторыг хэрэглэдэг. Ge-ийн фотодетектортой харьцуулахад InGaAs фотодетектор нь хурдан хариу үйлчлэл үзүүлдэг бөгөөд мэдрэх, ялгах чадвар сайтай [10] тул InGaAs детекторыг сонгон, тооцооллуудыг хийсэн.

Спектрийн тооцоолол:

Математикийн хувьд интерферограмын тэгшитгэлийг дараах байдлаар бичнэ [11].

$$I(\delta) = \int_0^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\delta\nu) d\nu \quad (4)$$

Үүнд $B(\nu)$ нь эрчмийн долгион тоогоор бичсэн функц, δ нь хоёр долгионы фазын өөрчлөлт.

$$\delta = n\lambda; n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

δ – ийн функц $I(\delta)$ – ийн математик илэрхийллийг олсноор харгалзах спектрийг Фурье хувиргалтаар хувиргаж тодорхойлдог. Үүнээс спектрийн тэгшитгэл нь дараах байдлаар гарна:

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta \quad (6)$$

Практикт интерферограмын спектрийг гаргахын тулд Фурье хувиргалт нь дан ганцаараа хангалтгүй. Фазын зөрөөгүй хэсгээс хоёр тийш тэгш хэмтэй байх ёстой ч бодит интерферограмууд нь фазын алдаатай (х зайны комплекс функцээс шалтгаалж) байдаг учир тэгш хэмтэй байдаггүй. Тиймээс синус, косинус хэсгүүдийг агуулсан Хурдан Фурье Хувиргалт(FFT)-г хэрэглэдэг [12].

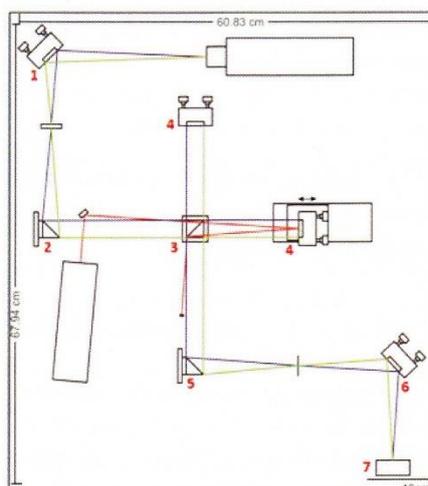
3 ЗАГВАРЧЛАЛ, ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

Оптик замын тооцоолол:

Хүнхэр толины фокусын зайг [ricktu288.github.io/ray-optics/](https://github.com/ricktu288/ray-optics) симуляцын програмын тусламжтай олсон /Зураг 1/. Энэ зайг олсноор спектрометрийн загварчлалын зургийг /Зураг 2/ гаргах боломжтой болсон.



Зураг 1. "Ray optic simulator" програм дээрх хүчлээр толины симуляци. Гэрлийг толь руу 45 хэм өнцгөөр, 8см зайнаас тусгахад ижил өнцгөөр 6.35см зайд фокусласан.



Зураг 2. Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийн ерөнхий загвар. Загвар дээрх элементүүд, хоорондын зайг бодит хэмжээгээр CorelDraw програм дээр зурсан.

Нил улаан туяаны үүсгүүрийн гаралтын оптик чадал нь 400мВт. InGaAs детекторын ханалтын чадал нь 1.2мВт учир лампын гаралтын 400мВт чадлыг детектор дээр очихдоо 1.2мВт болтол бууруулах шаардлагатай. Чадлын тооцооллыг хийхдээ толь болон долгион хуваагчийн нэвтрүүлэх, ойлгох хувийг тооцох хэрэгтэй. Гэрлийн “Урвуу квадрат хууль”-ийг ашиглан Зураг 2 дахь загварын детекторт ирэх чадлыг тооцоолсныг хүснэгтээр үзүүлбэл:

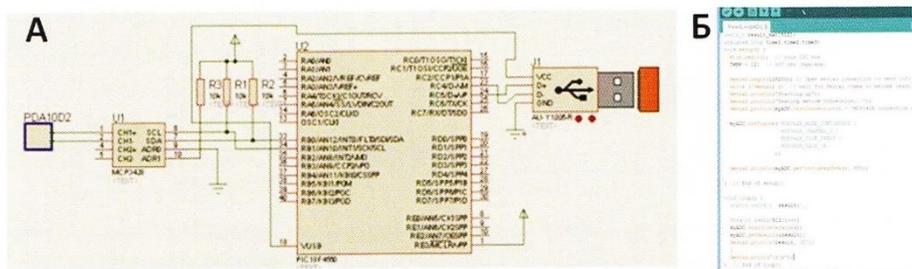
Хүснэгт 1. Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийн элементүүд дээрх нил улаан туяаны гэрлийн чадлын утгууд. (Хүснэгт дээрх элементүүдийг Зураг 2 дээрх улаанаар тэмдэглэсэн тооны дагуу дугаарласан)

№	Элементийн нэр	Гэрлийн үүсгүүрээс элемент хүртэлх зай (см)	Ойлтын хувь (%)	Элементэд тусах гэрлийн чадал (мВт)	Элементээс гарах гэрлийн чадал (мВт)
1.	Хүнхэр толь	34	99	41.87	41.45
2.	Парабол толь	59.57	99	13.5	13.37
3.	Долгион хуваагч	80.81	90	7.26	6.54
4.	Толь	96.11	99	4.62	4.57
5.	Долгион хуваагч	111.38	90	3.4	3.07
6.	Парабол толь	131.65	99	2.19	2.17
7.	Хүнхэр толь	160.89	99	1.45	1.44
8.	Детектор	174.89		1.219	

Хүснэгтэд харуулсан тооцооллын үр дүнгээс детекторт ирэх чадал 1.219мВт гарсан нь детекторын хангалтын чадал 1.2мВт-аас их гарсан ч энэ утга нь хамгийн абсолют нөхцөл дэх утга тул тохиромжтой болохыг тодорхойлов.

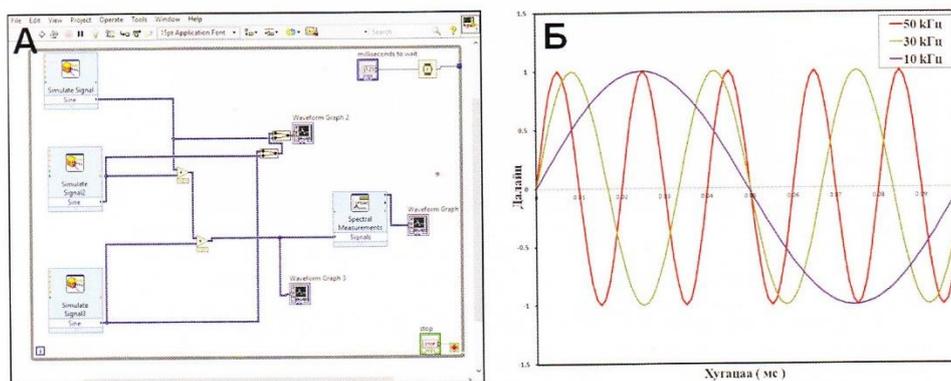
Хүлээн авсан дохиог боловсруулах туршилт:

Детектор нь 900-2600нм мужид мэдрэх чадвартай, 0-10В аналог гаралттай. Детекторын утгыг авахын тулд 0-10В оролттой аналог тоон хувиргагчийг сонгосон. Аналог тоон хувиргагчийн утгыг компьютерт оруулахын тулд 400кГц-н хурдтай, USB гаралтаар компьютерт холбогдох боломжтой PIC18F4550 микроконтроллерыг сонгон ашиглахаар схемийг зохиосон /Зураг 3А/. Зураг 3Б-д Микроконтроллерын мэдээллийг компьютерт оруулах програм хангамжийн эхний загварыг “Arduino uno” програм дээр хийснийг үзүүлэв.

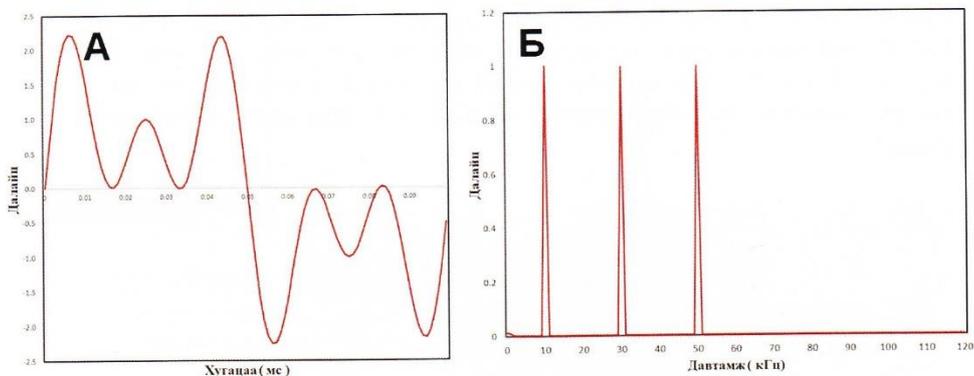


Зураг 3. А) Proteus програм дээр хийсэн детекторыг компьютертэй холбох удирдлагын схем Б) Arduino uno-д бичсэн микроконтроллерын програмын код

Аналог тоон хувиргагчаар хөрвүүлэгдэж компьютерт хүлээн авсан дохиог тухайн агшинд хүлээж аваад Фурье хувиргалт хийн спектрийг гарган авах програмаар LabVIEW програмыг сонгосон ба спектр гарган авах урьдчилсан симуляцыг өмнө тооцоолсон He-Ne лазерын давтамж 80кГц-ээс бага утгууд болох 10кГц, 30кГц, 50кГц давтамжууд дээр хийсэн.



Зураг 4. А) LabVIEW програм дээр өөр өөр давтамжтай долгионуудыг нэмж Фурье хувиргалт хийн спектр гарган авах схем Б) LabVIEW програмд оруулсан гурван өөр давтамжтай долгионуудын график



Зураг 5. А) LabVIEW програмд оруулсан гурван өөр давтамжтай долгионуудын нийлбэр график Б) Гурван өөр долгионы Фурье хувиргалт хийсний дараа гарсан спектр

Хүлээн авсан дохиог боловсруулах LabVIEW програм дээр хийсэн туршилтын хувьд 10кГц, 30кГц, 50кГц давтамжтай долгионуудыг нэмж Фурье хувиргалт хийн спектрийг гарган авахад давтамж бүр дэх анхны далайцын утга үр дүнгийн утгатай таарч байсан.

4 ДҮГНЭЛТ

Нил улаан туяаны ойрын мужид ажиллах Фурье хувиргалттай нил улаан туяаны спектрометрийг зохион бүтээхийн тулд техникийн сонголт, урьдчилсан тооцоог хийсэн. Детектор дээр ирэх чадлыг тооцоход ойролцоогоор 1.22мВт гарсан. Гэхдээ энэхүү тооцоолол нь бодит байдал дээр оптик толцнуудын ойлт, орчны нөлөөлөл гэх зэргээс шалтгаалан өөрчлөгдөж болно. Хүлээн авсан дохиог боловсруулах LabVIEW програм дээр хийсэн туршилтын хувьд 10кГц, 30кГц, 50кГц давтамжтай долгионуудыг нэмж Фурье хувиргалт хийн спектрийг гарган авахад давтамж бүр дэх анхны далайцын утга үр дүнгийн утгатай таарч байсан. Програмын хэл ашиглахгүйгээр LabVIEW програм дээр дохио боловсруулалтыг хийх боломжтой болохыг тогтоов.

Цаашид элементүүд болон тэдгээрийн байрлалыг өөрчлөх өөр хүчин зүйл байхгүй тул Зураг 2 дахь загварыг эцэс болгон урьдчилсан судалгаануудад тулгуурлан спектрометрээ угсрахад бэлэн болсон.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү ажлыг суурь судалгааны ШУСС_2018/70 төслийн хүрээнд гүйцэтгэв.

Ашигласан ном

- [1] A. Q. Vo, H. He, J. Zhang, S. Martin, R. Chen, M.I A. Repka, *Application of FT-NIR Analysis for In-line and Real-Time Monitoring of Pharmaceutical Hot Melt Extrusion: a Technical Note*, AAPS PharmSciTech, 2018
- [2] Y. Ozako, W. F. McClure, A. A. Christy, *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology*, 2006
- [3] D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th edition, 2016
- [4] P.R.Griffiths, J.A.Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, 2nd edition, 2007
- [5] A. A. Michelson, E. W. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science, 1887
- [6] S. Li, Y. Zhang, M. Gao, L. Xu, X. Wei, J. J. Tong, L. Jin, S. Cheng, *A Moving Mirror Driving System FT-IR Spectrometer for Atmospheric Analysis*, Electronics and Signal Processing, 2011
- [7] T. Hasegawa, *Quantitative Infrared Spectroscopy for Understanding of a Condensed Matter*, 2017
- [8] R. Seeber, A. Ulrici, *Analog and digital worlds: Part 1. Signal sampling and Fourier Transform*, ChemTexts, 2016
- [9] C. S. Willett, *Introduction to Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms*, 1974

- [10] T. P. Pearsall, M. A. Pollack, *Photodiodes for Optical Fiber Communication*. SEMICONDUCTORS AND SEMIMETALS, 1985
- [11] W.D.Perkins, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, Topics in Chemical instrumentation, 1986
- [12] V. Saptari, *Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering*, 2004

TECHNICAL OPTIONS AND PRELIMINARY CALCULATION OF FT-NIR SPECTROMETER

Battsenguun P.^{*a}, Enkhbat S.^a, Zandan B.^a,
Naranbat B.^a, Bukhtsooj O.^b

^a*Department of Applied Physics,
Institute of Physics and Technology, MAS*

^b*Moscow Power Engineering Institute (National Research University)*

Abstract

In this paper, for assembling new most efficient fourier transform near infrared spectrometer based on previously published works, the components are considered. After that optical calculation for elements positions implemented by simulation program, calculation of decreasing 400mW optical power of infrared source to 1.2mW on detector and made software of spectrum of fourier transform infrared spectrometer.

Keywords: *Near IR spectrometer, optical calculation, fourier transformation, transmission*

*e-mail: battsenguun_p@mas.ac.mn

THE STUDY OF MICHELSON INTERFEROMETER USED FOR FT-NIR SPECTROMETER AND SIGNAL DETECTION

Battsenguun P., Enkhbat S., Zandan B., Naranbat B., Purev-Ochir A.

Mongolia, Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Science

battsenguun_p@mas.ac.mn

Хураангуй

Энэ өгүүлэлд FTNIR спектрометрийг угсрахын тулд Майкольсоны интерферометрийн үйл ажиллагааг судлахыг зорьсон. Оптик тооцооллыг симуляцийн програмаар хийж гүйцэтгэсэн ба Майкольсоны интерферометрийн схемийн зураглалыг тухайн симуляцид үндэслэн гаргасан. Системд ашиглагдах хөдөлгөөнт толины хөдөлгөгч замын туршилтыг хийсэн. Долгион хуваагчийн алдааг шалгах судалгаа хийсэн. Интерферограмын дохионы симуляцыг MATLAB програм дээр хийж гүйцэтгэсэн. Системийг угсарсны дараа детекторт ирж буй дохиог осциллоскопоор хүлээн авсан ба интерферограмын дохионы симуляцийн үр дүн болон туршилтын үр дүн хоорондоо тохирсон.

Keyword: Michelson interferometer, interferogram, He-Ne laser, FT-NIR spectrometer

Introduction

In many large research laboratories, however, the structure of complex molecules is now usually found by a combination of techniques, including two-dimensional nuclear magnetic resonance (NMR), x-ray diffraction, and mass spectrometry, with infrared (IR) spectrometry playing a less dominant, although still important role and more cheap [1]. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) is a technique used to obtain an infrared spectrum of absorption or emission of a solid, liquid or gas [2]. FTIR spectrometer is contained in all modern analytical laboratories [3] including Mongolia. All equipment used our medical and analytical laboratories are imported. Accordingly, introducing and developing products of spectrometer research will have a positive effect on economy. Infrared is usually divided into 3 spectral regions: near, mid and far-infrared [4]. In our country, mid-infrared spectrometer

is widely used than near-infrared spectrometer. With the result that FT-NIR is studied in this paper. The average near infrared (NIR) reflectance of the coating over wavelength range of 780 - 2600 nm and wavenumber range of 4000 – 12500 cm^{-1} [5]. The NIR absorption of polymers, especially in the region from 4000 to 9000 cm^{-1} , originates from the overtones of OH, NH, CH, and SH stretching vibrations as well as from stretching-bending combinations involving these groups. The overtones and combination tones are most often affected by hydrogen bond formation, certain aspects of which can be monitored to advantage in the near infrared. In addition, a few electronic transitions may appear in the upper range of the near infrared, close to the visible, especially in the range of 9000 cm^{-1} to 15,000 cm^{-1} [6].

The major difference between FTIR spectrometer and a dispersive IR spectrometer is the Michelson interferometer (MI), which is the core of

FTIR spectrometers [7]. The FTIR uses the same basic configuration of mirrors and beam splitter as a MI, but one of the mirrors can be moved rapidly back and forth [8]. This suggests that operating MI with movable mirror correctly can be the first step of building FTNIR spectrometer efficiently.

1 Research and Materials

The MI also provides easier calibration and better control of mechanical stability [9]. In MI, adapted for FTIR, light from the polychromatic infrared source is collimated and directed to a beam splitter. Ideally 50% of the light is refracted towards the fixed mirror and 50% is transmitted towards the moving mirror. Light is reflected from the two mirrors back to the beam splitter and some fraction of the original light passes into the detector [10]. Figure 1 shows real schematic diagram drawn on CorelDraw expanded MI with some optical mirrors and He-Ne laser.



Figure 1. Schematic diagram of a MI, configured for FTNIR 1) He-Ne laser 2) Concave mirror 3) Diaphragm 4) Parabolic mirror 5) Beam splitter 6) Fixed mirror 7) Movable mirror 8) Parabolic mirror

For plotting interferogram to computer, some parameters such as distance and velocity of moving mirror, wavelength of laser and analog-to-digital converter

(ADC) rate of signal must be adaptable for each other. ADC is a system that converts an analog signal into a digital signal [11]. If a signal has finite energy, the minimum sampling rate is equal to two samples per period of the highest frequency component of the signal [12]

2 Simulation and Experiments

2.1. Concave mirror focal length is determined by online simulator ricktu288.github.io/ray-optics/ in figure 2. It showed that distance between laser source and concave mirror must be 31 cm and distance between concave mirror and diaphragm must be 24 cm.



Figure 2. Simulation of concave mirror

2.2. Based on general schematic of MI and optical simulation of concave mirror in Figure 2., system of MI with laser is constructed. Figure 3 shows elements, mounted on strong magnetic and

		Percent Error (%)	Percent Error (%)	Percent Error (%)
On beam splitter	6			
On movable mirror	3.2	6.67	3.1	3.33
On fixed mirror	3.3	10	3.2	6.67

assembled on 8 cm thick steel table which reduces signal noise.

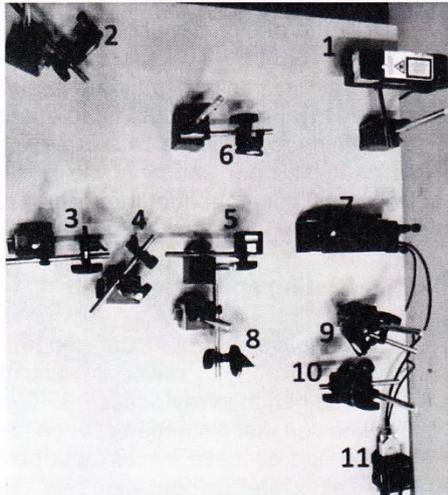


Figure 3. System of MI with laser 1. He-Ne laser 2. Concave mirror 3. Parabolic mirror 4. Diaphragm 5. Beam splitter 6. Fixed mirror 7. Movable mirror 8. Parabolic mirror 9. Concave mirror 10. Detector 11. Controller of translation stage

2.3. Mirror driving is the most important part in a FT-IR spectrometer. To get the correct spectrum, the moving mirror must be driven with high precision [13]. For sampling two samples per period of 632.8 nm wavelength laser with 12 bit 240 sample per second ADC, at least movable mirror must travel with 76 $\mu\text{m/s}$ velocity. Thus, linear translation stage is

According to table 2, error of transmission and operation of beam splitter is under 10 % and it used for experiment.

2.5. The main criterion of MI operation is interferogram signal. Simulation of interferogram (He-Ne laser 632.8 nm) is examined with MATLAB during 0.1 mm/s and 0.01 mm/s velocity of movable mirror shown in figure 4, 5 and 6. In this simulation wavelength of laser and velocity of translation stage of mirror is given with constant value. In the code of MATLAB, signal from moving mirror (SMM) and signal from fixed mirror

examined on three different velocities and error of examine is calculated on Table 1.

Table 1. Specified and measured time of crossing 1 mm distance with given velocity

Distance (mm)	Velocity (mm/s)	Expected time (s)	Measured time (s)	Percent error (%)
1	0.001	1000	1343	34.3
1	0.01	100	103	3
1	0.1	10	10	0

It shows that moving translation stage with 0.001 mm/s velocity is not accessible. However as mentioned earlier movable mirror must travel around 0.076 mm/s velocity.

2.4. Different types of beam splitters exist, the most important ones are plate and cube beam splitters. Many beam splitters have the form of a cube, where the beam separation occurs at an interface within the cube. Such a cube is often made of two triangular glass prisms which are glued together with some transparent resin or cement [14]. The beam splitter, two prism of borosilicate glass are bound with cement and AR coated, is examined.

Table 2. Amplitude measurement

(SFM), have same wavelength but different phase, are added for generating effect of MI.

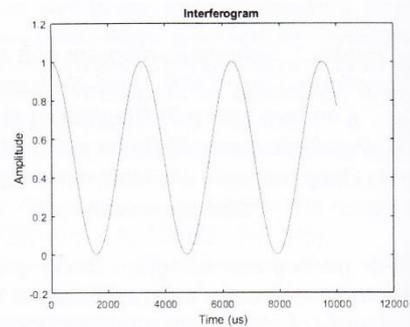


Figure 4. Interferogram simulation when movable mirror velocity was 0.1 mm/s

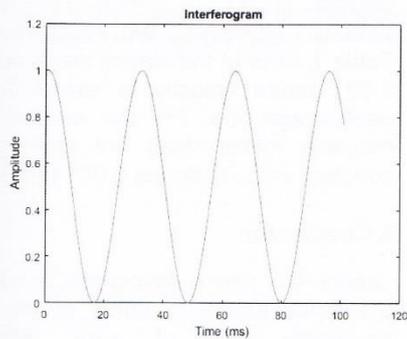


Figure 5. Interferogram simulation when movable mirror velocity was 0.01 mm/s

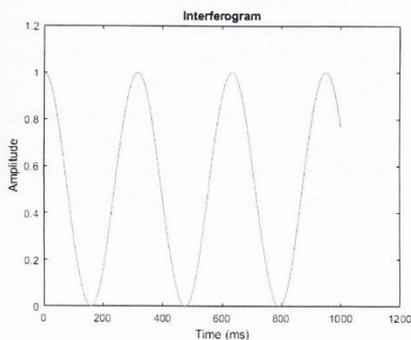


Figure 6. Interferogram simulation when movable mirror velocity was 0.001 mm/s

As a result, when 0.1 mm/s velocity, time period of interferogram was 3.17 ms. While 0.01 mm/s velocity, time period was 31.7 ms. When 0.001 mm/s velocity, time period was 317 ms.

Thenceforth, detector is planted on system shown in figure 3 and experiment of detecting real-time signal of MI is made according to simulation on figure 4, 5 and 6. Detector connected through the oscilloscope with BNC – BNC cable. Interferogram signal, came from MI, is spotted in detector and plotted in oscilloscope.

In term of detecting and converting signal to computer, LabVIEW interface which receives digital interferogram into

computer is written. Block diagram of interface shown in Figure 10.

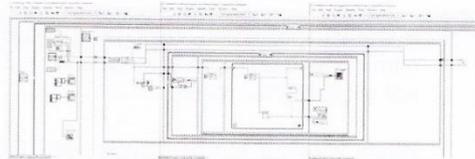


Figure 10. Block diagram of Labview interface which receives digital signal from ADC

3 Result

Displayed oscilloscope image is shown on figure 7, 8 and 9.

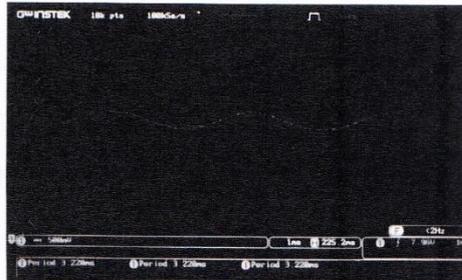


Figure 7. Interferogram signal when movable mirror velocity was 0.1 mm/s

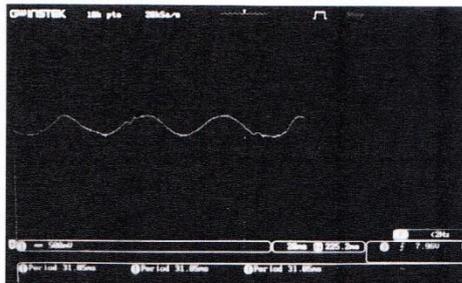


Figure 8. Interferogram signal when movable mirror velocity was 0.01 mm/s

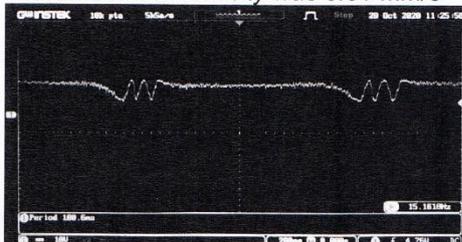


Figure 9. Interferogram signal when movable mirror velocity was 0.001 mm/s

It shows that when velocity of moving mirror was 0.001 mm/s, measurement is not available for result.

When moving mirror travels with 0.01 mm/s velocity, received signal from ADC is shown in figure 11.

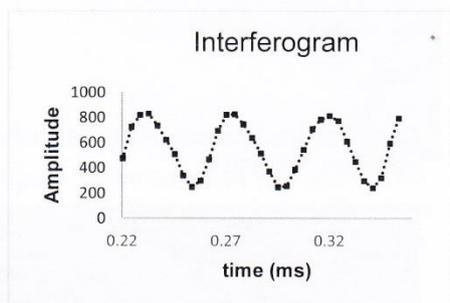


Figure 11. received signal from ADC

Due to ADC rate used on the experiment, it can't measure signal of interferogram during 0.1 mm/s.

When 0.001 mm/s velocity, time period was 317 ms. And as outcome of oscilloscope, period of interferogram measured was 3.22 ms during 0.1 mm/s velocity, 31.05 ms during 0.01 mm/s velocity. However, as measured in Table 1. error of translation stage during 0.001 mm/s velocity is examined in oscilloscope too. For the reason that movable mirror does not move with constant velocity during 0.001 mm/s.

4 Conclusion

Outcome of mirror driving test exhibited 0.1 mm/s and 0.01 mm/s which was practically free of error. Moving translation stage with 0.001 mm/s velocity, interferogram is interrupted due to unsmooth movement of moving mirror. Due to ADC rate used on the experiment, it can't measure signal of interferogram during 0.1 mm/s. Simulation and measured signal on oscilloscope of interferogram were nearly similar with percent error 1.6% (0.1 mm/s) and 2% (0.01 mm/s).

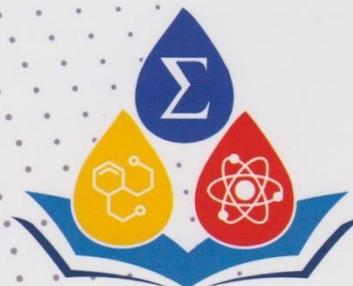
Reference

- [1] P.R.Griffiths, J.A.Haseth, Fourier Transform – Infrared Spectrometry, 2nd edition, 2007
- [2] B.C.Smith, Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy, 2011
- [3] A. Q. Vo, H. He, J. Zhang, S. Martin, R. Chen, M.I.A. Repka, "Application of FT-NIR Analysis for In-line and Real-Time Monitoring of Pharmaceutical Hot Melt Extrusion: a Technical Note", AAPS PharmSciTech, 2018
- [4] D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch, Principles of Instrumental Analysis, 7th edition, 2016
- [5] D.A.Skoog, D.M.West, F.J.Holler, Analytical Chemistry: An Introduction (Saunders Golden Sunburst Series), 7th edition, 1999
- [6] Y.Ozako, W.F.McClure, A.A.Christy, Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology, 2006
- [7] D.A.Skoog, J.J.Leary. "Principles of Instrumental Analysis, 4th Ed.", 1992
- [8] N.Jaggy, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy", Handbook of Applied Solid State Spectroscopy, 2007
- [9] M.Lucki, L.Bohac, R.Zeleny, "Fiber Optic and Free Space Michelson Interferometer – Principle and Practice", Optical Sensors - New Developments and Practical Applications, 2014
- [10] A.A.Michelson, E.W.Morley, On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, American Journal of Science, 1887

-
- [11] Analog Devices Inc, "The data conversion handbook", 2005
 - [12] R.J.Marks II, Introduction to Shannon Sampling and Interpolation Theory, 1991
 - [13] S.Li, Y.Zhang, M.Gao, A Moving Mirror Driving System FT-IR Spectrometer for Atmospheric Analysis, Electronics and Signal Processing, 2011
 - [14] M. Gilo, "Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube", Optical Society of America, 1992



MONGOLIAN UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY
SCHOOL OF APPLIED SCIENCES



ICASE 2021

INTERNATIONAL
CONFERENCE ON
APPLIED SCIENCES AND
ENGINEERING 2021
(ICASE 2021)

PROCEEDINGS

Volume 002, 2021

Ulaanbaatar
Mongolia

TECHNICAL SOLUTION AND SIGNAL INTERFACE OF DETECTING INTERFEROGRAM

BATTSENGUUN P.†, ENKHBAT S., ZANDAN B., NARANBAT B., AND PUREV-OCHIR A.

LABORATORY OF ELECTRONICS AND PHOTONICS, INSTITUTE OF PHYSICS AND
TECHNOLOGY, MONGOLIAN ACADEMY OF SCIENCES, MONGOLIA

E-mail address: tbattsenguun_p@mas.ac.mn

ABSTRACT. In this paper, technical investigation and experimental results of detecting interferogram signal which is most important part of Michelson interferometer are demonstrated. Simulation of interferogram is implemented in MATLAB. Optical setup of Michelson interferometer is assembled with two beam splitters for experiment. Two different lasers which have dissimilar wavelengths are used in this investigation. Firstly, laser interferograms are detected individually. Secondly, light of lasers is combined by beam splitter and spotted on detector. Spectrum of lasers is plotted by LabVIEW interface. The results of simulation and experiment were matched.

1. INTRODUCTION

The rapid development of laser spectroscopy technology and modularity of devices allow to study this field by transferring the technology to our country. Michelson interferometer (MI) configuration is used in precise optical measurement and number of various applications [1]. Thus in this work, operation of MI is investigated technically.

The operation depends on many experimental factors as well as instrumental configurations, including the averaging and integrating time, the radiation power that falls on the detector, the spectral range observed, the diameter of the beam entering the interferometer, etc., as is demonstrated throughout many research. Thus, detecting valid interferogram signal from MI is crucial. For plotting signal with acceptable resolution, system must have highly stabilized elements and low environmental noise. Also part that converting signal through computer and software coding must be excellent [2]. Designing and constructing optical instruments are without a doubt one of the most interdisciplinary activities in engineering. However interdisciplinary quality means that instrument building is challenging, it has an effective outcome. The very broad range of technologies involved means that at least one basic subsystem lies outside the researcher's expertise, presenting a crisis of major schedule slippage or outright failure, which may not become apparent until very late in the project [3].

Key words: Michelson interferometer, interferogram, laser interferogram

† Corresponding author.

2. RESEARCH AND MATERIALS

2.1. MI is an optical interference device and common configuration for optical interferometry. The collimated beam of laser light is split into two beams by beam splitter. Ideally 50% of the light is refracted towards the fixed mirror and 50% is transmitted towards the moving mirror. If one of the reflectors is translated at a constant velocity parallel to its optic axis, the resulting reflected and transmitted waves are then redirected by ordinary mirrors to a detector when they superimpose to create fringes. This is known as interference by division of amplitude [4]. The interference signal from MI is measured by photodetector.

2.2 Through detector, junction photodiode is an intrinsic device that behaves similarly to an ordinary signal diode, but it generates a photocurrent when light is absorbed in the depleted region of the junction semiconductor [5]. A linear stage or a linear translation stage, which can be used with movable mirror, is a positioning device used to achieve high precision along one single axis of motion. Some parameters such as distance and velocity of moving mirror, wavelength of laser and analog-to-digital converter (ADC) rate of signal must be adaptable for each other for plotting interferogram to computer. ADC is a device that converts an analog signal into a digital signal [6].

3. SIMULATION AND EXPERIMENT

Optical setup of Michelson interferometer (shown in Fig 1) is assembled with common interferometer design with additional one beam splitter. XILINX SPARTAN-6 developer (ALINX A309) FPGA board, includes ADC, is used for converting analog signal.

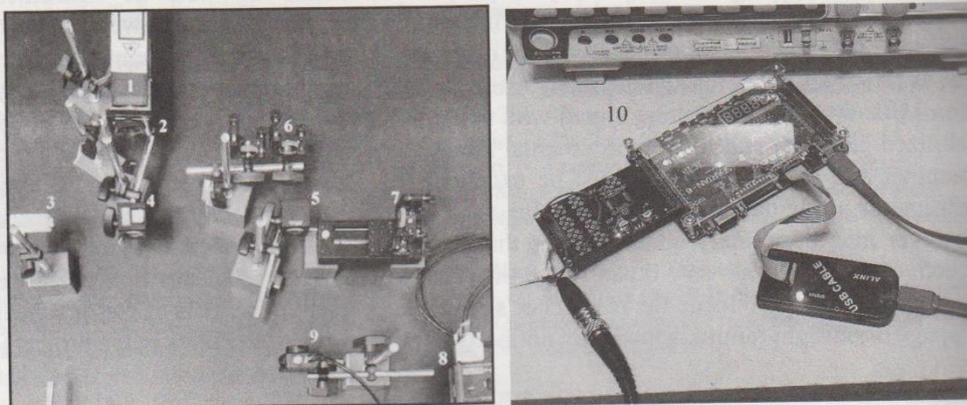


FIGURE 1. Michelson interferometer system 1) He-Ne laser 2) diaphragm 3) IR laser 4,5) beam splitter 6) fixed mirror 7) moving mirror 8) linear station controller 9) InGaAs detector 10) FPGA board with ADC

Before experiment, simulation of He-Ne laser (632.8nm) and IR laser (980nm) interferogram is created on MATLAB. For running simulation, all given data on MATLAB were based on real values of laser wavelength, beam splitter and linear translation stage velocity. After that, signal is detected from the assembled MI system. Each laser signal and combined signal are detected separately. An interface, which receives signal on computer, is implemented on LabVIEW for detecting and converting signal to computer. It is possible to manipulating controller of linear translation stage, transforming signal into spectrum and saving all data on excel sheet on the implemented LabVIEW interface.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Result of simulation and experiment results of combined signals are shown in Fig 2, when velocity of moving mirror was 0.1 mm/s. According to previous research [7], mirror velocity must be upper than 0.01 mm/s and 0.1 mm/s was optimal value related to ADC rate.

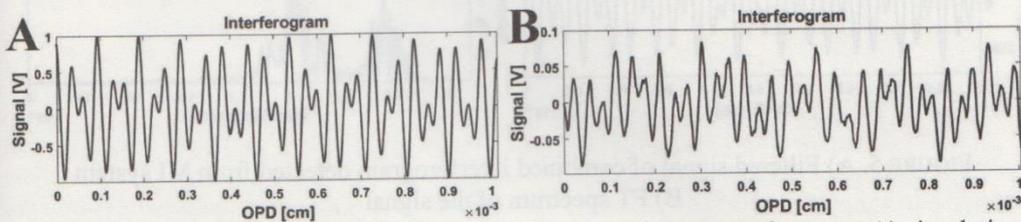


FIGURE 2. Simulation and experimental signal of combined interferogram A) simulation result of combined interferogram B) experimental result of combined interferogram

As shown in Fig 2, signal from assembled system includes too much noise from the environment. For investigating the noise, FT spectrum of the signal shows strong peak near at 50Hz. Therefore, digital filter is used on MATLAB for filtering the signal noise around 50Hz. Filtered signals and considered FFT spectrum are shown in Fig 3, 4, 5.

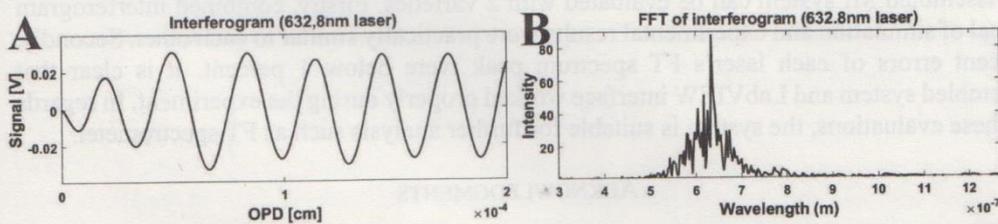


FIGURE 3. A) Filtered interferogram signal of He-Ne laser detected from MI system B) FT spectrum of the signal

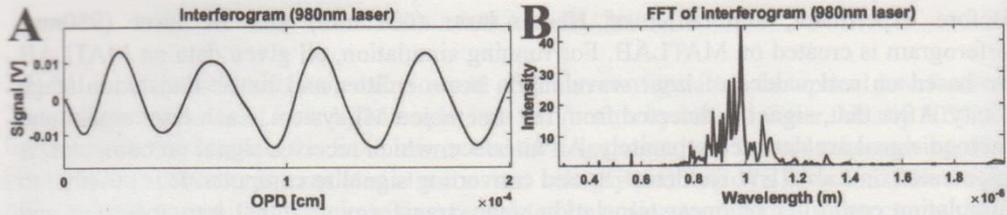


FIGURE 4. A) Filtered interferogram signal of 980nm laser detected from MI system
B) FT spectrum of the signal

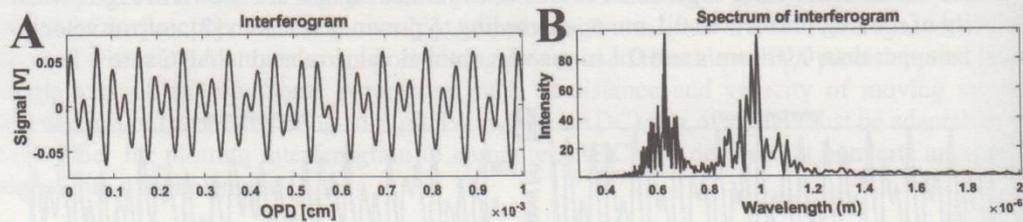


FIGURE 5. A) Filtered signal of combined interferogram detected from MI system
B) FT spectrum of the signal

As shown in Fig 3, peak of 632.8nm laser demonstrated at 634.3nm. Ideally, it must show peak at 632.8nm. Thus percentage error was 0.237 % in this measurement. 980 nm laser showed a peak at 984.2 nm. Percent error was 0.428%. In Fig 5, Result of filtered signal of real time measurement was practically same as simulation result.

3. CONCLUSION

Assembled MI system can be evaluated with 2 varieties. Firstly, combined interferogram signal of simulation and experimental results were practically similar to each other. Secondly, percent errors of each laser's FT spectrum peak were below 1 percent. It is clear that assembled system and LabVIEW interface worked properly during the experiment. In regards of these evaluations, the system is suitable for further analysis such as FT spectrometer.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by project named "Investigation of Laser Spectroscopy Technology". We thank our colleagues from Electronics and Photonics Laboratory, Institute of Physics and Technology who provided insight and expertise that greatly assisted the research.

REFERENCES

- [1] D. A. Skoog, F. J. Holler, S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th edition, Boston, 2016.
- [2] V. Saptari, *Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering*, Washington, USA, 2004.
- [3] P. C. D. Hobbs, *Building electro-optical systems, making it all work*, 2nd edition, New York, 2009.
- [4] A. Michelson, E. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, American Journal of Science, **34** (1887), 333–345.
- [5] H. J. Haugan, S. Elhamri, F. Szmulowicz, B. Ullrich, G. J. Brown, W. C. Mitchel, *Study of residual background carriers in midinfrared InAs/GaSb superlattices for uncooled detector operation*, Applied Physics Letters. **92** (2008).
- [6] R.J.Marks II, *Introduction to Shannon Sampling and Interpolation Theory*, Seattle, USA, 1991
- [7] P. Battseguun, S. Enkhbat, B. Zandan, B. Naranbat, A. Purev-Ochir, *The study of Michelson interferometer used for FT-NIR spectrometer and signal detection*, Khureltogoot conference – Nature Science, (2020), 75-81.

ХАВСРАЛТ 2

АХ309 ПЛИС-ийн програмын код

////////UNDSÉN CODE-ATX-аар өгөгдлийг хувиргах, цуглуулах код////////

```
`timescale 1ns / 1p`timescale 1ns / 1ps
```

```
module ad7606
```

```
(
```

```
    input        clk,  
    input        a_adc_start,  
    output       a_adc_work,  
    output       os0,  
    output       os1,  
    output       os2,  
    output       convist,  
    output       reset,  
    output       cs,  
    output       rd,  
    input        busy,  
    input        firstdata,  
    input        data15,  
    input        data14,  
    input        data13,  
    input        data12,  
    input        data11,  
    input        data10,  
    input        data9,  
    input        data8,  
    input        data7,  
    input        data6,  
    input        data5,  
    input        data4,  
    input        data3,  
    input        data2,  
    input        data1,  
    input        data0,  
    output       led1,  
    output       led2,  
    //output     led3,  
    //output     led4,  
    output[7:0] resultH,  
    output[7:0] resultL
```

```
);
```

```
parameter a_IDLE = 3'b0000;
```

```
parameter a_RESET = 3'b0001;
```

```
parameter a_START_CON = 3'b0010;
```

```
parameter a_CON_WAIT = 3'b0011;
```

```

parameter a_CON_WAIT1 = 3'b0100;
parameter a_CON_CS      = 3'b0101;
parameter a_READ_DATA  = 3'b0110;
parameter a_CLEAN      = 3'b0111;
parameter RESET_TIME   = 5;
parameter START_TIME   = 200;
parameter WAIT_TIME    = 5;
parameter CS_TIME      = 10;
parameter RD_TIME      = 10;

reg [3:0]    a_SM_Main      = 0;
reg [31:0]  a_Clock_Count  = 0;
reg [7:0]    datahigh;
reg [7:0]    datalow;
reg         a_led1          = 1'b0;
reg         a_led2          = 1'b0;
reg         a_led3          = 1'b0;
reg         a_led4          = 1'b0;
reg         a_os0           = 1'b0;
reg         a_os1           = 1'b0;
reg         a_os2           = 1'b0;
reg         a_cs            = 1'b1;
reg         a_rd            = 1'b1;
reg         a_reset         = 1'b0;
reg         a_convist       = 1'b1;
reg         r_adc_work      = 1'b0;

assign      led1            = a_led1;
assign      led2            = a_led2;
//assign    led3            = a_led3;
//assign    led4            = a_led4;
assign      os0             = a_os0;
assign      os1             = a_os1;
assign      os2             = a_os2;
assign      rd              = a_rd;
assign      cs              = a_cs;
assign      reset           = a_reset;
assign      convist         = a_convist;
assign      a_adc_work      = r_adc_work;
assign      resultH         = datahigh;
assign      resultL         = datalow;

```

```

always @(posedge clk)
begin
a_led2=r_adc_work;
case (a_SM_Main)

```

```

a_IDLE :
    begin
        a_cs = 1'b1;
        a_rd = 1'b1;
        a_reset = 1'b0;
        a_convist = 1'b1;
        if (a_adc_start == 1'b1)
            begin
                r_adc_work = 1'b0;
                a_reset = 1'b1;
                a_SM_Main <= a_RESET;
            end
        else
            a_SM_Main <= a_IDLE;
        end

a_RESET:
    begin
        if (a_Clock_Count < RESET_TIME)
            begin
                a_Clock_Count <= a_Clock_Count + 1;
                a_SM_Main <= a_RESET;
            end
        else
            begin
                a_reset = 1'b0;
                a_convist = 1'b0;
                a_Clock_Count <= 0;
                a_SM_Main <= a_START_CON;
            end
        end

a_START_CON :
    begin
        if (a_Clock_Count < START_TIME)
            begin
                a_Clock_Count <= a_Clock_Count + 1;
                a_SM_Main <= a_START_CON;
            end
        else
            begin
                a_convist = 1'b1;
                a_Clock_Count <= 0;
                a_SM_Main <= a_CON_WAIT;
            end
        end
    end

```

```

a_CON_WAIT :
begin
if (a_Clock_Count < WAIT_TIME)
begin
a_Clock_Count <= a_Clock_Count + 1;
a_SM_Main <= a_CON_WAIT;
end
else
begin
a_Clock_Count <= 0;
a_SM_Main <= a_CON_WAIT1;
end
end

```

```

a_CON_WAIT1 :
begin
if(busy==0)
begin
a_Clock_Count <= 0;
a_cs = 1'b0;
a_SM_Main <= a_CON_CS;
end
else
a_SM_Main <= a_CON_WAIT1;
end

```

```

a_CON_CS:
begin
a_led1=1'b1;
if (a_Clock_Count < CS_TIME)
begin
a_Clock_Count <= a_Clock_Count + 1;
a_SM_Main <= a_CON_CS;
end
else
begin
a_Clock_Count <= 0;
a_rd = 1'b0;
a_SM_Main <= a_READ_DATA;
end
end

```

```

a_READ_DATA :
begin
if (a_Clock_Count < RD_TIME)
begin

```

```

        a_Clock_Count <= a_Clock_Count + 1;
        a_SM_Main    <= a_READ_DATA;
    end
else
    begin
        a_Clock_Count <= 0;
        datahigh[7] <= data15;
        datahigh[6] <= data14;
        datahigh[5] <= data13;
        datahigh[4] <= data12;
        datahigh[3] <= data11;
        datahigh[2] <= data10;
        datahigh[1] <= data9;
        datahigh[0] <= data8;
        datalow[7] <= data7;
        datalow[6] <= data6;
        datalow[5] <= data5;
        datalow[4] <= data4;
        datalow[3] <= data3;
        datalow[2] <= data2;
        datalow[1] <= data1;
        datalow[0] <= data0;
        r_adc_work = 1'b1;
        a_rd = 1'b1;
        a_cs = 1'b1;
        a_SM_Main    <= a_CLEAN;
    end
end

a_CLEAN :
    begin
        a_cs = 1'b1;
        a_rd = 1'b1;
        a_reset = 1'b0;
        a_convist = 1'b1;
        a_SM_Main    <= a_IDLE;
    end
default :
    a_SM_Main <= a_IDLE;
endcase
end
endmodule

```

/////////////////////////////////SERIAL TRANSMISSION Цуваа дамжууллын код/////////////////////////////////

```
`timescale 1ns / 1ps
module uart_tx #(parameter CLKS_PER_BIT=50)
(
    Input        i_Clock,
    Input        i_Tx_DV,
    input [7:0]   data,
    output       o_Tx_Active,
    output       tx,
    //output     led,
    //output     led2,
    output       led4,
    output       o_Tx_Done
);

parameter s_IDLE           = 3'b000;
parameter s_TX_START_BIT  = 3'b001;
parameter s_TX_DATA_BITS  = 3'b010;
parameter s_TX_STOP_BIT   = 3'b011;
parameter s_CLEANUP       = 3'b100;

reg [2:0]    r_SM_Main      = 0;
reg [31:0]   r_Clock_Count  = 0;
reg [2:0]    r_Bit_Index    = 0;
reg [7:0]    r_Tx_Data      = 0;
reg          r_Tx_Done      = 0;
reg          r_Tx_Active    = 0;
reg          r_tx           = 1'b1;
reg          o_led          = 1'b0;
reg [31:0]   count         = 0;

assign       o_Tx_Active    = r_Tx_Active;
assign       o_Tx_Done     = r_Tx_Done;
assign       tx            = r_tx;
//assign     led           = o_led;
//assign     led2          = r_Tx_Active;
Assign      led4           = r_tx;

always @(posedge i_Clock)
begin
    if(count == 10000000)
    begin
        count <= 0;
        o_led = ~o_led;
    end
end
else
```

```

        count <= count + 1;
    case (r_SM_Main)
        s_IDLE :
            begin
                r_tx <= 1'b1;           // Drive Line High for Idle
                r_Tx_Done <= 1'b0;
                r_Clock_Count <= 0;
                r_Bit_Index <= 0;
                if (i_Tx_DV == 1'b1)
                    begin
                        r_Tx_Active <= 1'b1;
                        r_Tx_Data <= data;
                        r_SM_Main <= s_TX_START_BIT;
                    end
                else
                    r_SM_Main <= s_IDLE;
            end
            // case: s_IDLE
            // Send out Start Bit. Start bit = 0
            s_TX_START_BIT :
                begin
                    r_tx <= 1'b0;
                    // Wait CLKS_PER_BIT-1 clock cycles for start bit to finish
                    if (r_Clock_Count < CLKS_PER_BIT-1)
                        begin
                            r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
                            r_SM_Main <= s_TX_START_BIT;
                        end
                    else
                        begin
                            r_Clock_Count <= 0;
                            r_SM_Main <= s_TX_DATA_BITS;
                        end
                end
            // case: s_TX_START_BIT
            // Wait CLKS_PER_BIT-1 clock cycles for data bits to finish
            s_TX_DATA_BITS :
                begin
                    r_tx <= r_Tx_Data[r_Bit_Index];
                    if (r_Clock_Count < CLKS_PER_BIT-1)
                        begin
                            r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
                            r_SM_Main <= s_TX_DATA_BITS;
                        end
                    else
                        begin
                            r_Clock_Count <= 0;
                            // Check if we have sent out all bits

```

```

        if (r_Bit_Index < 7)
            begin
                r_Bit_Index <= r_Bit_Index + 1;
                r_SM_Main <= s_TX_DATA_BITS;
            end
        else
            begin
                r_Bit_Index <= 0;
                r_SM_Main <= s_TX_STOP_BIT;
            end
        end
    end
    // case: s_TX_DATA_BITS
// Send out Stop bit. Stop bit = 1
    s_TX_STOP_BIT :
        begin
            r_tx <= 1'b1;
// Wait CLKS_PER_BIT-1 clock cycles for Stop bit to finish
            if (r_Clock_Count < CLKS_PER_BIT-1)
                begin
                    r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
                    r_SM_Main <= s_TX_STOP_BIT;
                end
            else
                begin
                    r_Clock_Count <= 0;
                    r_SM_Main <= s_CLEANUP;
                    r_Tx_Active <= 1'b0;
                end
            end
        // case: s_Tx_STOP_BIT
// Stay here 1 clock
        s_CLEANUP :
            begin
                r_Tx_Done <= 1'b1;
                r_SM_Main <= s_IDLE;
            end
        default :
            r_SM_Main <= s_IDLE;
        endcase
    end
endmodule

```

//////////////////////////////////SERIAL RECIEVE CODE Цуваа хүлээн авах код//////////////////////////////////

```
`timescale 1ns / 1ps
module uart_rx #(parameter CLKS_PER_BIT=50)
(
    input        i_Clock,
    input        i_Rx_Serial,
    output       o_Rx_DV,
    output [7:0] o_Rx_Byte
);

parameter s_IDLE           = 3'b000;
parameter s_RX_START_BIT  = 3'b001;
parameter s_RX_DATA_BITS  = 3'b010;
parameter s_RX_STOP_BIT   = 3'b011;
parameter s_CLEANUP       = 3'b100;

reg         r_Rx_Data_R      = 1'b1;
reg         r_Rx_Data        = 1'b1;
reg [31:0]  r_Clock_Count    = 0;
reg [2:0]   r_Bit_Index      = 0;           //8 bits total
reg [7:0]   r_Rx_Byte        = 0;
reg         r_Rx_DV          = 0;
reg [2:0]   r_SM_Main        = 0;

assign     o_Rx_DV           = r_Rx_DV;
assign     o_Rx_Byte         = r_Rx_Byte;

always @(posedge i_Clock)
begin
    r_Rx_Data_R <= i_Rx_Serial;
    r_Rx_Data <= r_Rx_Data_R;
end

always @(posedge i_Clock)
begin
    case (r_SM_Main)
        s_IDLE :
            begin
                r_Rx_DV <= 1'b0;
                r_Clock_Count <= 0;
                r_Bit_Index <= 0;
                if (r_Rx_Data == 1'b0) // Start bit detected
                    r_SM_Main <= s_RX_START_BIT;
            else
                r_SM_Main <= s_IDLE;
            end
    end
end
```

```

s_RX_START_BIT :
begin
if (r_Clock_Count == (CLKS_PER_BIT-1)/2)
begin
if (r_Rx_Data == 1'b0)
begin
r_Clock_Count <= 0; // reset counter, found the middle
r_SM_Main <= s_RX_DATA_BITS;
end
else
r_SM_Main <= s_IDLE;
end
else
begin
r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
r_SM_Main <= s_RX_START_BIT;
end
end // case: s_RX_START_BIT

s_RX_DATA_BITS :
begin
if (r_Clock_Count < CLKS_PER_BIT-1)
begin
r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
r_SM_Main <= s_RX_DATA_BITS;
end
else
begin
r_Clock_Count <= 0;
r_Rx_Byte[r_Bit_Index] <= r_Rx_Data;
// Check if we have received all bits
if (r_Bit_Index < 7)
begin
r_Bit_Index <= r_Bit_Index + 1;
r_SM_Main <= s_RX_DATA_BITS;
end
else
begin
r_Bit_Index <= 0;
r_SM_Main <= s_RX_STOP_BIT;
end
end
end // case: s_RX_DATA_BITS

// Receive Stop bit. Stop bit = 1
s_RX_STOP_BIT :
begin

```

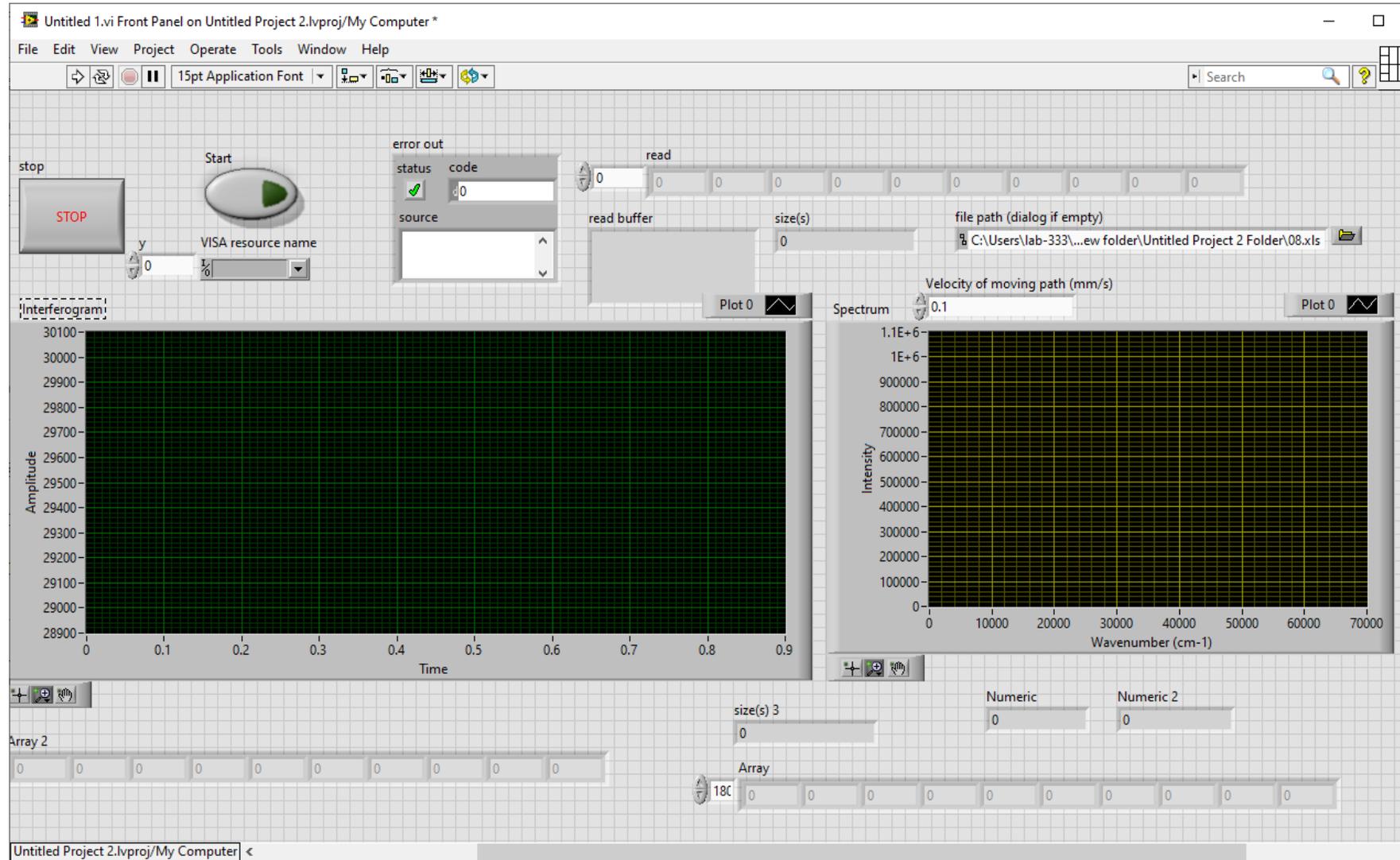
```

// Wait CLKS_PER_BIT-1 clock cycles for Stop bit to finish
    if (r_Clock_Count < CLKS_PER_BIT-1)
        begin
            r_Clock_Count <= r_Clock_Count + 1;
            r_SM_Main    <= s_RX_STOP_BIT;
        end
    else
        begin
            r_Rx_DV    <= 1'b1;
            r_Clock_Count <= 0;
            r_SM_Main    <= s_CLEANUP;
        end
    end
// case: s_RX_STOP_BIT
// Stay here 1 clock
    s_CLEANUP :
        begin
            r_SM_Main <= s_IDLE;
            r_Rx_DV  <= 1'b0;
        end
    default :
        r_SM_Main <= s_IDLE;
    endcase
end
endmodule
// uart_rx

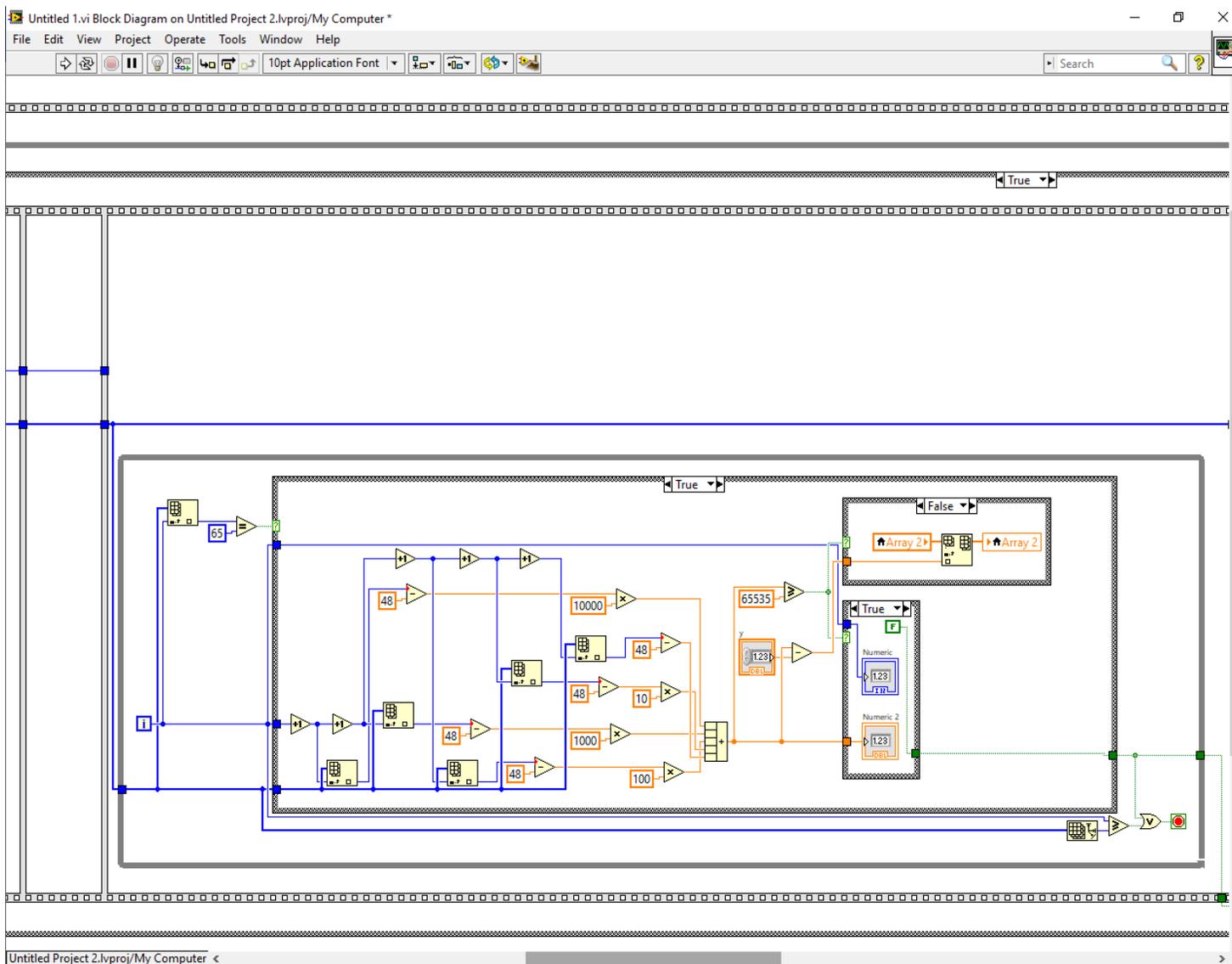
```

ХАВСРАЛТ 3

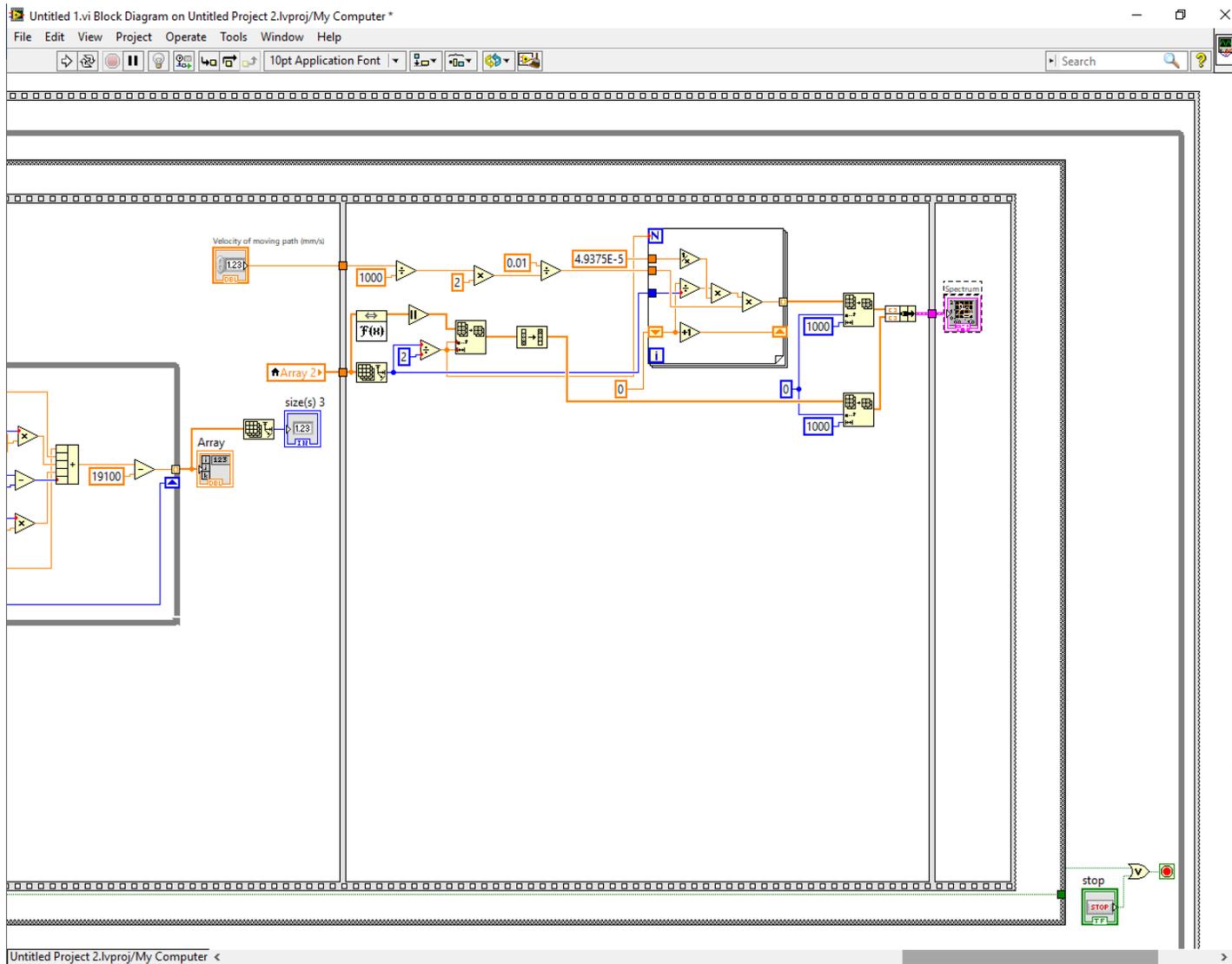
Интерферограмыг бүртгэх, спектр ялгах програмын хянах самбарын интерфейс



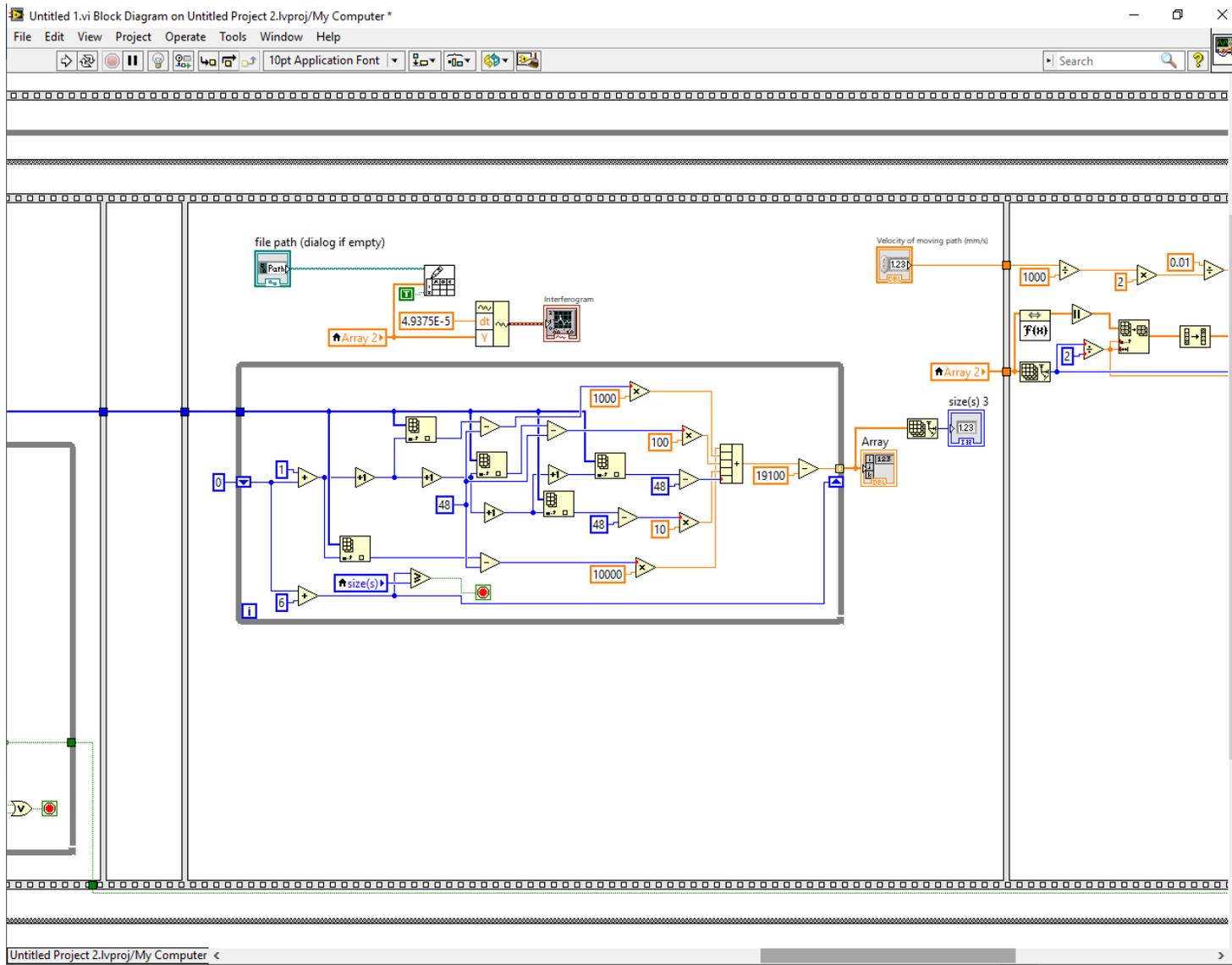
Интерферограммыг бүртгэх, спектр ялгах програмын блок схем (2/4)



Интерферограммыг бүртгэх, спектр ялгах програмын блок схем (3/4)



Интерферограммыг бүртгэх, спектр ялгах програмын блок схем (4/4)



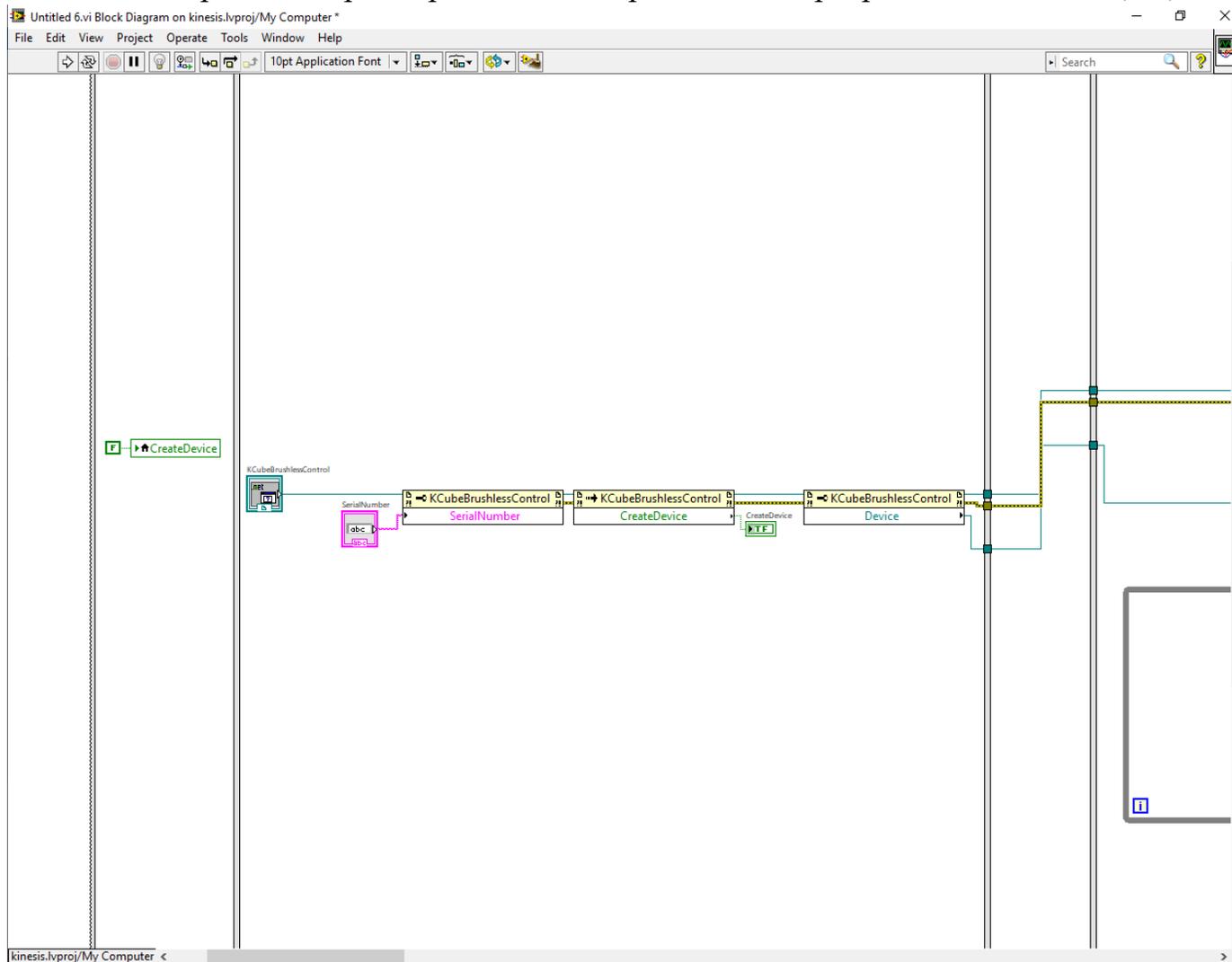
Хос лазерын спектрометр RED2-ын хэрэглэгчийн програмын хянах самбарын интерфэйс

The screenshot displays the 'KCubeBrushlessControl' software interface. At the top, a red banner indicates the device is 'Disconnected'. Below this, there are control elements including a 'CloseDevice' button, a 'HOMED' button, and a 'CreateDevice' button. A table of device parameters is visible:

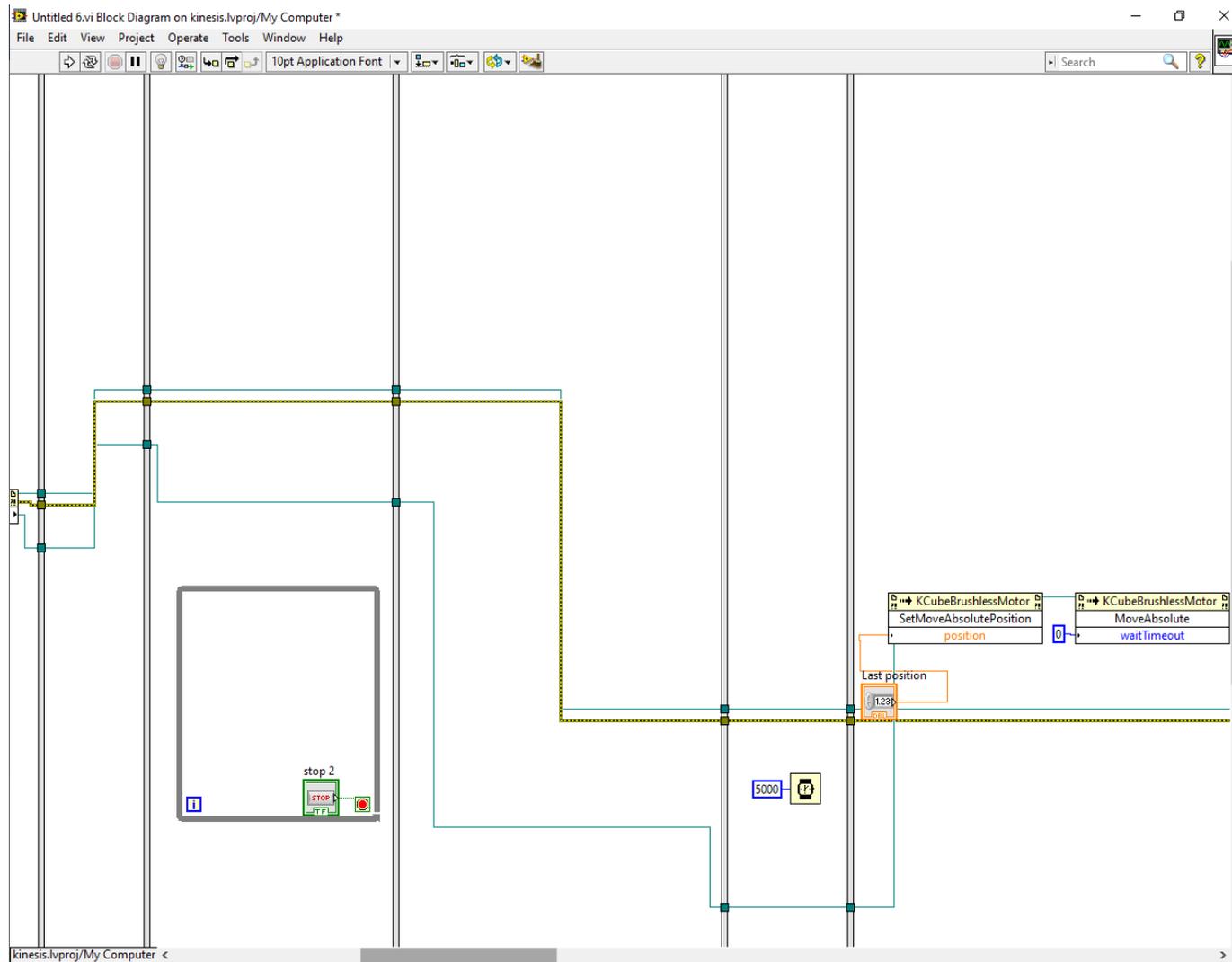
SerialNumber	Position	Last position	Velocity mm/s
28250941	0	50	0.1

Additional controls include a 'STOP' button, a 'VISA resource name' dropdown set to '%COM3', and a status code field showing '0'. Two plots are shown: 'Interferogram' (Amplitude vs. Time) and 'Spectrum' (Intensity vs. Wavenumber (cm-1)).

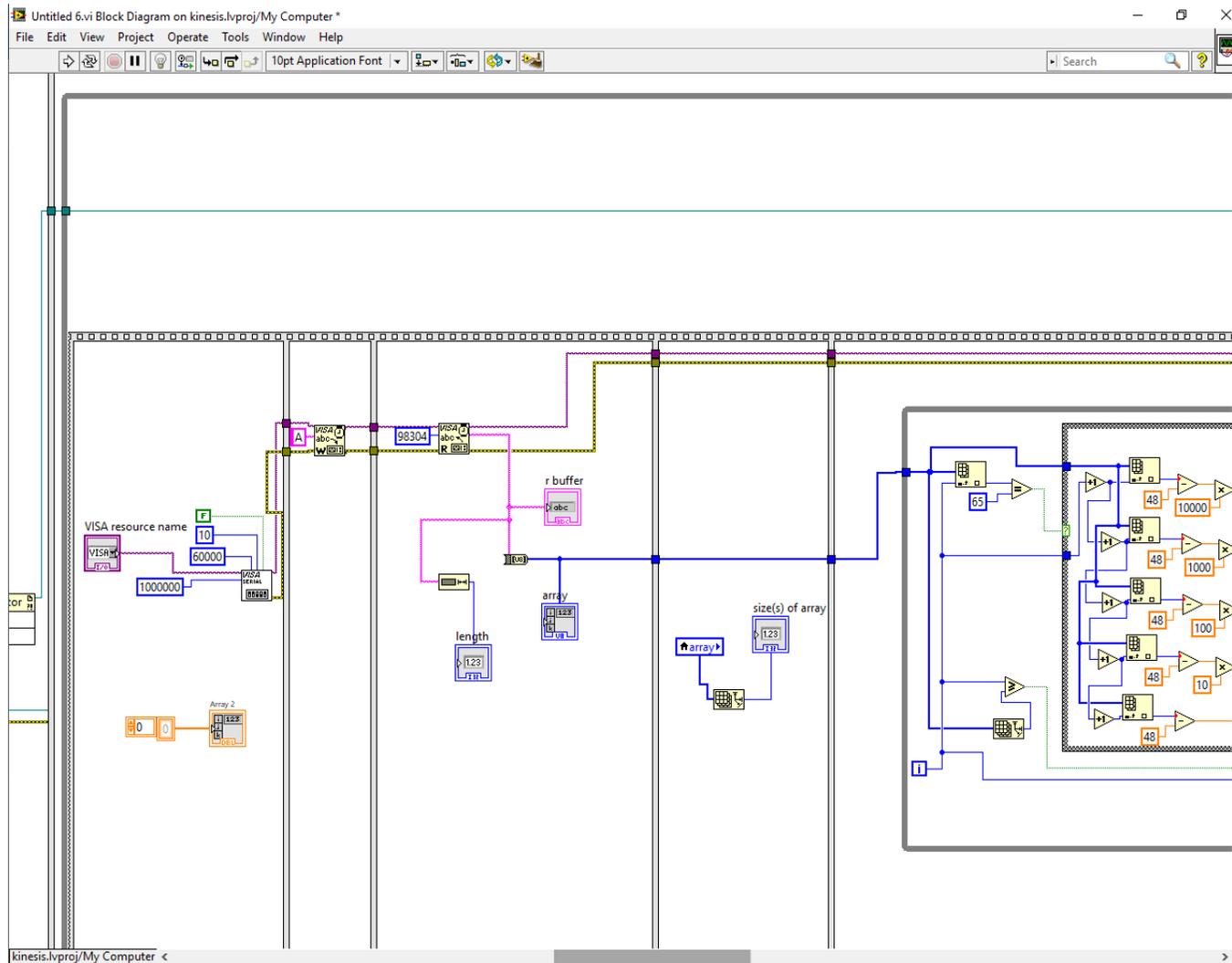
Хос лазерын спектрометр RED2-ын хэрэглэгчийн програмын блок схем (1/6)



Хос лазерын спектрометр RED2-ын хэрэглэгчийн програмын блок схем (2/6)



Хос лазерын спектрометр RED2-ын хэрэглэгчийн програмын блок схем (3/6)



Хос лазерын спектрометр RED2-ын хэрэглэгчийн програмын блок схем (5/6)

