

Фраунгоферын дифракцын симуляци ба туршилтын үр дүнгийн харьцуулалт

Ж.Ванчинхүү^{1а}, Ж.Эрдэнэтогтох², Б.Дүүрэнбуян¹

¹МУИС, ШУС, Физикийн тэнхим

²ШУА, ФТХ, Биофизикийн лаборатори

Бид энэ ажилд симуляциар (конволюцын теоремыг ашиглан) гарган авсан Фраунгоферын дифракцын зургийг бодит туршлагаар гарган авсан үр дүнтэй харьцуулав. Үүний зэрэгцээ симуляциар болон туршлагаар гарган авсан дифракцын зургуудаас объектын дүрсийг сэргээн гарган авч эх объектын дүрс, хэмжээтэй харьцуулж дүгнэлт гаргав. Дүрсийн харьцуулалтыг ерөнхий төрхөөр нь болон нэг шугамын дагуух эрчмийн түгэлтийг байгуулах замаар нарийвчилсан харьцуулалтаар гүйцэтгэв. Эдгээр үр дүн бидний боловсруулсан дифракцын зургийг байгуулах, дифракцын зургаас эх объектын дүрсийг сэргээх процедур бодит үр дүнд хүргэж байгааг харуулж байна.

Түлхүүр үгс: дифракц, дифракцын симуляци, дүрсийн сэргээлт, фазын сэргээлт, Фурье хувиргалт

Мэргэшлийн индекс (PACS#): 42.30.Rx, 42.30.Wb

I. УДИРТГАЛ

Өгөгдсөн объектын дифракцын зургийг тоон тооцоолол, симуляци хийх замаар гарган авч болдгийг бид энэ сэдэвтэй холбоотойгоор өмнө нь хийсэн зарим ажлуудад авч үзсэн [1-3] бөгөөд эдгээрт дифракцын зургийг тоон тооцоолол, симуляциар байгуулах арга замуудыг тодорхойлсон. Үүний урвуу бодлого буюу объектын дифракцын зургаас эх объектын дүрсийг сэргээх тоон арга, зарчмын тухай [4-8] ажлуудаас, тэдгээрийг хэрэглэн гаргасан үр дүнг [3, 9-11] эх сурвалжуудаас үзэж болно. Дифракцын зургаас эх объектын дүрсийг гарган авах энэ судалгаа зөвхөн микроскопын сайжруулалт, богино долгионоор (X-ray imaging) зураг авах [9], биологийн эд, эсийн бүтцэд өөрчлөлт оруулалгүйгээр зургийг авах [10] гэх мэт хэрэглээгээр хязгаарлагдахгүй, сүүлийн жилүүдэд оптик, зураг дүрслэл ба тооцооллын ухааны салбар дундаас шинээр бий болж гарч ирж байгаа линзгүй технологи болон [11] болон дижитал голограмтай [10] холбоотойгоор ч бас хийгддэг бөгөөд эдгээр технологийг хөгжүүлэх гол суурь үндэс нь болж байгаа юм. Бид энэ өгүүлэлд Фраунгоферийн дифракцын тохиолдолд объектын дифракцын зургийг өөрсдийн боловсруулсан симуляцийн схемээр [4] гарган авч түүнийг туршлагаар гарган авсан зурагтай харьцуулснаас гадна эдгээр дифракцын зургуудаас өөрсдийн боловсруулсан аргаар [3] сэргээсэн эх объектын зургуудын харьцуулалтыг хийлээ. Бид энэ ажилд хийгдсэн бүх тооцоололд Mathematica

функциональ програм, түүний үндсэн функцүүдийг ашиглав.

II. ТУРШИЛТ БА СИМУЛЯЦИ

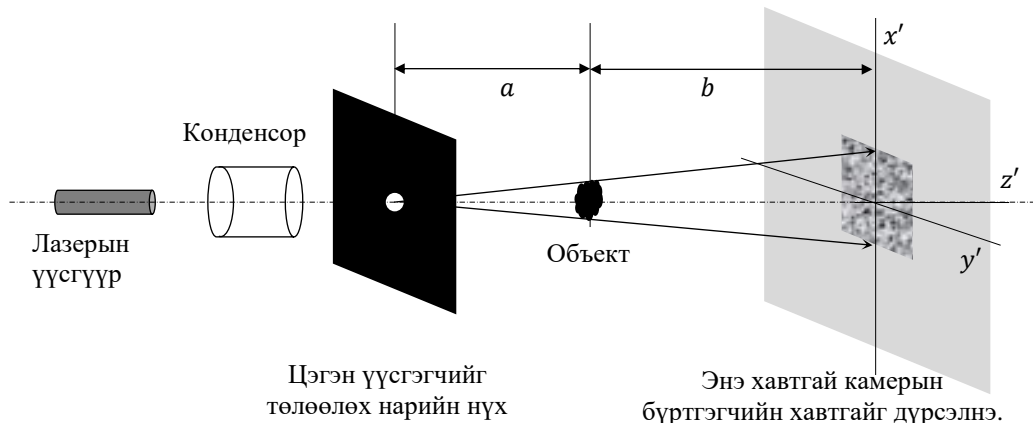
A. Туршилт

Бид энэ ажилд объектын Фраунгоферын дифракцын зургийг гарган авахдаа Зураг 1-д үзүүлсэн схемийг ашиглав [3, 9]. Энэ ажилд $\lambda = 532$ нм долгионы урттай ногоон гэрлийн лазерыг объектыг гэрэлтүүлэгч үүсгүүр болгон ашиглав. Энэ лазерын цацрагийн үүсгүүрийг конденсор линзийн системийн фокусын цэг дээр байрлуулснаар цэгэн үүсгэгчийг төлөөлөх нарийн нүхэн (диафрагм) дээр параллель цацраг тусгаж болно. Туршилтад $d = 10$ мкм диаметртэй тусгайлан бэлтгэсэн нүхийг ашиглав. Энэ нүхнээс цааш объект руу тархаж байгаа гэрэл энэ нүхэн дээр дифракцалсан байдаг, өөрөөр хэлбэл энэ нүхнээс дугуй нүхний дифракц үүснэ. Энэ нүхнээс гарч шууд камер дээр ирж байгаа цацраг камерын бүртгэгчийн хавтгай дээр тодорхой түгэлт үүсгэх учраас бид үүний бараг жигд, тод гэрэлтэлттэй хэсгийг объект дээр тусгана. Энэ цацрагийн объектын хавтгай дээрх радиаль түгэлтийг бид тооцооллыг хялбарчлах зорилгоор Гауссын функцээр илэрхийлэгдэнэ гэж үзлээ. Гэхдээ энэ түгэлт Фраунгоферийн дифракцын эрчмийн түгэлтээр илэрхийлэгдэх ёстойг энд дурдая. Энэ нүхний диаметр маш бага учраас түүнээс гарч байгаа гэрлийг бид бөмбөлөг долгион гэж төсөөлж болно. Иймээс объектыг бөмбөлөг долгионоор гэрэлтүүлсэн гэж үзэх боломжтой

^а Э-шуудан: j.vanchinkhuu@num.edu.mn

болж байгаа юм. Бид энэ туршилтад хялбарыг бодолцон техникийн тодорхойлолтоороо $d = 0.05\text{мм}$ диаметртэй нарийн утсыг объект болгон авлаа. Нөгөө талаас Фраунгоферын дифракци

бага хэмжээтэй объектын хувьд тод ажиглагдах бөгөөд мөн энэ туршилтын ажлын зайг багасгахад объектын хэмжээ чухал ач холбогдолтойг тэмдэглэе.



Зураг 1. Дифракц зургийг гарган авсан туршилагын авсан схем

Дифракцын зураг өгч байгаа объектын оптик микроскопоор х400 өсгөлттэйгээр окулярын хуваарийн үнэтэй харьцуулан авсан зураг болон симуляцид оруулсан дүрслэлийг Зураг 2-т үзүүлэв. Микроскопын хуваарийн үнийг объект микрометрийн хуваарьтай харьцуулан тодорхойлж болох ба үүнийгээ ашиглан энэ зургаас утасны диаметрийг тодорхойлж болохыг энд дурдая.

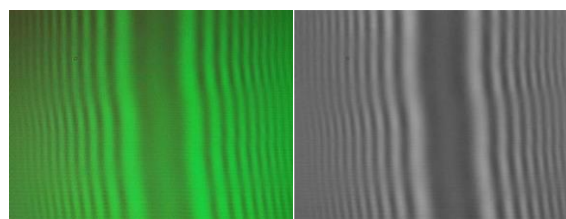


Зураг 2. а) Объект болгон сонгон авсан утсыг х400 дахин өсгөсөн байдал, б) Симуляцид оруулсан утасны дүрслэл

Микроскопын окулярын хуваариар тооцоолоход энэ утас $d = 0.43\text{мм}$ орчим диаметртэй байна. Энэ утасны диаметр уртынхаа дагууд харилцан адилгүй утгатай тул микрометр ашиглан бас тодорхойлж дундаж утга нь $d = 0.042\text{мм}$ байгааг тогтоов. Бид объектын дифракцын зургийг симуляциар тооцоолж гаргахад болон туршлагаар гарган авсан дифракцын зургаас сэргээн гарган авсан объектын хэмжээтэй харьцуулалт хийхдээ энэ утгыг суурь болгон авсан болно.

Энэ туршилтын зургийг гарган авахдаа бид NOZAN L835 usb камерыг объективгүйгээр ашиглав. Проекцын микроскопын схем линз хэрэглэдэггүйгээрээ онцлог юм [12]. Энэ камерын үндсэн модуль компьютерт холбогддог бөгөөд зургийг 640X480-аас 2592X1944 хүртэл хэмжээтэйгээр хадгалах програм хангамжтай байдаг. Гарган авсан өнгөт

ба саарал дүрслэлтэй дифракцын зургийг 800x600 хэмжээтэйгээр Зураг 3-д үзүүлэв. Бид тахир хэсгийн дифракцын зургийг зориуд сонгон авав.



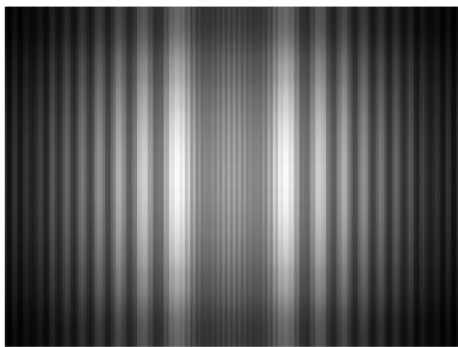
Зураг 3. Дифракц зургийн өнгөт ба саарал дүрслэл

Энэ зураг Фраунгоферийн дифракцын зураг байгаа нь тодорхой харагдаж байна. Утасны уртын дагууд дифракцын нэмэлт түгэлт байхгүй байна. Зураг авсан зайн (Зураг 1) утгууд $a = 22.8\text{см}$, $b = 27.6\text{см}$ болно. Энэ тохиолдолд дифракцын шалгуур $\frac{d^2}{a\lambda} = 0.01$, $\frac{d^2}{b\lambda} = 0.03$ утгатай байгаа бөгөөд эдгээр нь нэгээс олон дахин бага байгаа учраас үнэхээр Фраунгоферын дифракцын хязгаарт хамаарах утгууд юм. Энэ зургийн өсгөлт $\frac{a+b}{a}$ бөгөөд хэмжээ нь камерын сенсоорын форматлагдсан хэмжээгээр илэрхийлэгдэнэ. Бид объектын хавтгайн гэрэлтүүлэгдсэн хэсгийн хэмжээг шууд хэмжиж чадахгүй бөгөөд үүнийг зөвхөн өсгөлтийг ашиглан тодорхойлж болно.

В. Дифракцын зургийн симуляци

Туршилтын нөхцөлд дурдагдсан дээрх утгуудыг симуляцид тусган дифракцын зургийг симуляциар үүсгэхдээ бид (i) Френелийн дифракцын интегралыг сонгон авсан объектын хувьд тооцоолох, (ii) Фурьегийн хувиргалтын конволюцыг ашиглах гэсэн хоёр аргын аль нэгийг ашиглана. Эдгээрийн алианаар нь ч

гүйцэтгэсэн адил үр дүнд хүргэдэг боловч конволюцыг хэрэглэх нь тооцооллын хувьд арай хялбар бөгөөд тооцооллын кодын гүйцэтгэлийн хугацаа нь арай бага байдаг. Ийм учраас бид конволюцыг ашиглав [4]. Үүнийг хийхдээ эхлээд объектыг зураг хэлбэрээр оруулж өгөөд дараа нь массив хэлбэрт шилжүүлж тодорхойлно. Дараагийн шатанд тоон хэлбэрээр тодорхойлогдсон энэ өгөгдөлд Фурьегийн хувиргалт гүйцэтгэнэ. Бид тоон тооцоолол хийхдээ Фурьегийн дискрет хувиргалтыг ашигладаг [13]. Симуляциар гарган авсан дифракцын зургийг Зураг 4-т үзүүлэв.

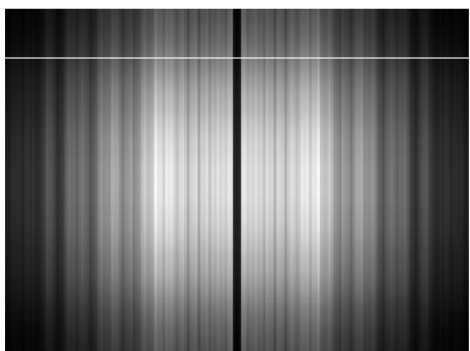


Зураг 4. Симуляциар гарган авсан дифракц зургийн саарал дүрслэл

Энэ зураг зурвасын тоо болон өргөн гэх зэрэг үзүүлэлтийн хувьд үнэхээр туршлагаар гарган авсан дифракцын зурагтай зөрөөгүй адилхан байгааг ажиглаж болно. Энэ нь бидний боловсруулсан дифракцын зургийг гарган авах процедур зөв болохыг батлан харуулж байна.

Ш. ДИФРАКЦЫН ЗУРГИЙН СЭРГЭЭЛТ, ҮР ДҮН, ХАРЬЦУУЛАЛТ

Дифракцын зургийг сэргээхдээ бид Фурье хувиргалтын конволюцын теоремыг ашиглав [3,4].

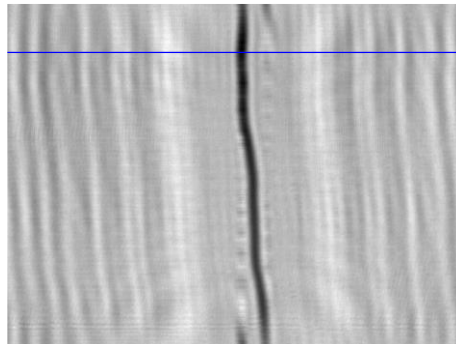


Зураг 5. Симуляциар гарган авсан дифракц зургаас сэргээгдсэн объектын дүрс (Энэ зураг дээрх хөндлөн цагаан шугам нь эрчмийн түгэлтийг гаргасан мөрийг заана)

Симуляциар гарган авсан дифракцын зургаас конволюц ашиглан сэргээлт хийж гарган авсан

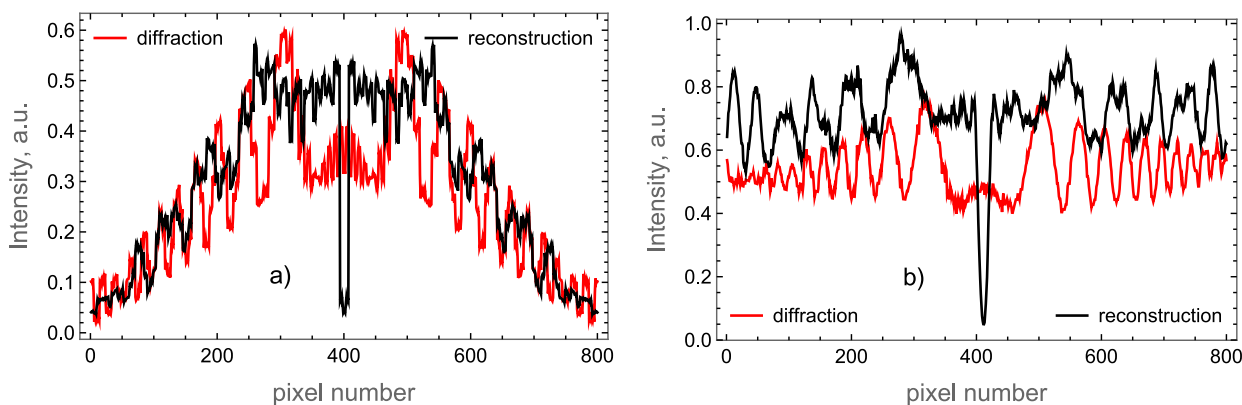
объектын сэргээгдсэн эх дүрсийг Зураг 5-д үзүүлэв.

Харин камераар бүртгэж авсан дифракцын зургаас сэргээлт хийж гарган авсан объектын эх дүрсийг Зураг 6-д үзүүлэв. Утасны хэлбэр эндээс тодорхой харагдаж байгаа бөгөөд утасны хувьд уртын дагууд дифракцын эрчмийн түгэлт үүсэхгүй учраас энэ хэлбэр дифракцын зурагт ажиглагдсан хэлбэртэйгээ адилхан байх нь ойлгомжтой.



Зураг 6. Туршлагаар гарган авсан дифракц зургаас сэргээгдсэн объектын дүрс

Бид симуляци ба туршилтын үр дүнгээс сэргээн гарган авсан эх объектын зургуудыг эхлээд ерөнхий хэлбэрээр харьцуулав. Хоёр тохиолдолд гаргасан зургуудыг харьцуулан харахад эрчмийн түгэлт хоёр зурагт тоон утгын хувьд ялгаатай боловч ялгарч харагдах байдлаараа бараг адилхан, зургийн деталиуд бүрэн адилхан байгааг харж болно. Үүнээс гадна нарийвчилсан харьцуулалтыг хийлээ. Үүний тулд бид хоёр зургийн нэг мөрөнд орших пикселийн утгуудын түгэлтийг байгуулж үзсэн болно. Энэ шугамыг зурагт цагаан ба цэнхэр шугамаар дүрсэлсэн бөгөөд 85 дугаар мөрийн дагуу татагдсан болно. Зураг 7-д сэргээгдсэн зургуудын 85 дугаар мөр дээр орших пикселүүдэд харгалзах эрчмийн түгэлтийг байгуулж харуулав. Симуляциар гаргасан дифракцын зургаас сэргээсэн зургийн эрчим төвөөсөө зах руу шилжих тусам буурч байгаа нь эрчмийн түгэлтийг Гауссын түгэлттэй байна гэж загварчилсантай холбоотой юм. Энэ байдал туршилтаар авсан зургаас сэргээсэн зураг дээр ажиглагдахгүй байна. Төгсгөлд нь бид сэргээсэн зургуудад хэмжээний харьцуулалт хийлээ. Симуляциар гаргасан дифракцын зургаас сэргээж гаргасан утасны хэмжээ анх симуляцид оруулж өгсөн утасны хэмжээтэй ямарч зөрөөгүй таарч байна. Харин камераар авсан зургаас сэргээгдсэн утасны диаметр $3 \div 92$ мкм мужид орших бөгөөд мөрийн тоогоор жигнэсэн дундаж утга нь утасны жинхэнэ диаметртэй тохирч байна.



Зураг 7. Сэргээгдсэн зургийн нэгэн ижил шугамын дагуух эрчмийн түгэлт: а) симуляци, б) туршилт

ДҮГНЭЛТ

Эдгээр үр дүнгээс харахад бидний туршилтаар авсан дифракцын зургаас тооцоолж гаргасан үр дүн симуляциар гаргасан үр дүнтэй олонхи тохиолдолд сайн тохирч байна. Энэ нь бидний боловсруулан хэрэглэж байгаа (i) дифракцын зургийг симуляци хийх, (ii) дифракцын зургаас эх объектын дүрсийн сэргээх процедур Фраунгоферын дифракцын хувьд бүрэн зөв ажиллаж байгааг батлан харуулж байна. Гэхдээ энд цаашид гүнзгийрүүлэн авч үзүүштэй хэд хэдэн асуудал ажиглагдаж байна. Туршилтаар гаргаж авсан дифракцын зургаас сэргээн гаргаж авсан объектын эрчмийн түгэлт симуляциар гаргасан объектын эрчмийн түгэлттэй яг таарахгүй байгаа боловч хэмжээ нь тодорхой интервалын хүрээнд яг таарч байна. Мөн объектын хавтгайн бүхэлдээ сэргээгдсэн дүрслэлийн доторхи деталиуд тоо болон хэлбэрийнхээ хувьд яг таарч байна. Гэхдээ нэг шугамын дагуух суурь (background) эрчмийн түгэлт симуляциар гаргасан зургуудад голоосоо зах руу бараг жигд буурч байхад камераар бүртгэж авсан дифракцын зурагт бараг жигд байгаа нь эрчмийн түгэлтийн графикаас тод ажиглагдаж байна. Энэ нь бид объектын гэрэлтүүлгийг симуляцид заахдаа Гауссын түгэлтэд захирагдана гэж хялбарчилсантай холбоотой юм. Мөн чанартаа энэ түгэлт Гауссын бус Фраунгоферын дифракцтай адил түгэлттэй байх ёстой юм. Дараагийн нэг дутагдал бол хоёр тохиолдолд сэргээн гарган объектын захын ялгарлын ялгаатай байдал юм. Симуляциар гарган авсан зургаас объектын зах ба суурь гэрэлтүүлгийн ялгарал маш тод байхад (эрчмийн түгэлтийн объектын захад харгалзах утгууд график дээр үсрэлттэйгээр өөрчлөгдөж хоёр босоо шулуунаар илэрхийлэгдэж байгаа нь тод харагдаж байна) туршлагаар гарган авсан дифракцын зургаас сэргээсэн объектын зах төдийлэн тод ялгаралтай биш байгаа нь графикаас тодорхой харагддаг. Энэ нь

туршилтад хэрэглэх камерын бүртгэгчийн мэдрэх чадварыг дээшлүүлэх, пикселийн хэмжээг багасгах шаардлагатай болохыг бидэнд сануулж байна. Төгсгөлд нь, объектын дотор хэсгийн эрчмийн түгэлтийн жигд байдлыг харьцуулж үзэхэд минимум ба максимум эрчмийн зөрөө нь хоёр тохиолдлын аль алинд бараг ижил 5%-аас хэтрэхгүй байна. Энэ утга хэдийгээр харьцангуй бага утга боловч нарийн бүтэцтэй, жижиг объектын хувьд зургийн чанар, ялгаралд нь мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлэх боломжтой.

Энэ ажлын үр дүнд бид цаашид дифракцын зургаас объектын гажиггүй эх зургийг сэргээн гарган авах судалгааг туршлагатай харьцуулан илүү нарийвчлан гүйцэтгэх боломжтой болж байгаа юм.

ТАЛАРХАЛ

Энэ ажлыг ШУТС-аас санхүүжүүлэн хэрэгжүүлж байгаа “Хоёр хэмжээст дифракцын загварчлал, эх объектын зургийг сэргээх судалгаа” сэдэвт суурь судалгааны төслөөс санхүүжүүлэн гүйцэтгэв.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Ж.Ванчинхүү, Ж.Эрдэнэтогтох, Б.Дүүрэнбуян, Ж.Дөлгөөн, Хоёр хэмжээст объектын дифракцын зургийн математик тооцоолол, түүнийг шинжлэх, МУИС 80 жил эрдэм шинжилгээний хурал, 2022.09.20-21, Улаанбаатар.
- [2] Ж.Ванчинхүү, Ж.Эрдэнэтогтох, Б.Дүүрэнбуян, Хоёр хэмжээст объектын дифракцын зургийг математик тооцооллоор гарган авах аргууд, Mongolian Journal of physics supplement v4, pp. 26-27, October 2022 (МФН-ийн Эрдэм шинжилгээний хурал, 2022.10.20-21, Улаанбаатар)

- [3] Ванчинхүү Ж, Эрдэнэтогтох Ж, Дүүрэнбуян Б, Дөлгөөн Ж, Хоёр хэмжээст объектын дифракцын зураг, түүнээс эх объектын дүрсийг сэргээн байгуулах нь. *Физик, МУИС-Эрдэм шинжилгээний бичиг*, 34(577): 58-65, (2023) <https://journal.num.edu.mn/physics/article/view/4040>
- [4] J.Vanchinkhuu, J.Erdenetogtokh, B.Duurenbuyan, Simulation ways to create the Fresnel diffraction patterns, *Mongolian Journal of physics supplement v4*, pp. 37-38, November 2023 (МФН-ийн Эрдэм шинжилгээний хурал, 2023.11.02-03, Улаанбаатар.
- [5] Gerchberg, R.W., Saxton, W.O., A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik* 35(2), 237–246 (1972)
- [6] Tatiana Latychevskaia, Iterative phase retrieval in coherent diffractive imaging: practical issues, *Appl. Opt.* 57, 7187-7197 (2018) Fienup, J.R., Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform. *Opt. Lett.* 3(1), 27–29 (1978). <https://doi.org/10.1364/OL.3.000027>
- [7] Y.Shechtman, Y. C. Eldar, O. Cohen, H. N. Chapman, J. Miao and M. Segev, Phase Retrieval with Application to Optical Imaging: A contemporary overview, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 32, no. 3, pp. 87-109, May 2015, <https://doi.org/10.1109/MSP.2014.2352673>
- [8] Jigmeddorj, V., Jamsranjav, E., Baatar, D., Kinjo, Y., Ito, A., & Shiina, T. Improvement of imaging and image correction methods for the soft X-ray projection microscopy. *Journal of X-Ray Science and Technology*, vol. 31, no.5, pp. 951–964, 2023. <https://doi.org/10.3233/xst-230056>
- [9] P Kliuiev *et al.*, Application of iterative phase-retrieval algorithms to ARPES orbital tomography, *New J. Phys.* 18, 093041 (2016)
- [10] Tatiana Latychevskaia and Hans-Werner Fink, Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms, *Appl. Opt.* 54, 2424-2434 (2015).
- [11] V. Boominathan *et al.*, "Lensless Imaging: A computational renaissance," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 23-35, Sept. 2016, <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2581921>.
- [12] A.G. Michette, G. Alan, G.R. Morrison and C.J. Buckley, editors, X-ray microscopy III: Proceedings of the Third International Conference: 1990, London, September 3-7, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, c1992. pp. 491.
- [13] R.N.Bracewell, The Fourier Transform and Its Applications, McGraw-Hill, Boston, (2000)

Comparison of results from the Fraunhofer diffraction simulation and corresponding experiment

Abstract In this work, we consider results of comparison of the Fraunhofer diffraction simulation with convolution theorem and the corresponding experimental verification. As well, we reconstructed the original object form giving the diffraction patterns from their diffraction pattern images for simulation and experiment and their form and size are compared. The comparison was done for the general form and the size of object. In the detailed size comparison, we consider the intensity distribution along a horizontal line on the diffraction image. The results we have obtained from the comparison shows that the procedure we have proposed for diffraction simulation and the image reconstruction yet, leads to acceptable and reliable results.