



پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی

گروه فوتونیک

پایان‌نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فوتونیک - گرایش فیزیک

عنوان

بررسی روش‌های بهینه تصویرسازی گوست محاسباتی

اساتید راهنما

دکتر سهراب احمدی

دکتر رضا خردمند

پژوهشگر

محمد ظفری

بهمن ۹۲



نام خانوادگی: ظفري	نام: محمد
عنوان پایان نامه: بررسی روش های بهینه تصویرسازی گوست محاسباتی	
اساتید راهنما: دکتر سهراب احمدی، دکتر رضا خردمند	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فوتونیک
گرایش: فیزیک	تعداد صفحه: ۸۴
دانشگاه: تبریز	دانشکده: پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی
تاریخ فارغ التحصیلی: بهمن ۱۳۹۲	
کلیدواژه: تصویرسازی گوست محاسباتی، رمزنگاری نوری، کیفیت تصویر، همبستگی مرتبه دوم	
چکیده:	
<p>تصویربرداری گوست یک روش تصویربرداری غیرمحلی است، به این معنا که نیازی به قرار گرفتن جسم مقابل دوربین تصویربرداری نیست. در این روش، تصویر یک جسم از محاسبه تابع همبستگی متقابل بین جریان‌های الکتریکی حاصل از آشکارسازی دو جفت باریکه با همبستگی بالا توسط دو آشکارساز جدا از هم به دست می‌آید. به طور کلی در یک آزمایش تصویرسازی گوست، یک منبع کلاسیکی (حرارتی یا شبه حرارتی) یا کوانتومی که دو باریکه نوری همبسته یا درهم‌تنیده تولید می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. تفاوت قابل توجه بین دو روش این است که یک تصویر گوست شبه حرارتی همواره دارای یک پس‌زمینه یا نویز است، در حالی که تصویر گوست به دست آمده با استفاده از فوتون‌های درهم‌تنیده می‌تواند دارای تباين 100% باشد. تصویرسازی گوست کاربردهای بسیار گسترده‌ای دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به رمزنگاری نوری اطلاعات با امنیت بالا، تصویربرداری از اجسامی که مستقیماً در دید دوربین‌های عکس‌برداری نیستند و تصویربرداری سه‌بعدی با استفاده از آشکارسازهای تک-پیکسل اشاره کرد.</p> <p>در این پایان‌نامه یک تکنیک جدید برای تصویرسازی گوست محاسباتی با منبع نور شبه حرارتی معرفی و با عنوان "تصویرسازی گوست محاسباتی گزینشی" نام‌گذاری کردیم. این تکنیک بر پایه انتخاب گزینشی استوار است و قابلیت بازسازی یک تصویر N-پیکسل، با بهترین کیفیت و با تعداد N اندازه‌گیری و یا کمتر، با توجه به تعداد نقاط انتخاب شده در هر اندازه‌گیری را دارد. با استفاده از این روش توانستیم هم کیفیت تصویر گوست و هم امنیت اطلاعات کدگذاری شده را به طور چشمگیری افزایش دهیم.</p>	

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل اول: بررسی منابع

- ۱-۱ مبانی تصویربرداری گوشت ۷
- ۱-۱-۱ تصویربرداری گوشت با منبع کوانتومی ۸
- ۲-۱-۱ تصویربرداری گوشت با منبع کلاسیکی ۱۰
- ۳-۱-۱ تفکیک پذیری فضایی و کنتراست تصویر ۱۱
- ۲-۲ آشکارسازی نوری نیمه کلاسیکی و کوانتومی ۱۶
- ۳-۱ اثر هانبری براون-تویس و تصویربرداری گوشت با نور حرارتی ۱۸
- ۴-۱ تصویربرداری گوشت سه بعدی ۲۳
- ۵-۱ رمزنگاری نوری اطلاعات ۲۵

فصل دوم: مبانی و روش‌ها

- ۱-۲ تصویربرداری گوشت محاسباتی ۲۷
- ۱-۲-۱ فرمول بندی ریاضی تصویربرداری گوشت محاسباتی ۲۹
- ۲-۱-۲ اثبات تجربی تصویربرداری گوشت محاسباتی با یک آشکارساز ۳۳
- ۲-۲ روش‌های بهبود کیفیت تصویر گوشت ۳۶
- ۱-۲-۲ تصویربرداری گوشت تفاضلی ۳۶
- ۲-۲-۲ تصویربرداری گوشت نرمالیزه ۴۲
- ۳-۲-۲ پردازش تصویر ۴۳
- ۴-۲-۲ الگوریتم ژنتیک ۴۵
- ۳-۲ پارامترهای کیفیت تصویر ۵۲
- ۱-۳-۲ تباین ۵۲
- ۲-۳-۲ نسبت سیگنال به نویز و کنتراست به نویز ۵۲

- ۲-۴ رمزنگاری تصویربرداری گوشت محاسباتی ۵۳
- ۲-۵ شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۵
- ۲-۵-۱ انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی از نظر برگشت‌پذیری ۵۷
- ۲-۵-۲ شبکه‌های پرسپترون ۵۷

فصل سوم: بحث و نتیجه‌گیری

- ۳-۱ بهبود کیفیت تصاویر گوشت ۶۲
- ۳-۱-۱ بررسی عملکرد تکنیک‌های متفاوت تصویربرداری گوشت در بهبود کیفیت تصویر ۶۲
- ۳-۱-۲ بهبود کیفیت تصویر گوشت با تکنیک پردازش تصویر ۶۸
- ۳-۱-۳ استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهبود کیفیت تصاویر گوشت ۷۲
- ۳-۲ رمزنگاری تصاویر گوشت ۷۳
- ۳-۲-۱ رمزنگاری تصاویر گوشت با استفاده از تصویربرداری گوشت گزینشی ۷۴
- ۳-۲-۲ رمزنگاری تصاویر گوشت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ۷۷
- نتیجه‌گیری ۷۹
- پیشنهادات ۸۱
- منابع ۸۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: چیدمان تصویربرداری گوشت با دو باریکه ۷
- شکل ۲-۱: چیدمان تصویربرداری گوشت کواتومی ۸
- شکل ۳-۱: چیدمان تصویربرداری گوشت کلاسیکی ۱۱
- شکل ۴-۱: چیدمان تجربی تصویرسازی گوشت (میدان نزدیک) ۲۰
- شکل ۵-۱: چیدمان تجربی آزمایش هانبری براون-تویس (میدان دور) ۲۱
- شکل ۶-۱: تصاویر دوبعدی حاصل از چهار آشکارساز و با تعداد اندازه‌گیری‌های متفاوت ۲۴
- شکل ۷-۱: تصویر گوشت سه‌بعدی ۲۴
- شکل ۱-۲: چیدمان تصویرسازی گوشت با یک لیزر پیوسته و مدولاتور فضایی نور ۲۸
- شکل ۲-۲: چیدمان تصویرسازی گوشت محاسباتی با یک آشکارساز ۲۹

- شکل ۳-۲: چیدمان تجربی تصویرسازی گوشت محاسباتی در آزمایشگاه ۳۵
- شکل ۴-۲: چیدمان تجربی تصویربرداری گوشت تفاضلی ۳۷
- شکل ۵-۲: چیدمان تجربی تصویربرداری گوشت نرمالیزه ۴۲
- شکل ۶-۲: فلوچارت الگوریتم ژنتیک ۴۶
- شکل ۷-۲: مدل ساده شده جسم برای تجزیه و تحلیل ۵۲
- شکل ۸-۲: طرح شماتیک روش رمزنگاری ۵۴
- شکل ۹-۲: مدل ریاضی یک نرون ۵۵
- شکل ۱۰-۲: چند نمونه از توابع انتقال یا توابع فعال‌سازی ۵۶
- شکل ۱۱-۲: ساختار یک شبکه پرسپترون دو لایه ۵۸
- شکل ۱-۳: تصاویر شبیه‌سازی شده با توزیع گاوسین ($\mu=6$ و $\sigma=0.9$) و با ۴۲۲۵ شات میدان ۶۳
- شکل ۲-۳: نمودار مربوط به تباین تصویر گوشت با در نظر گرفتن تابع توزیع گاوسین ۶۳
- شکل ۳-۳: تصاویر شبیه‌سازی شده با توزیع یکنواخت و با ۴۲۲۵ شات میدان ۶۴
- شکل ۴-۳: نمودار مربوط به تباین تصویر گوشت با در نظر گرفتن تابع توزیع یکنواخت ۶۵
- شکل ۵-۳: تصاویر حاصل از داده‌های تجربی ۶۶
- شکل ۶-۳: توزیع شدت مربوط به تصاویر گوشت ۶۶
- شکل ۷-۳: تصاویر گوشت تجربی حاصل از ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ شات میدان ۶۷
- شکل ۸-۳: تصویر گوشت بازسازی شده با در نظر گرفتن دو نقطه کنار هم با مقدار تصادفی ۶۷
- شکل ۹-۳: تصاویر گوشت بازسازی شده از بخش‌های مختلف جسم ۶۸
- شکل ۱۰-۳: نمودار مربوط به تباین تصویر گوشت و تصویر گوشت پردازش شده ۶۹
- شکل ۱۱-۳: نمودار مربوط به نسبت سیگنال به نویز تصویر گوشت و تصویر گوشت پردازش شده ۶۹
- شکل ۱۲-۳: تصاویر حاصل از ۵۰۰ شات میدان ۷۰
- شکل ۱۳-۳: تصاویر حاصل از ۲۰ شات میدان ۷۰
- شکل ۱۴-۳: نمودار شدت مربوط به تصاویر حاصل از ۲۰ شات میدان ۷۱
- شکل ۱۵-۳: تصاویر گوشت حاصل از ۳۰۰۰ شات میدان ۷۲
- شکل ۱۶-۳: نمودار شدت مربوط به تصویر گوشت تجربی و تصویر گوشت پردازش شده ۷۲
- شکل ۱۷-۳: تصاویر گوشت بازسازی شده با تعداد نقاط مختلف ۷۴
- شکل ۱۸-۳: تصویر گوشت بازسازی شده با در نظر گرفتن یک نقطه با مقدار تصادفی ۷۵
- شکل ۱۹-۳: تصویر گوشت بازسازی شده با در نظر گرفتن دو نقطه کنار هم با مقدار تصادفی ۷۵
- شکل ۲۰-۳: تصویر گوشت بازسازی شده با در نظر گرفتن چهار نقطه کنار هم با مقدار تصادفی ۷۵
- شکل ۲۱-۳: نمودار میزان خطا بر حسب درصد لو رفتگی اطلاعات ۷۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳: مقادیر محاسبه‌شده پارامترهای کیفیت تصویر با در نظر گرفتن تابع توزیع گاوسین ۶۴

جدول ۲-۳: مقادیر محاسبه‌شده پارامترهای کیفیت تصویر با در نظر گرفتن تابع توزیع یکنواخت ۶۴

جدول ۳-۳: مقادیر محاسبه‌شده پارامترهای کیفیت مربوط به تصاویر گوست تجربی ۶۶

جدول ۴-۳: مقادیر محاسبه‌شده پارامترهای کیفیت تصویر برای داده‌های تجربی ۷۲

مقدمه:

بر خلاف همبستگی مرتبه اول که یک اثر همدوس میدان الکترومغناطیسی است، همبستگی مرتبه دوم معمولاً به عنوان همبستگی آماری کلاسیک نوسانات شدت در نظر گرفته می‌شود. اولین آزمایش همبستگی مرتبه دوم توسط هانبری براون-تویس^۱ (HBT) در سال ۱۹۵۶ با دو نوع همبستگی متفاوت (زمانی و فضایی) صورت گرفت [۱-۳]. این آزمایش یک شگفتی در جامعه فیزیکدانان به وجود آورد. اکثر فیزیکدانان بر ماهیت کلاسیک این پدیده تاکید دارند و معتقدند که آزمایش HBT همبستگی آماری کلاسیک نوسانات شدت تابش را اندازه‌گیری می‌کند؛ اما عده‌ای دیگر بر این باورند که پدیده تداخل دوفوتونی اتفاق می‌افتد و همان‌طور که همبستگی مرتبه اول یک اثر همدوس میدان‌های الکتریکی است، همبستگی مرتبه دوم نیز یک اثر همدوس دامنه‌های احتمال دوفوتونی است.

ماهیت تصویرسازی گوست نیز بر مبنای اندازه‌گیری تابع همبستگی مرتبه دوم استوار است. در یک چیدمان تصویرسازی گوست، باریکه توسط یک شکافنده پرتو^۲ به دو باریکه یکسان (مرجع و جسمی) تقسیم می‌شود. یک باریکه به جسم برخورد کرده و با آن اندرکنش می‌کند و به آشکارساز تک-پیکسل (بوکت) که قدرت تفکیک فضایی ندارد، می‌رسد. باریکه دیگر به هدف برخورد نمی‌کند ولی به یک آشکارساز با قدرت تفکیک بالا (آرایه^۳ CCD یا آشکارساز حفره‌سوزنی^۴) برخورد می‌کند که خروجی چند پیکسلی به دست می‌دهد. در نتیجه از همبستگی متقابل دو باریکه نوری، تصویر جسم ایجاد می‌شود. دلیل به کار بردن اصطلاح "تصویر گوست"^۵ برای این پدیده از این امر

¹ Hanbury Brown-Twiss

² Beam splitter

³ Charged Coupled Device

⁴ Pinhole detector

⁵ Ghost image

ناشی می‌شود که خروجی هیچ‌کدام از آشکارسازها به تنهایی نمی‌تواند تصویری از جسم را بازسازی کند. اولین اثبات تجربی تصویرسازی گوشت در سال ۱۹۹۵ توسط پیتمن^۱ و گروهش [۴] گزارش شد. باریکه‌های مورد استفاده توسط این گروه، باریکه‌های آیدلر^۲ و سیگنال^۳ با قطبش‌های عمود بر هم هستند که توسط جوړشدگی فازی نوع II تبدیل پارامتری کاهشی خودبخودی^۴ (SPDC) ناشی از برخورد باریکه لیزری به یک کریستال غیرخطی تولید شده‌اند. این باریکه‌ها— که شامل زوج فوتون‌های درهم‌تنیده فرکانسی آیدلر- سیگنال هستند— توسط یک شکافنده پرتو پلاریزان از هم جدا شده و به عنوان سیگنال و مرجع در تصویرسازی گوشت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تصویرسازی گوشتی که پیتمن و گروهش به دست آوردند در واقع یک اثر کوانتومی است چرا که در تولید آن یک منبع نور در حالت کوانتومی به کار رفته است. در سال ۲۰۰۲ بنینک^۵ و گروهش [۵] نتایج خود را منتشر کردند که در آزمایش آن‌ها از جاروب یک جفت باریکه لیزری موازی، با جهت انتشار غیر همبسته استفاده شده بود. این گروه با انجام تصویرسازی گوشت با منبع کلاسیکی به صورت تجربی، نشان دادند که این تکنیک نیازی به درهم‌تنیدگی کوانتومی ندارد. اما در سال ۲۰۰۴ گاتی^۶ و گروهش [۶] با بررسی و مقایسه درهم‌تنیدگی و همبستگی کلاسیکی نشان دادند که در تصویربرداری گوشت، هر دو دیدگاه کلاسیکی و کوانتومی متناظرند.

تصویرسازی گوشت چه بر اساس اثر کوانتومی و چه بر اساس پدیده کلاسیکی دارای ویژگی‌های مشترک زیر است: (۱) باریکه مرجع یا آیدلر که هیچ برهمکنشی با جسم ندارد و به یک آشکارساز با قدرت تفکیک فضایی می‌رسد. (۲) باریکه جسمی یا سیگنال که از جسم عبور یا از آن

¹ Pittman

² Idler

³ Signal

⁴ Spontaneous Parametric Down Conversion

⁵ Bennink

⁶ Gatti

پراکنده می‌شود و توسط یک آشکارساز بوکت^۱ که قدرت تفکیک فضایی ندارد آشکارسازی می‌شود. (۳) هیچ‌کدام از آشکارسازها به تنهایی نمی‌توانند تصویری از جسم ایجاد کنند، بلکه تصویر جسم از آشکارسازی همزمان و محاسبه همبستگی متقابل دو باریکه بازسازی می‌شود. (۴) تصویرسازی گوشت یک پدیده غیرمحلی است. اما از جمله تفاوت‌های بین استفاده از منابع کوانتومی و کلاسیک در تصویرسازی گوشت این است که تصاویر حاصل از منابع کوانتومی به دلیل همدوسی بسیار بالای فوتون‌های درهم‌تنیده، دارای تباین ۱۰۰٪ هستند؛ این درحالی است که تابش حرارتی دارای ماکزیمم همبستگی ۵۰٪ است که باعث می‌شود تصاویر حاصل از منابع کلاسیکی همواره دارای یک پس‌زمینه یا نویز باشند. با این حال مشکلات و پیچیدگی‌های تولید فوتون‌های درهم‌تنیده باعث شده است که تصویرسازی گوشت با منبع نور حرارتی جایگزین مناسبی در کاربردهای عملی باشد [۷-۱۴].

روش‌های زیادی جهت غلبه بر محدودیت‌های ناشی از نویز و بهبود کیفیت تصاویر گوشت شبه‌حرارتی مطرح شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به تصویرسازی گوشت فشرده^۲، تصویرسازی گوشت تفاضلی^۳ و تصویرسازی گوشت نرمالیزه^۴ اشاره کرد. در تصویرسازی گوشت فشرده [۱۵] از یک الگوریتم مبتنی بر تخمین فشرده استفاده می‌شود که قادر به بازسازی یک تصویر N -پیکسل با تعداد اندازه‌گیری کمتر از N است. تصویرسازی گوشت تفاضلی [۱۶] امکان تصویربرداری از اجسامی که دارای جذب پایین هستند و همچنین اندازه‌گیری تابع عبور جسم در نواحی مستقل را فراهم می‌کند. اما تصویرسازی گوشت نرمالیزه [۱۷] از یک الگوریتم وزن‌دار برای بهبود کیفیت تصاویر استفاده می‌کند. همان‌طور که در مباحث قبلی اشاره شد، در تصویرسازی گوشت از یک منبع کوانتومی یا کلاسیکی با یک طول موج خاص استفاده می‌شود. اما تئوری استفاده از دو طول‌موج

¹ Bucket detector

² Compressive ghost imaging

³ Differential ghost imaging

⁴ Normalized ghost imaging

مختلف در تصویرسازی گوشت در سال ۲۰۰۹ مطرح شد [۱۸]. در این روش که به تصویرسازی گوشت دورنگ^۱ معروف است، بازوهای مرجع و جسمی دارای طول موج‌های متفاوتی هستند به طوری که تفکیک پذیری فضایی^۲ تصویر گوشت وابسته به هر دو طول موج خواهد بود. بهره‌گیری از منابع شبه حرارتی در تصویرسازی گوشت مشکلات مربوط به منابع کوانتومی را نداشت ولی باز هم پیچیدگی‌های مربوط به استفاده از دو پرتو در چیدمان تجربی یک مساله اساسی بود، تا اینکه در سال ۲۰۰۸ شاپیرو^۳ [۱۹] به صورت تئوری روشی را مطرح کرد که در آن تنها از یک آشکارساز تک-پیکسل استفاده می‌شد و نیازی به استفاده از آشکارساز با قدرت تفکیک بالا و شکافنده پرتو نبود. این روش که به تصویرسازی گوشت محاسباتی معروف است در سال ۲۰۰۹ توسط برومبرگ^۴ و گروهش [۲۰] به صورت تجربی به اثبات رسید. در این حالت پرتو لیزر پیوسته از یک مدولاتور فضایی نور^۵ (SLM) عبور داده می‌شود که ورودی‌های انتخابی برای ایجاد رفتار هم‌دوس به دست می‌دهد و چون نوسانات شدت معلوم هستند، بازوی مرجع را می‌توان با محاسبات عددی جایگزین کرد.

تا به اینجا روش‌هایی که معرفی شدند امکان بازسازی یک تصویر دوبعدی از اجسام را فراهم می‌کردند. اما نسخه سه‌بعدی تصویرسازی گوشت در سال ۲۰۱۳ توسط سان^۶ و گروهش [۲۱] ارائه شد. آن‌ها توانستند با استفاده از چندین آشکارساز تک-پیکسل که در موقعیت‌های مختلف قرار داده بودند، تصویر سه‌بعدی از یک جسم به دست آورند؛ در این روش، از هر آشکارساز یک تصویر دوبعدی در جهت‌های مختلف از جسم به دست می‌آید به طوری که از سایه‌های تصاویر می‌توان

¹ Two-color ghost imaging

² Spatial Resolution

³ Shapiro

⁴ Bromberg

⁵ Spatial Light Modulator

⁶ Sun

گرایان‌های سطح را به دست آورده و تصویر سه‌بعدی جسم را بازسازی کرد.

از مهم‌ترین کاربردهای تصویربرداری گوست، رمزنگاری نوری اطلاعات است که برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ توسط کلمنته^۱ مطرح شد [۲۲]. به طور کلی دو نوع سیستم رمزنگاری وجود دارد: سیستم‌های کلید متقارن و سیستم‌های کلید نامتقارن. الگوریتم متقارن از یک کلید برای رمزنگاری و رمزگشایی استفاده می‌کند اما سیستم‌های کلید نامتقارن دارای کلیدهای مختلفی برای رمزنگاری و رمزگشایی هستند. این سیستمها اجازه می‌دهند که یک جزء (کلید عمومی^۲) منتشر شود در حالیکه دیگری (کلید اختصاصی^۳) توسط صاحبش حفظ می‌شود. فرستنده پیام، متن را با کلید عمومی گیرنده کد می‌کند و گیرنده آن را با کلید اختصاصی خودش رمزگشایی میکند. به عبارتی تنها با کلید اختصاصی گیرنده می‌توان متن کد شده را به متن اولیه صحیح تبدیل کرد. الگوریتم رمزنگاری تصاویر گوست نیز یک الگوریتم نامتقارن است به این ترتیب که شدت‌های ثبت‌شده توسط آشکارساز تک-پیکسل به عنوان کلید عمومی و الگوهای شدت اعمال‌شده روی مدولاتور فضایی نور به عنوان کلید اختصاصی در نظر گرفته شده و بین دو کاربر متفاوت به اشتراک گذاشته می‌شود.

هدف اصلی این پایان‌نامه بررسی روش‌هایی است که بتوان به کمک آن‌ها هم کیفیت تصاویر گوست و هم امنیت اطلاعات رمزگذاری شده توسط سیستم تصویرسازی گوست را افزایش داد. در همین راستا، فصل اول از این پایان‌نامه به پیشینه تحقیق و بیان مفاهیم و فیزیک حاکم بر این نوع تصویربرداری اختصاص داده شده است. در فصل دوم مفاهیم و روش‌های تجربی و ابزارهای ریاضی مورد استفاده مطرح شده است و در نهایت فصل سوم به بحث و بررسی نتایج به دست آمده و پژوهش‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه مربوط است.

¹ Clemente

² Public key

³ private key

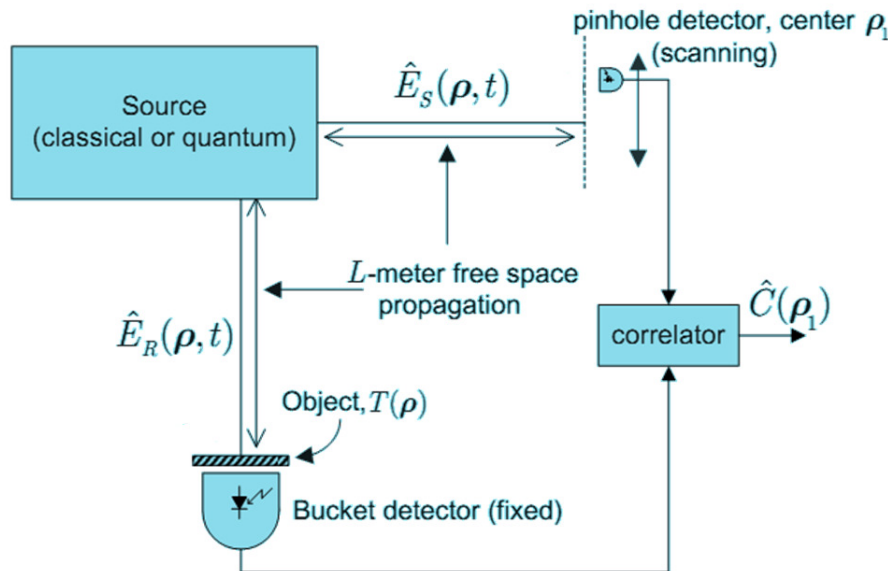
فصل اول

بررسی منابع

۱ فصل اول

۱-۱ مبانی تصویربرداری گوست

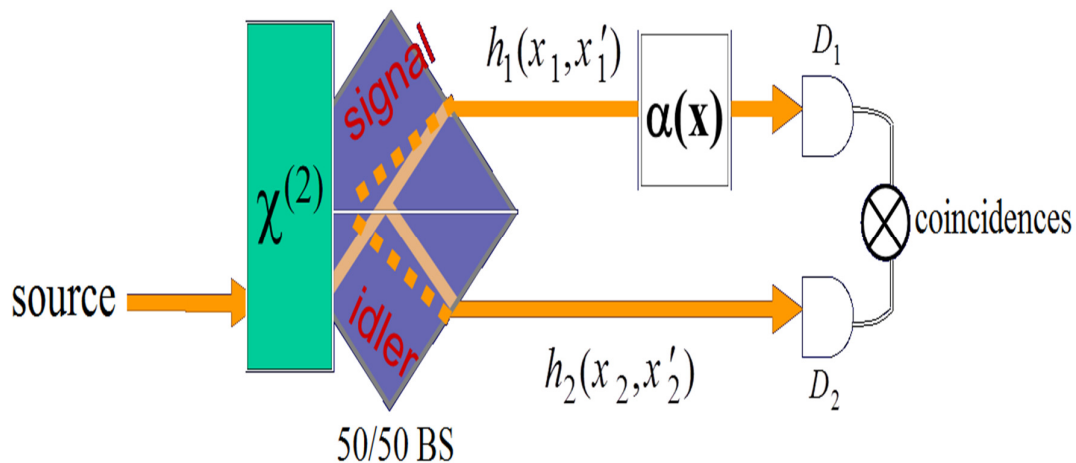
در تصویربرداری گوست از دو باریکه همبسته فضایی استفاده می‌شود که در دو مسیر جداگانه حرکت می‌کنند و معمولاً به عنوان بازوهای مرجع و جسمی شناخته می‌شوند. در بازوی جسمی، باریکه به جسم برخورد کرده و نور عبوری یا بازتابی از آن توسط یک آشکارساز تک-پیکسل که قدرت تفکیک فضایی ندارد، آشکارسازی می‌شود. در بازوی مرجع یک آشکارساز با قدرت تفکیک فضایی قرار دارد و اطلاعات مربوط به باریکه مرجع را که هیچ برخورد یا اندرکنشی با جسم ندارد را اندازه‌گیری می‌کند. در نتیجه تصویر گوست جسم با اندازه‌گیری تابع همبستگی متقابل شدت باریکه جسمی و باریکه مرجع به دست می‌آید. چیدمان تصویربرداری گوست در شکل ۱-۱ نشان داده شده است که در آن $E_R(\rho, t)$ و $E_S(\rho, t)$ به ترتیب میدان‌های مربوط به باریکه‌های جسمی و مرجع هستند.



شکل ۱-۱: چیدمان تصویربرداری گوست با دو باریکه [۲۳]

۱-۱-۱ تصویربرداری گوست با منبع کوانتومی

در اولین آزمایش تصویربرداری گوست از فوتون‌های درهم‌تنیده با قطبش‌های عمود بر هم استفاده می‌شد که توسط جورشدگی فازی نوع II تبدیل پارامتری کاهش خودبخودی تولید شده بودند. به دلیل ماهیت کوانتومی منبع مورد استفاده، ادعا می‌شد که تصویرسازی گوست یک اثر کوانتومی است و اندکی پس از آن به صورت تئوری مطرح شد که در همتندگی لازمه تصویربرداری کوانتومی است [۴, ۲۴, ۲۵]. شکل ۲-۱ چیدمان تصویربرداری گوست با منبع کوانتومی را نشان می‌دهد که در آن $h_1(x_1, x'_1)$ و $h_2(x_2, x'_2)$ به ترتیب نشان‌دهنده تابع عبور نوری بازوی جسمی و مرجع هستند.



شکل ۲-۱: چیدمان تصویربرداری گوست کوانتومی

در این حالت یک کریستال غیرخطی به عنوان منبع تولید زوج فوتون‌های درهم‌تنیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. با برخورد باریکه لیزری به کریستال غیرخطی، باریکه‌های آیدلر و سیگنال توسط جورشدگی فازی نوع II تبدیل پارامتری کاهش خودبخودی تولید شده و با استفاده از یک شکافنده پرتو پلاریزان از هم جدا می‌شوند و به عنوان باریکه‌های مرجع و جسمی در تصویرسازی گوست

مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فرآیند تبدیل پارامتری کاهشی خودبخودی، فوتون‌های مربوط به یک میدان پمپ با شدت بیشتر و با فرکانس مرکزی ω_0 در اثر اندرکنش غیرخطی با محیط به دو جفت فوتون با انرژی‌های کمتر و با فرکانس‌های مرکزی ω_1 و ω_2 (سیگنال و آیدلر) تقسیم می‌شوند که در مورد جورشدگی فازی نوع II، فوتون‌های سیگنال و آیدلر دارای قطبش‌های عمود بر هم هستند.

تابع عبور نوری بازوی جسمی و مرجع را به ترتیب با $h_1(x_1, x'_1)$ و $h_2(x_2, x'_2)$ نشان می‌دهیم. این توابع، انتشار میدان از صفحه عرضی x'_i به x_i را نشان می‌دهند که x'_i صفحه مربوط به وجه خروجی کریستال غیرخطی و x_i صفحه مربوط به آشکارسازها است. اگر عملگرهای پوش میدان^۱ مربوط به فوتون‌های سیگنال و آیدلر را در وجه خروجی کریستال غیرخطی با $b_1(x)$ و $b_2(x)$ نشان دهیم، تبدیل فوریه پوش‌های میدان به صورت زیر خواهد بود:

$$b_i(q) = \int (dx / 2\pi) e^{-iq \cdot x} b_i(x) \quad (1-1)$$

در این معادله، q نشان‌دهنده بردار موج عرضی است. در مورد فرآیند تبدیل پارامتری کاهشی خودبخودی آغاز شده با افت و خیزهای خلا، هیچ میدان سیگنال ($a_1(x)$) و آیدلری ($a_2(x)$) در وجه ورودی کریستال وجود نخواهد داشت. در حد تقریب موج تخت، عملگرهای پوش میدان در خروجی کریستال با عملگرهای ورودی به صورت زیر مرتبط خواهند بود [۲۶-۲۹]:

$$b_1(q) = U_1(q)a_1(q) + V_1(q)a_2^\dagger(-q) \quad (2-1)$$

$$b_2(q) = U_2(q)a_2(q) + V_2(q)a_1^\dagger(-q) \quad (3-1)$$

که U_i و V_i توابع بهره هستند. در واقع، تابع بهره یا فاکتور بهره یک تابع پاسخ فرکانسی، ارتباط

^۱The field envelope operators

دامنه‌ای بین دو مجموعه از داده‌های سری زمانی را به صورت تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. همچنین میدان در صفحات آشکارسازی از طریق رابطه زیر با میدان در وجه خروجی کریستال ارتباط دارد:

$$c_i(x_i) = \int dx'_i h_i(x_i, x'_i) b_i(x'_i) \quad (4-1)$$

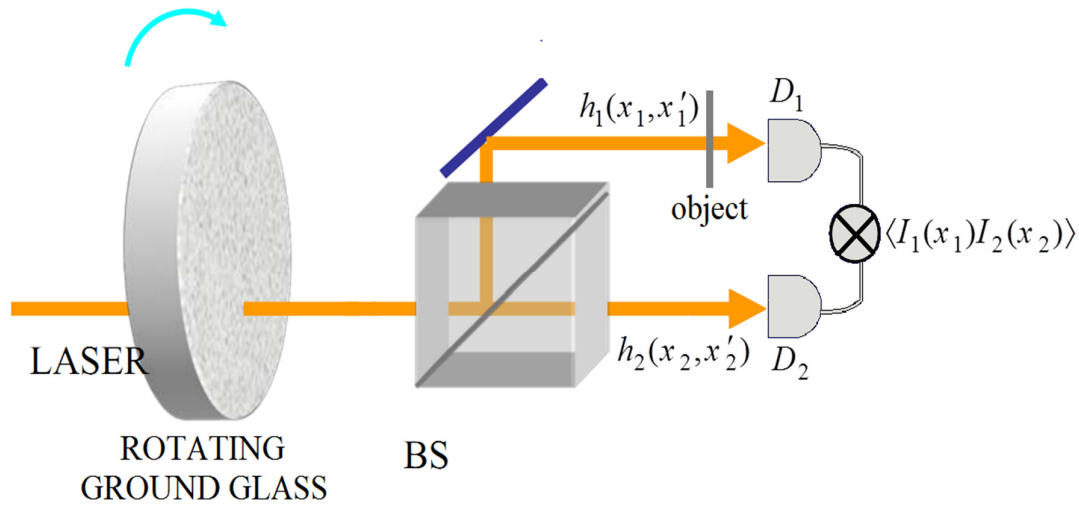
در نتیجه تابع همبستگی برای تصویربرداری گوشت کوانتومی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G(x_1, x_2) = \left| \iint dx'_1 dx'_2 h_1(x_1, x'_1) h_2(x_2, x'_2) \langle b_1(x'_1) b_2(x'_2) \rangle \right|^2 \quad (5-1)$$

که $\langle b_1(x'_1) b_2(x'_2) \rangle$ تابع همبستگی سیگنال-آیدلر است.

۱-۲-۱ تصویربرداری گوشت با منبع کلاسیکی

تصویربرداری گوشت با استفاده از دو باریکه لیزری همبسته در سال ۲۰۰۲ توسط بنینک و گروهش به انجام رسید [۵] و نشان داده شد که تصویر گوشت می‌تواند با استفاده از منبع نوری کلاسیکی به دست آید و نیازی به درهمتنیدگی کوانتومی نیست. بعد از آن استفاده از منابع حرارتی و شبه‌حرارتی در آزمایش‌های تصویرسازی گوشت رایج شد [۶, ۳۰-۳۳]. چیدمان تصویرسازی گوشت کلاسیکی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. در این روش الگوهای فضایی پرتوهای نور توسط شیشه مات چرخان تولید شده و روی باریکه حرارتی نقش می‌بندند و برای تولید دو باریکه غیرهمدوس فضایی یکسان، از یک شکافنده پرتو ۵۰/۵۰ استفاده می‌شود. در تصویربرداری گوشت حرارتی از یک میدان حرارتی $a(x)$ — که توسط آمار میدان گاوسین توصیف می‌شود — و یک شکافنده پرتو برای ایجاد دو باریکه همبسته فضایی $b_i(x)$ استفاده می‌شود. اگر ضرایب عبور و بازتاب مختلط شکافنده پرتو را به ترتیب با t و r نشان دهیم، میدان $b_i(x)$ بر حسب میدان ورودی $a(x)$ با استفاده از روابط ورودی-خروجی شکافنده پرتو استاندارد به دست خواهد آمد.



شکل ۳-۱. چیدمان تصویربرداری گوست کلاسیکی [۳۰]

در این روش نیز با استفاده از فرمولبندی مشابه با تصویربرداری گوست کوانتومی، تابع همبستگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$G(x_1, x_2) = |tr|^2 \left| \iint dx'_1 dx'_2 h_1^*(x_1, x'_1) h_2(x_2, x'_2) \langle a^\dagger(x'_1) a(x'_2) \rangle \right|^2 \quad (6-1)$$

در این رابطه $\langle a^\dagger(x'_1) a(x'_2) \rangle$ تابع همبستگی مرتبه دوم حرارتی در صفحه منبع است.

۳-۱-۱ تفکیک‌پذیری فضایی و کنتراست تصویر

تفکیک‌پذیری فضایی و کنتراست یک تصویر گوست شبه‌حرارتی، ویژگی‌های مربوط به همبستگی عرضی میانگین‌گیری شده آنسامبلی جریان‌های نوری هستند. میانگین‌گیری روی شات-نویز و افت و خیزهایی که در میدان‌های رسیده به آشکارسازها وجود دارند، انجام می‌گیرد. در واقع افت و خیزهای میدان از تصادفی بودن الگوهای تولید شده توسط شیشه مات چرخان ناشی می‌شود و در مورد میدان رسیده به آشکارساز بوکت، این افت و خیزها مربوط به ناهمواری‌های سطح جسم است.

$$\begin{aligned} \langle C(\rho_1) \rangle &= \langle i_1(t) i_2(t) \rangle = A_1 q^2 \eta^2 \int d\tau_1 \int d\tau_2 \int_{A_2} d\rho' \int d\rho_2 \dots \\ &\dots \int d\rho_3 \langle |E_1(\rho_1, \tau_1)|^2 E_1^*(\rho_2, \tau_2) E_1(\rho_3, \tau_2) \rangle \langle T^*(\rho_2) T(\rho_3) \rangle \\ &\times \frac{k_0 e^{-ik_0|\rho' - \rho_2|^2 / 2L}}{-i 2\pi L} \frac{k_0 e^{ik_0|\rho' - \rho_3|^2 / 2L}}{i 2\pi L} h(t - \tau_1) h(t - \tau_2) \end{aligned} \quad (7-1)$$

که در آن، ρ مختصات عرضی، $i_{1,2}(t)$ جریان‌های نوری اندازه‌گیری شده توسط آشکارسازهای مرجع و جسمی، $A_{1,2}$ ناحیه حساس به نور آشکارسازها، q بار الکترون، η بهره کوانتومی آشکارسازها، L فاصله جسم از شکافنده پرتو و $h(t)$ پاسخ زمانی آشکارسازها است. در این رابطه از فرض استقلال آماری $E_1(\rho, t)$ و $T(\rho)$ ، یعنی افت و خیزهای حاصل از عبور از شیشه مات و افت و خیزهایی که از سطح ناهموار جسم تولید شده‌اند، استفاده شده است [۳۴]. با استفاده از رابطه:

$$\langle T^*(\rho'_1) T(\rho'_2) \rangle = \lambda_0^2 \tau(\rho'_1) \delta(\rho'_1 - \rho'_2) \quad (8-1)$$

که λ_0 طول موج مرکزی باریکه و $\tau(\rho')$ ضریب بازتاب شدت جسم است. بنابراین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \langle C(\rho_1) \rangle &= \frac{A_1 A_2 q^2 \eta^2}{L^2} \int d\tau_1 \int d\tau_2 \dots \\ &\dots \int d\rho_2 \langle |E_1(\rho_1, \tau_1)|^2 |E_1(\rho_2, \tau_2)|^2 \rangle \tau(\rho_2) h(t - \tau_1) h(t - \tau_2) \end{aligned} \quad (9-1)$$

که به طور واضح نقش همبستگی شار فوتونی در شکل‌گیری تصویر گوست را نشان می‌دهد. در تحلیل حالت گاوسین، فرض می‌شود که میدان‌های مرجع و جسمی، میدان‌های تصادفی گاوسینی با میانگین صفر و مقادیر مختلط هستند و به‌طور کامل با تابع همبستگی مستقل از فاز مشخص شده‌اند.

$$\langle E_s^*(\rho_1, t_1) E_s(\rho_2, t_2) \rangle = \langle E_R^*(\rho_1, t_1) E_R(\rho_2, t_2) \rangle = K(\rho_1, \rho_2) R(t_2 - t_1) \quad (10-1)$$

که در آن

$$K(\rho_1, \rho_2) = \frac{2P}{\pi a_0^2} e^{-(|\rho_1|^2 + |\rho_2|^2) / a_0^2 - |\rho_1 - \rho_2|^2 / 2\rho_0^2} \quad (11-1)$$

همبستگی فضایی مدل گاوسین-شل^۱ با شار فوتونی P ، شعاع شدت a_0 و طول همدوسی ρ_0 است و رابطه

$$R(t_2 - t_1) = e^{-(t_2 - t_1)^2 / T_0^2} \quad (۱۲-۱)$$

نشان دهنده همبستگی زمانی نرمالیزه با زمان همبستگی T_0 است.

همچنین در تحلیل حالت گاوسین تصویربرداری گوست عبوری، می‌توان از تئوری عامل

گشتاور گاوسین^۲ استفاده کرد [۳۵، ۳۶]. در این حالت رابطه (۹-۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \langle C(\rho_1) \rangle &= \frac{A_1 A_2 q^2 \eta^2}{L^2} \int d\tau_1 \int d\tau_2 \dots \\ & \dots \int d\rho_2 [\langle |E_1(\rho_1, \tau_1)|^2 |E_1(\rho_2, \tau_2)|^2 \rangle + \left| \langle E_1^*(\rho_1, \tau_1) E_1(\rho_2, \tau_2) \rangle \right|^2] \\ & \times \tau(\rho_2) h(t - \tau_1) h(t - \tau_2) \end{aligned} \quad (۱۳-۱)$$

تصویربرداری گوست شبه‌حرارتی با نور ناهمدوس فضایی انجام می‌گیرد، یعنی شرط $\rho_0 \ll a_0$ در همبستگی فضایی مدل گاوسین-شل برقرار است. علاوه بر این، تصویربرداری گوست شبه‌حرارتی در مورد اجسامی که در فاصله‌های دورتر نسبت به منبع قرار دارند، با میدان دور که شرط $k_0 a_0 \rho_0 / 2L \ll 1$ غالب است، صورت می‌گیرد، پس داریم [۲۳]:

$$\langle E_1^*(\rho_1, t_1) E_1(\rho_2, t_2) \rangle = K'(\rho_1, \rho_2) R(t_2 - t_1) \quad (۱۴-۱)$$

یعنی انتشار فقط بر همدوسی فضایی تاثیر می‌گذارد که با رابطه زیر مدل گاوسین-شل را حفظ می‌کند:

^۱ Gaussian-Schell

^۲ Gaussian moment-factoring theorem