دفترچه راهنما

مجموعه اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2

فهرست

۱- مشخصات اصلی ۵
۱-۱- آشناسازی ۵
۱-۲- قابلیت‌ها ۵
۱-۳- کاربردها ۶
۲- مشخصات فنی ۶
۲-۱- مشخصات جابجاگر ۶
۲-۲- مشخصات نمایه‌سنج ۶
۲-۲-۱- پاسخ طیفی حسگر آرایه‌ای ۷
۲-۳- مشخصات لنز ۷
۲-۴- مشخصات آینه‌ها ۷
۲-۵- مشخصات فیلترها ۸
۳- بخش‌های دستگاه ۸
۳-۱- اجزاء نرم‌افزار ۸
۳-۲- چیدمان اپتیکی ۱۷
۴- راه‌اندازی ۱۸
۴-۱- امنیت ۱۸
۴-۲- نصب نرم‌افزار ۱۸
۴-۳- آماده‌سازی ۲۲
۴-۳-۱- نمایه سنجی ۲۲
۴-۳-۲- اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2 ..... ۲۳
۵- نمایه سنجی ۲۳
۵-۱- حسگر آرایه‌ای نیمه‌هادی ۲۳
۵-۲- نگاشت رنگی ۲۳
۵-۳- حالت ضبط ۲۳
۵-۳-۱- وضعیت قاب کامل (Full-frame) ۲۴
۵-۳-۲- وضعیت ناحیه موردنظر (Region of Interest) ۲۴
۵-۳-۳- وضعیت برش (Cropping) ۲۴

۴-۳-۵- وضعیت پرش (Skipping) ۲۴
۵-۳-۵- وضعیت ادغام (Binning) ۲۴
۴-۵- تنظیم زمان نورگیری ۲۴
۵-۵- تنظیم نرخ بهره ۲۵
۶-۵- تنظیم پارامترها به روش PID ۲۵
۱-۶-۵- تکنیک تنظیم پارامتر پیشنهادی ۲۶
۷-۵- تنظیم انحراف نور زمینه ۲۶
۸-۵- اندازه‌گیری مرکز پرتو ۲۶
۹-۵- تخمین پهنای پرتو ۲۷
۱۰-۵-اندازه‌گیری پهنای پرتو ۲۸
۱۱-۵-محاسبه پهنای پرتو گاوسی ایده‌آل ۲۸
۱-۱۱-۵-محاسبه یک‌بعدی پهنای پرتو ۲۸
۲-۱۱-۵-محاسبه دوبعدی پهنای پرتو ۲۹
۳-۱۱-۵-محاسبه پهنای پرتو بیضوی ۲۹
۴-۱۱-۵-محاسبه پهنا پرتو بیضی چرخیده ۲۹
۶- جابجاگر ۲۹
۱-۶- بازیابی مبدأ جابجاگر ۲۹
۲-۶- تعیین مبدأ مختصات مجازی ۳۰
۳-۶- بازگشت به مبدأ مختصات ۳۰
۴-۶- میزان گام حرکتی ۳۰
۵-۶- سرعت حرکت ۳۰
۷- پارامتر کیفی M^2 ۳۰
۱-۷- معرفی پارامتر کیفی M^2 ۳۱
۲-۷- معرفی استاندارد ISO-۱۱۱۴۶ ۳۱
۱-۲-۷- توزیع ویگنر (Wigner) ۳۱
۲-۲-۷- توان پرتو ۳۱
۳-۲-۷- ممان مرتبه اول توزیع ویگنر ۳۲
۴-۲-۷- ممان مرتبه دوم توزیع ویگنر ۳۲
۵-۲-۷- ماتریس پرتو ۳۳
۶-۲-۷- ارتباط ممان‌های مرتبه دوم با ویژگی‌های فیزیکی پرتو ۳۳
۷-۲-۷- قطر پرتو ۳۳
۸-۲-۷- محل کمر باریکه ۳۴

۹-۲-۷- طول رایلی ۳۴
۱۰-۲-۷- ضریب مؤثر انتشار پرتو ۳۴
۱۱-۲-۷- آستیگماتیسم ذاتی ۳۴
۱۲-۲-۷- پارامتر پیچش ۳۴
۳-۷- تنظیم پرتو ورودی ۳۴
۴-۷- نمونه‌برداری در مقاطع مختلف ۳۵
۱-۴-۷- اسکن دستی ۳۵
۲-۴-۷- اسکن خودکار ۳۵
۵-۷- اندازه‌گیری واگرایی و پارامتر کیفی M^2 ..... ۳۶
۱-۵-۷- رگرسیون چندجمله‌ای ۳۶
۲-۵-۷- محاسبه زاویه واگرایی ۳۷
۸- حالت آزمون ۳۷
۱-۸- آزمون پرتو گاوسی ۳۷
۲-۸- آزمون پرتو متحرک ۳۷
۳-۸- آزمون پارامتر کیفی M^2 ..... ۳۷

درباره سازنده

شرکت دانش‌بنیان نمایه پرتو آشا، در سال ۱۳۹۴، با هدف طراحی و تولید ابزار و تجهیزات اپتوالکترونیکی و اپتومکانیکی برنامه‌پذیر موردنیاز جامعهٔ علمی و صنعتی کشور، فعالیت خود را آغاز نمود و با بهره‌مندی از توان و دانش داخلی توانست طیف گسترده‌ای از این تجهیزات را طراحی و تولید نماید. از آنجایی که مهم‌ترین امر در صحت کارکرد تجهیزات اندازه‌گیری، کالیبره‌بودن و کوک‌پذیری آن‌ها است، این شرکت با طراحی و ساخت کالیبراتور دستگاه‌های توان‌سنجی اپتیکی، امکان کالیبراسیون‌های دوره‌ای را فراهم آورده است.

زمینه فعالیت

اصلی‌ترین زمینه فعالیت این شرکت در حوزه طراحی و تولید تجهیزات مرتبط با لیزر، اپتیک و فوتونیک است و به‌صورت کلی در زمینه‌های زیر قابل تقسیم‌بندی می‌باشد:

- راه‌انداز لیزر دیودی
- پایدارساز لیزر دیودی
- تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای لیزری مانند توان‌سنج، نمایه‌سنج، حسگر فوق‌سریع نیمه‌هادی
- انواع ماسک‌های لیتوگرافی
- جابجاگرهای خطی با راه‌انداز موتور پله‌ای
- کالیبراسیون تجهیزات توان‌سنجی و پروفایل‌متری
- طراحی و تولید نرم‌افزار برای کار با محصولات الکترواپتیکی و اپتومکانیکی برنامه پذیر

همکاری در پروژه‌ها

با توجه به توانمندی متخصصین شرکت در حوزه‌های مختلف مرتبط با فعالیت‌های شرکت، مراکز علمی و صنعتی می‌توانند جهت برون‌سپاری طراحی و ساخت بخش‌های مختلف پروژه‌های خود با ما تماس برقرار نمایند.

ازجمله خدماتی که توسط این شرکت ارائه می‌شود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- طراحی و تولید نرم‌افزارهای کنترلی
- رابط‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری جهت اتصال محصولات شرکت با سایر دستگاه‌ها
- راه‌اندازهای کنترل جریان و کنترل ولتاژ برای کاربردهای خاص
- کالیبراسیون دستگاه‌های توان‌سنجی و پروفایل‌متر

سفارشی‌سازی

طراحی تمامی محصولات جهت کاربردهای متعارف بهینه‌سازی گردیده‌اند. علاوه بر این مشتریان می‌توانند برای کاربردهای دیگر که در آن‌ها نیاز به بازطراحی است نسبت به طرح مسأله با کارگروه فنی شرکت اقدام نمایند تا پس از امکان‌سنجی‌های مربوطه، مراحل ساخت پیگیری گردد.

۱- مشخصات اصلی

۱-۱- آشناسازی

در اغلب منابع نوری لیزری، توزیع شدت در همه‌ی نقاط راستای انتشار، یکسان نیست. ازاین‌رو مطالعه و بررسی چگونگی توزیع شدت در راستای انتشار منابع لیزری، همواره از مسائل حائز اهمیت در استفاده از منابع نوری لیزری است. دستگاه نمایه‌سنج یک دستگاه اندازه‌گیری ابزار دقیق برای اندازه‌گیری چگونگی توزیع شدت در صفحه عمود بر راستای انتشار است.

به کمک این دستگاه می‌توان شکل باریکه لیزر و مقدار شدت نقاط مختلف لکه را بررسی نمود. در این دستگاه از یک آرایه‌ی دوبعدی از حسگرهای نیمه‌هادی استفاده شده است. بنابراین با اندازه‌گیری شدت تابش دریافتی هر جزء می‌توان شکل باریکه و توزیع شدت در آن را اندازه‌گیری نمود.

در صورتیکه باریکه لیزر توسط ادوات اپتیکی به صورت همگرا منتشر شود، پیش از رسیدن به حالت واگرا، در محلی به نام کمر باریکه به کوچک‌ترین پهنای خود می‌رسد. متناسب با پهنای کمر باریکه و زاویه واگرایی، پارامتر دیگری به نام طول رایلی تعریف می‌گردد. در اغلب کاربردهای لیزر، علاوه‌بر توان و توزیع شدت، پارامترهای دیگری مانند پهنای پرتو در کمر باریکه و طول رایلی بسیار حائز اهمیت هستند. به همین دلیل پارامتر کیفی M^2 تعریف می‌گردد. با محاسبه این پارامتر می‌توان اطلاعات بیشتری از چگونگی انتشار باریکه در فضای آزاد بدست آورد. برای اندازه‌گیری این پارامتر کیفی، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده‌است مانند:

- دیافراگم متغیر (Variable aperture)
- تیغه متحرک (Variable knife-edge)
- شکاف متحرک (Variable slit)

در این دستگاه مطابق استاندارد ISO-11146، به کمک یک جابجاگر و یک حسگر پروفایل‌متر، توزیع چگالی توان باریکه در مقاطع مختلفی از میدان‌های دور و نزدیک اندازه‌گیری شده و با برازش موردنیاز روی داده‌های بدست‌آمده، زاویه واگرایی و پارامتر کیفی M^2 محاسبه می‌گردد.

ابعاد و رزولوشن پیکسل‌های حسگر نمایه‌سنج و لنز استفاده‌شده در این دستگاه، متناسب با محدوده عملکرد دستگاه انتخاب شده است و لازم است متناسب با کاربرد موردنظر بهینه گردد. همچنین تضعیف و ترازمندی پرتو ورودی به عهده کاربر بوده و در صحت اندازه‌گیری‌های انجام شده بسیار مؤثر است. این دستگاه برای پرتوهای آستیگماتیک عمومی طراحی شده است و قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای باریکه با توزیع چگالی توان غیر گاوسی را ندارد.

۱-۲- قابلیت‌ها

- قابلیت‌های نمایه‌سنج
  - امکان تنظیم زمان نورگیری (Integration Time)
  - امکان تنظیم ضریب تقویت (Gain)
  - امکان تنظیم خودکار زمان نورگیری و ضریب تقویت (به روش PID)
  - امکان تنظیم نرخ میانگین‌گیری
  - امکان انتخاب نگاشت رنگی (Color Map)
  - تشخیص خودکار مرکز و پهنای پرتو
  - اندازه‌گیری پهنای پرتو
  - ارائه نمودار توزیع شدت برحسب مکان

- ارائه گراف پایداری زمانی، توانی و مکانی (طبق سفارش)
- امکان حذف نور پس زمینه (طبق سفارش)

۳-۱- کاربردها

- بررسی توان پرتو فرودی و کیفیت سنجی منابع نوری (M^2-Factor)
- اندازه‌گیری زاویه واگرایی یا همگرایی باریکه لیزر
- اندازه‌گیری دقیق جابجایی پرتو

۲- مشخصات فنی

۲-۱- مشخصات جابجاگر

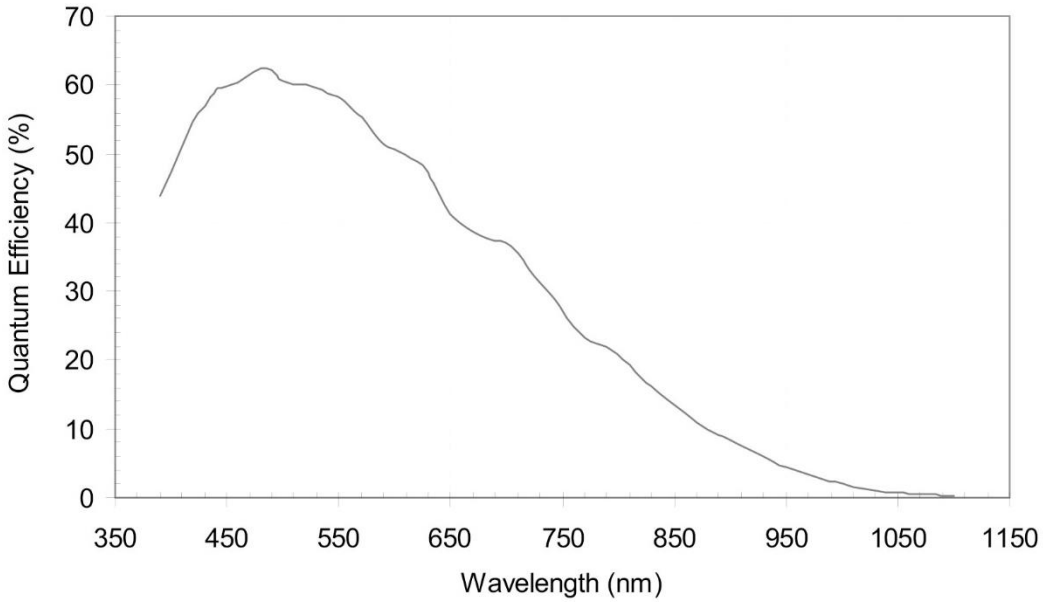
ویژگی	مقدار	واحد
طول جابجایی	270	mm
مسیر اپتیکی	120~660	mm
گام تغییر مسیر اپتیکی	2	µm
تکرارپذیری جابجایی	<10	µm
ولتاژ ورودی	12	V
جریان ورودی	2	A

۲-۲- مشخصات نمایه‌سنج

ویژگی	مقدار	واحد
نوع حسگر	Monochrome	-
ابعاد پیکسل	2.2 × 2.2	μm^2
رزولوشن	2592 × 1944	px
سطح حساس حسگر	4.3 × 5.7	mm^2
نرخ تجدیدپذیری	<7	fps
کمینه زمان نورگیری	60	µs
گام تنظیم زمان نورگیری	60	µs
نرخ بهره	1x~16x	-
بیشینه توان پرتو قابل‌اندازه‌گیری	10	mW
امکان انتخاب محدوده موردنظر	دارد	-
ارتباط با رایانه	USB2.0 – TypeB	-
بازه حساسیت (بیشتر از **10%**)	400~1050	nm
ابعاد	40×45×45	mm^3

۲-۲-۱- پاسخ طیفی حسگر آرایه‌ای

حسگر نمایه‌سنج دوبعدی تا زمانی که اشباع نشده باشد نسبت به توان پرتو تابشی به صورت نسبتاً خطی عمل می‌کند. اما با تغییر طول‌موج، توان جذب شده توسط هر پیکسل مطابق نمودار زیر تغییر می‌کند. در این نمودار محور افقی طول موج و محور عمودی حساسیت نسبی پیکسل‌ها نسبت به بیشینه حساسیت (در طول موج ۵۱۰ نانومتر) است.



۲-۳- مشخصات لنز

ویژگی	مقدار	واحد
نوع لنز	Singlet	-
قطر لنز	2	inch
فاصله کانونی	300	mm
لایه‌نشانی ضد بازتاب	ندارد	-
بازه طول‌موجی	400~1100	nm

۲-۴- مشخصات آینه‌ها

ویژگی	مقدار	واحد
جنس زیرلایه	BK7	-
جنس لایه‌نشانی	Silver	-
ضخامت لایه‌نشانی	~100	nm
لایه‌نشانی ضد بازتاب	ندارد	-
آستانه تخریب	<10	J/mm²

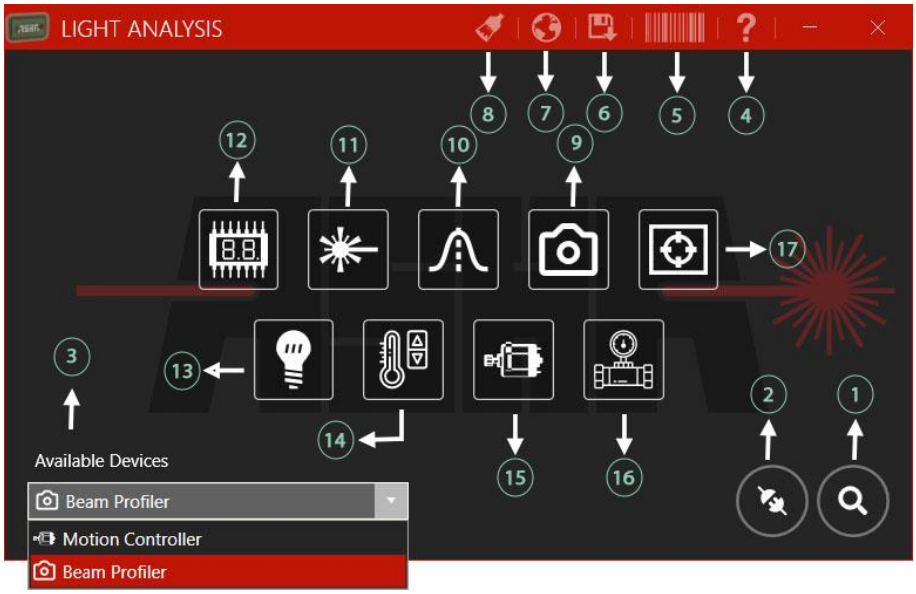
۵-۲- مشخصات فیلترها

ویژگی	مقدار	واحد
جنس زیرلایه	BK7	-
نوع فیلتر	Reflective	-
چگالی نوری (OD)	3	-
بازه طول‌موجی	400~1100	nm
آستانه تخریب	<10	mJ/mm²

۳- بخش‌های دستگاه

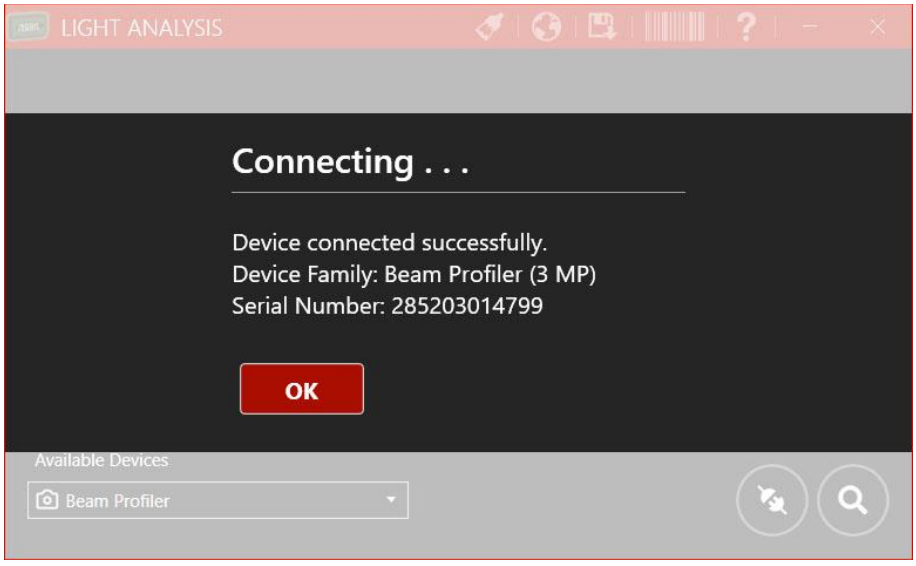
۳-۱- اجزاء نرم‌افزار

برای برقراری ارتباط با دستگاه لازم است پس از اتصال کابل نمایه‌سنج و جابجاگر به رایانه، دکمه جستجو فشرده شود و پس از شناسایی هر دو دستگاه، دستگاه نمایه‌سنج از میان گزینه‌ها انتخاب شود. ارتباط با جابجاگر ازطریق پنجره نمایه‌سنج میسر خواهد بود.



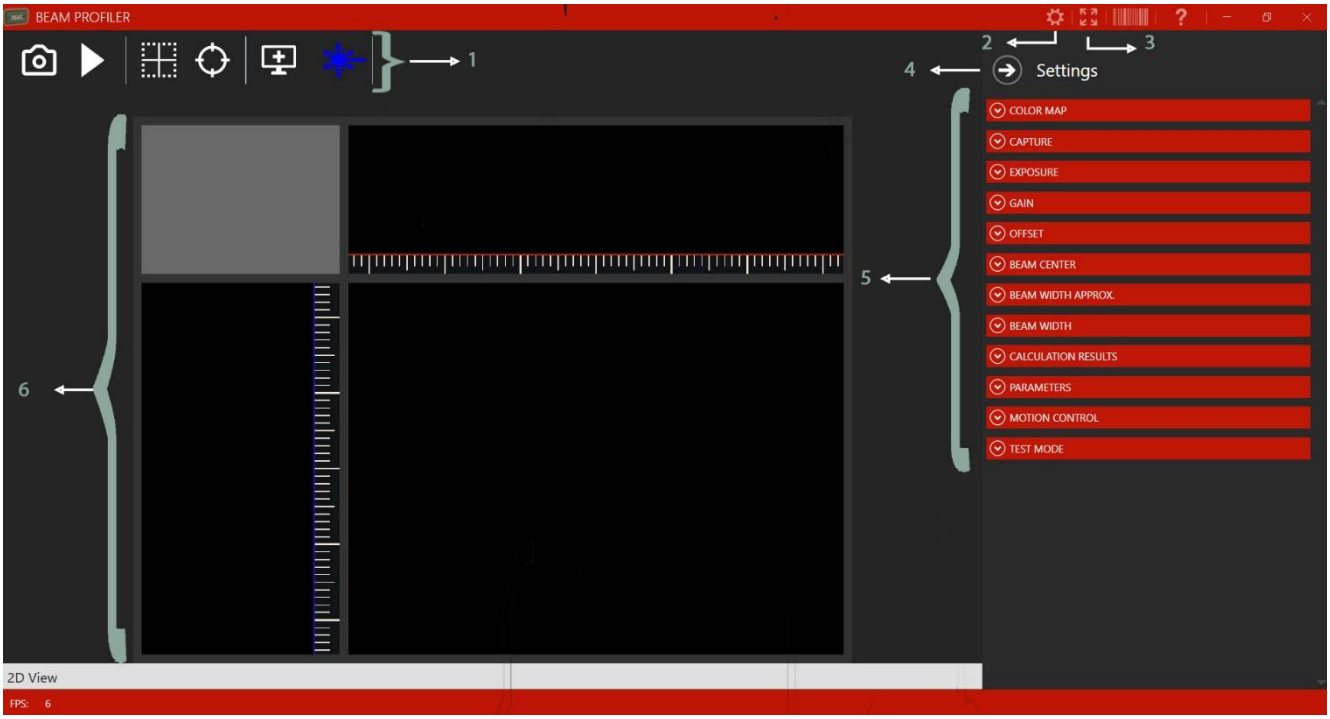
شکل ۱

۱- جستجوی دستگاه‌های متصل شده
۲- اتصال به دستگاه انتخاب شده
۳- لیست دستگاه‌های شناسایی شده
۴- راهنما
۵- مشخصات نرم‌افزار
۶- دریافت به‌روزرسانی
۷- تنظیم زبان (راست‌کلیک کنید)
۸- تنظیم رنگ زمینه
۹ الی ۱۷- دریافت مشخصات محصولات



درصورتیکه ارتباط با دستگاه به درستی برقرار گردد، پیام روبرو شامل نام و سریال دستگاه متصل شده نمایش داده خواهد شد. پس از تأیید این پیام، پنجره حسگر نمایه‌سنج نشان داده‌خواهد شد.

شکل ۲

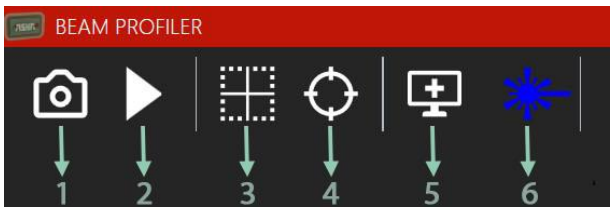


شکل ۳

پس از برقراری ارتباط، پنجره حسگر نمایه‌سنج (مطابق شکل ۳) باز می‌شود. این پنجره از سه جزء کلی تشکیل شده است.

۱- نوار ابزار
۲- باز کردن و بستن منو تنظیمات
۳- وضعیت نمایش تمام صفحه
۴- بستن منو تنظیمات
۵- پارامترهای قابل تنظیم
۶- پروفایل پرتو تابشی

نوار ابزار

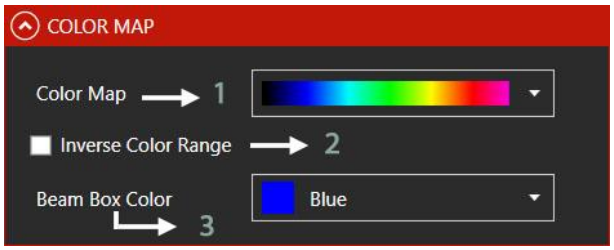


شکل ۴

۱- ذخیره‌سازی پروفایل پرتو
۲- راه‌اندازی / توقف حسگر
۳- تنظیم مرکز پرتو
۴- روش محاسبه مرکز پرتو
۵- تنظیم المان‌های صفحه نمایش
۶- وضعیت سطح اشباع حسگر

نوع

تنظیمات نگاشت رنگی



شکل ۵

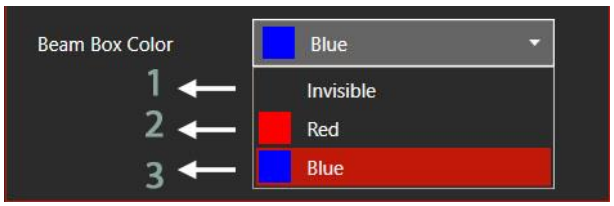
۱- انتخاب نوع نگاشت رنگی
۲- معکوس‌سازی نگاشت رنگی
۳- تنظیم رنگ کادر نمایانگر حاشیه باریکه

رنگ کادر حاشیه پروفایل باریکه

۱- عدم نمایش کادر حاشیه

۲- نمایش کادر به رنگ قرمز

۳- نمایش کادر به رنگ آبی



شکل ۶

تنظیمات نگاشت رنگی

۱- نگاشت سیاه و سفید (۸ بیتی)

۲- نگاشت رنگی سیاه، قرمز، زرد (۲۴ بیتی)

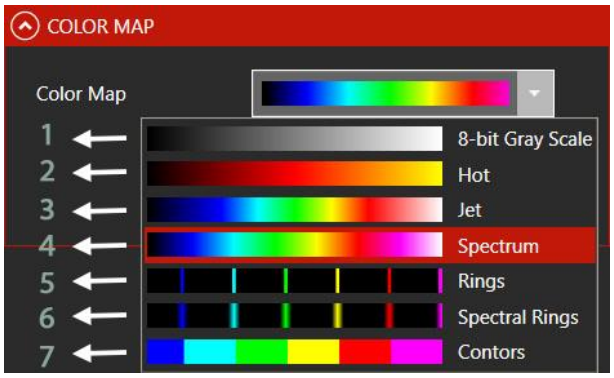
۳- نگاشت رنگی سیاه، آبی، سبز، زرد، قرمز، سفید (۲۴ بیتی)

۴- نگاشت رنگی سیاه، آبی، سبز، زرد، قرمز، بنفش،سفید (۲۴ بیتی)

۵- کانتورهای هم شدت حلقوی

۶- کانتورهای هم شدت حلقوی پهن

۷- کانتورهای هم شدت آستانه‌ای



شکل ۷

تنظیمات دریافت داده

۱- حالت دریافت داده

۲- رزولوشن نمایه

۳- نمونه‌برداری (سفارشی)

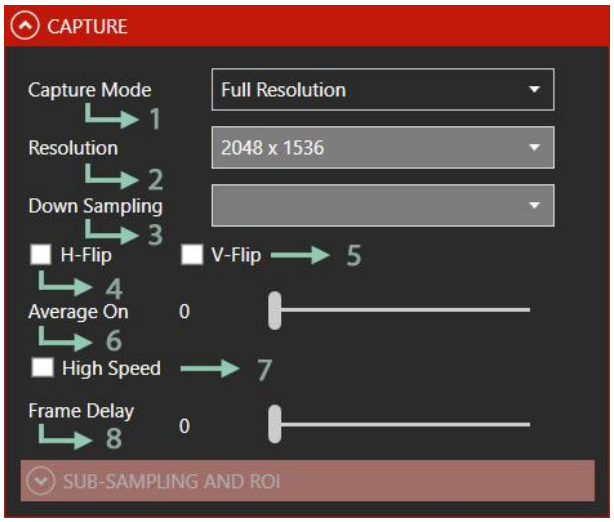
۴- قرینه‌سازی افقی نمایه

۵- قرینه‌سازی عمودی نمایه

۶- میانگین‌گیری (سفارشی)

۷- وضعیت کاری پرسرعت (وابسته به حسگر)

۸- تأخیر در دریافت داده (وابسته به حسگر)



شکل ۸

حالت دریافت داده

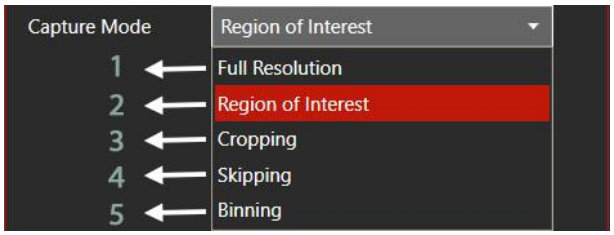
۱- وضوح کامل

۲- انتخاب منطقه موردنظر

۳- برش

۴- پرش

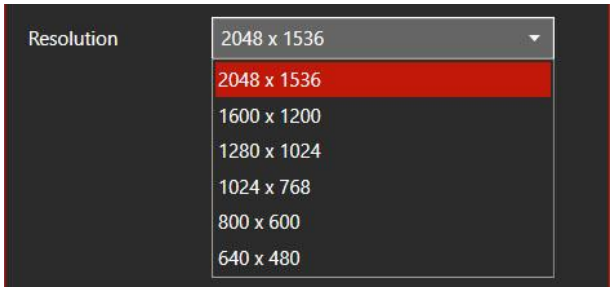
۵- ادغام



شکل ۹

رزولوشن نمایه

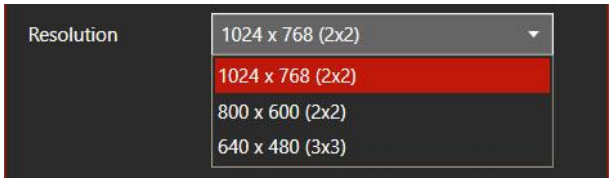
در هر حسگر، علاوه‌بر وضعیت کاری وضوح کامل، امکان دریافت اطلاعات با رزولوشن‌های پایین‌تر نیز وجود دارد. نحوه خواندن داده‌ها در رزولوشن‌های پایین‌تر به حالت دریافت داده وابسته است.



شکل ۱۰

تنظیمات رزولوشن در حالت ادغام

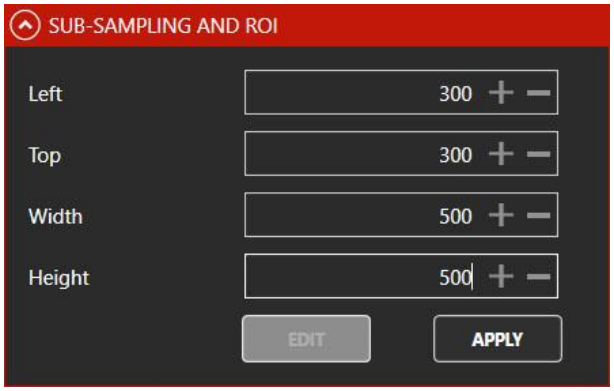
در حالت دریافت داده ادغام، متناسب با ویژگی‌های حسگر، امکان ادغام داده‌های دو یا چند پیکسل که در همسایگی یکدیگر هستند وجود دارد. ادغام داده‌ها می‌تواند به صورت حاصل‌جمع و یا میانگین‌گیری انجام شود (وابسته به نوع حسگر).



شکل ۱۱

تنظیمات انتخاب منطقه موردنظر

در حالت دریافت داده از منطقه موردنظر، امکان تعریف ناحیه مستطیل‌شکل وجود دارد. با توجه به امکان کاهش قابل توجه رزولوشن در این حالت، امکان افزایش نرخ تجدیدپذیری به شکل قابل ملاحظه‌ای فراهم می‌شود. حذف بخش‌های زائد سطح حسگر می‌تواند علاوه‌بر حذف نویزهای ناخواسته، حجم محاسبات را نیز کاهش دهد.



شکل ۱۲

تنظیمات زمان نورگیری

۱ الی ۳- تنظیم زمان نورگیری

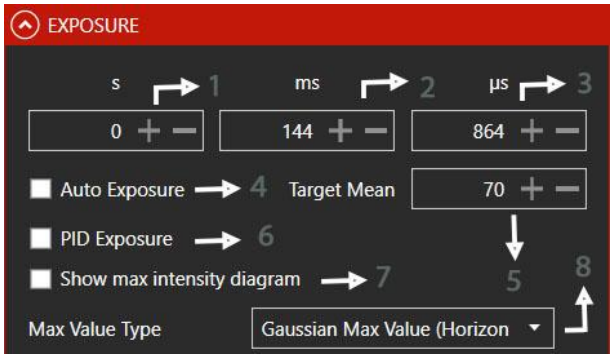
۴- زمان نورگیری خودکار

۵- سطح میانگین بهینه برای محاسبه خودکار زمان نورگیری

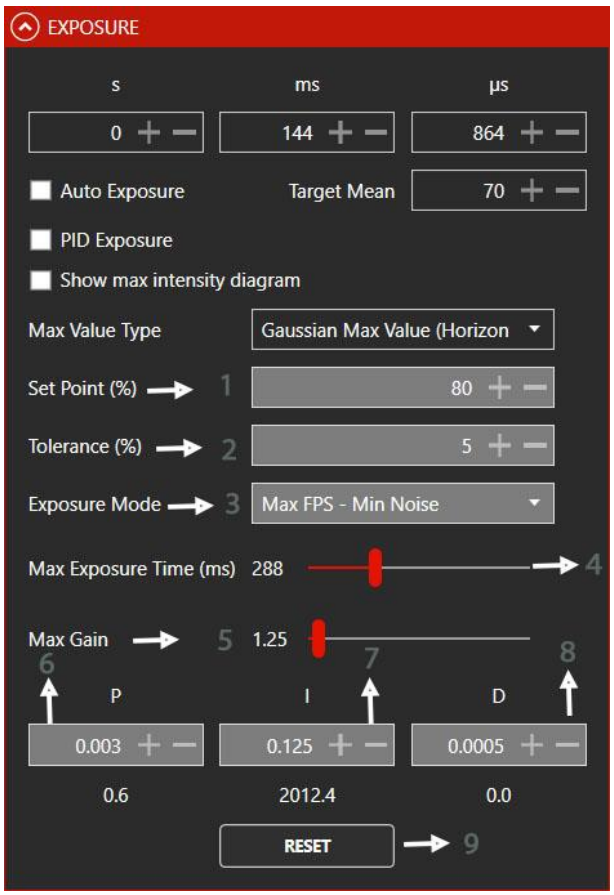
۶- محاسبه زمان نورگیری به روش PID

۷- نمایش نمودار بیشینه شدت پیکسل

۸- نحوه استخراج مقدار بیشینه پیکسل‌ها



شکل ۱۳



شکل ۱۴

تنظیمات محاسبه زمان نورگیری و نرخ بهره به روش PID

۱- مقدار بیشینه پیکسل ایده‌آل (در روش PID)

۲- بازه نوسان قابل قبول برای بیشینه پیکسل (در روش PID)

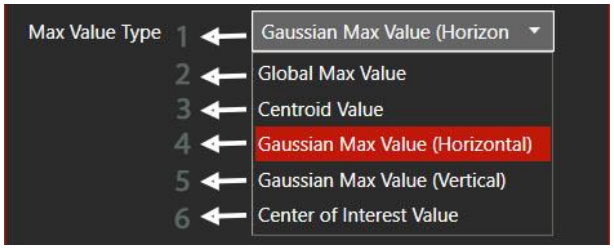
۳- نحوه محاسبه زمان نورگیری (در روش PID)

۴- بیشینه زمان نورگیری قابل قبول

۵- بیشینه نرخ بهره قابل قبول

۶ الی ۸- ضرایب PID

۹- ازسرگیری محاسبات PID



شکل ۱۵

مقدار بیشینه پیکسل ایده‌آل (در روش PID)

۱- انتخاب بیشینه مقدار دریافتی از حسگر

۲- مقدار پیکسل مرکز پرتو

۳- مقدار بیشینه نمودار فیت گاوسی افقی

۴- مقدار بیشینه نمودار فیت گاوسی عمودی

۵- مقدار پیکسل انتخابی (دلخواه)

شکل ۱۶

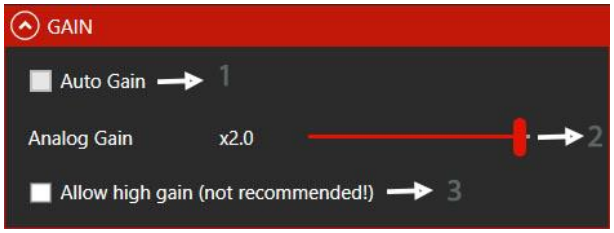
نحوه محاسبه زمان نورگیری (در روش PID)

۱- بدون محدودیت در زمان نورگیری و نرخ بهره

۲- بهینه‌سازی نرخ تجدیدپذیری (با محدودسازی زمان نورگیری)

۳- کاهش نویز (با محدودسازی نرخ بهره)

۴- بهینه‌سازی نرخ تجدیدپذیری و کاهش نویز



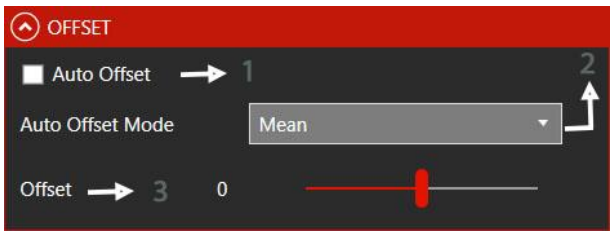
شکل ۱۷

تنظیمات نرخ بهره

۱- تنظیم خودکار نرخ بهره

۲- نرخ بهره

۳- مجوز کارکرد حسگر با نرخ بهره بالا (احتمال افزایش نویز)



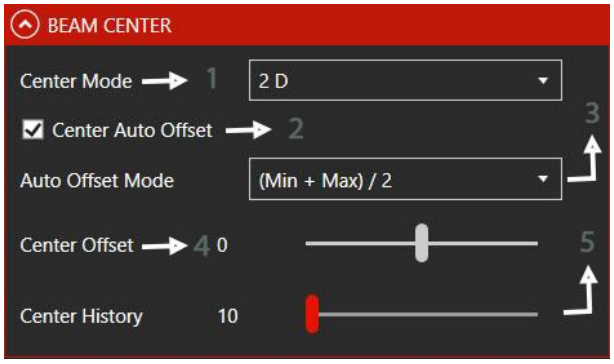
شکل ۱۸

تنظیمات انحراف نور زمینه

۱- محاسبه خودکار انحراف نور زمینه

۲- روش محاسبه خودکار انحراف نور زمینه

۳- انحراف نور زمینه



شکل ۱۹

تنظیمات مرکز باریکه

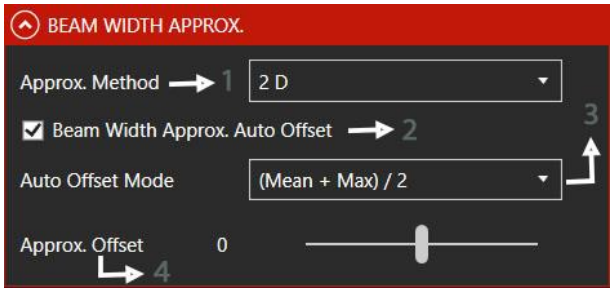
۱- روش محاسبه مرکز باریکه

۲- محاسبه خودکار انحراف نور زمینه هنگام یافتن مرکز باریکه

۳- روش محاسبه خودکار انحراف نور زمینه

۴- انحراف نور زمینه هنگام یافتن مرکز باریکه

۵- تعداد داده‌های ذخیره‌شده از تاریجچه مختصات مرکز باریکه



شکل ۲۰

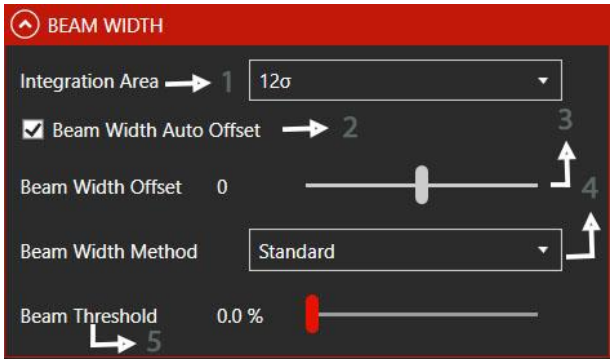
تنظیمات تخمین پهنای باریکه

۱- روش محاسبه تخمین پهنای باریکه

۲- محاسبه خودکار انحراف نور زمینه هنگام تخمین پهنای باریکه

۳- روش محاسبه خودکار انحراف نور زمینه

۴- انحراف نور زمینه هنگام تخمین پهنای باریکه



شکل ۲۱

تنظیمات پهنای باریکه

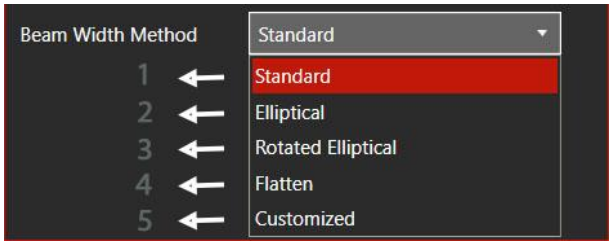
۱- محدوده انجام محاسبات پهنای پرتو با توجه به پهنای تخمینی

۲- محاسبه خودکار انحراف نور زمینه هنگام محاسبه پهنای باریکه

۳- انحراف نور زمینه هنگام محاسبه پهنای باریکه

۴- روش محاسبه پهنای باریکه

۵- آستانه بیشینه شدت پیکسل برای محاسبه پهنای باریکه



شکل ۲۲

روش‌های محاسبه پهنای باریکه

۱- روش استاندارد برای پرتوهای غیرآستیگماتیک (ISO-11146)

۲- پرتو بیضوی

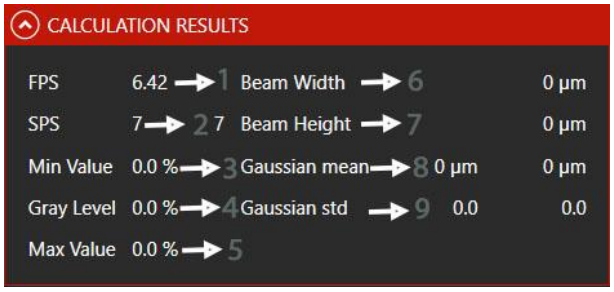
۳- پرتو بیضوی چرخیده

۴- روش یک بعدی

۵- روش سریع

محاسبات لحظه‌ای

۱- نرخ تخمینی تجدیدپذیری
۲- نرخ تجدیدپذیری
۳- کمینه شدت پیکسل‌ها
۴- میانگین شدت پیکسل‌ها
۵- بیشینه شدت پیکسل‌ها
۶- پهنای پرتو در محور افقی
۷- پهنای پرتو در محور عمودی
۸- انحراف مرکز پرتو از مرکز حسگر
۹- نیم‌پهنای فیت گاوسی



شکل ۲۳

ذخیره و بازیابی تنظیمات

۱- بازخوانی تنظیمات از حافظه حسگر
۲- بازنشانی تنظیمات حسگر به تنظیمات کارخانه
۳- ذخیره‌سازی تنظیمات در حافظه حسگر
۴- بازخوانی تنظیمات از حافظه سیستم
۵- ذخیره‌سازی تنظیمات در حافظه سیستم

شکل ۲۴

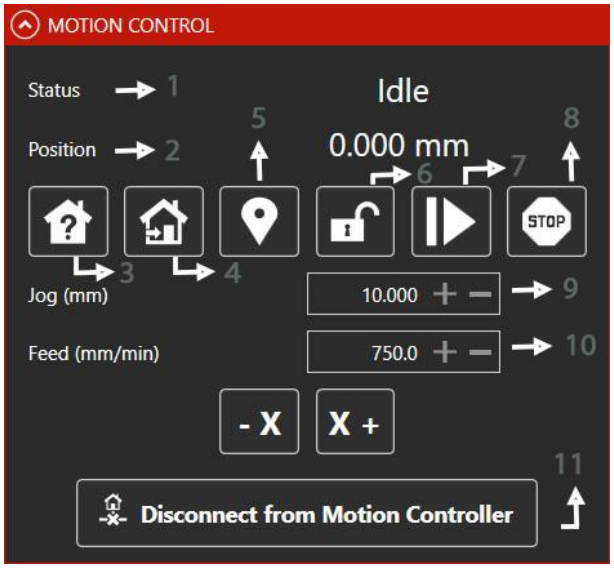
تنظیمات جابجاگر

۱- اتصال به جابجاگر

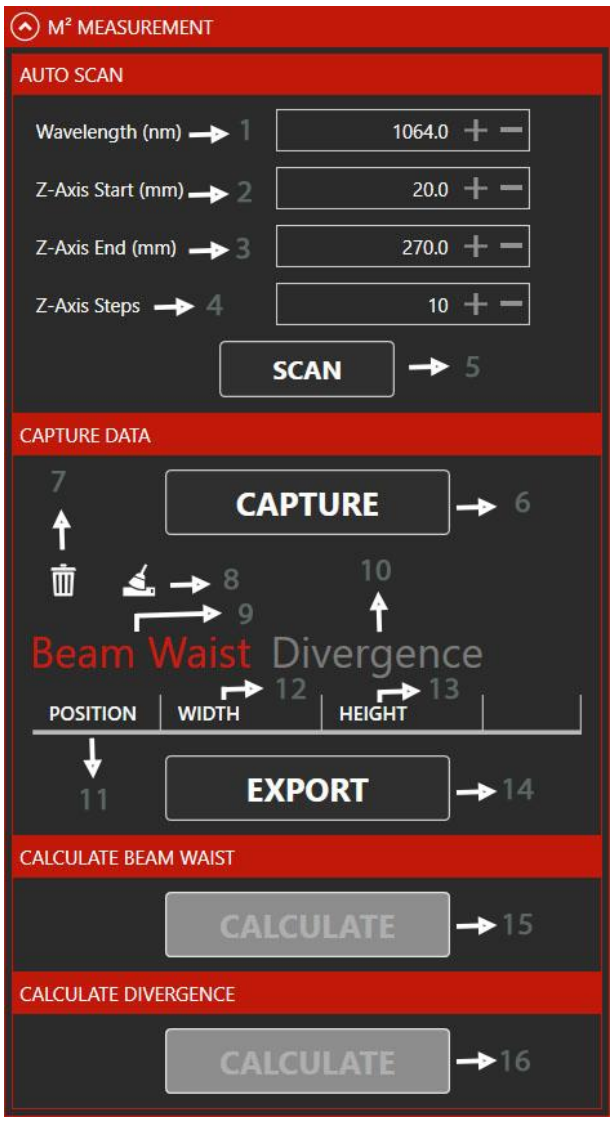
شکل ۲۵

تنظیمات جابجاگر

۱- وضعیت جابجاگر
۲- موقعیت جابجاگر
۳- بازیابی مبدأ مختصات جابجاگر
۴- بازگشت جابجاگر به مبدأ مختصات
۵- ذخیره‌سازی موقعیت فعلی به عنوان مبدأ مختصات
۶- آزادسازی / قفل‌کردن جابجاگر
۷- ادامه‌دادن به حرکت
۸- توقف جابجاگر
۹- گام جابجایی
۱۰- سرعت جابجایی
۱۱- قطع ارتباط با جابجاگر



شکل ۲۶



شکل ۲۷

محاسبات پارامتر کیفی M^2

اسکن خودکار پروفایل باریکه در مقاطع مختلف

۱- طول‌موج پرتو تابشی

۲- مختصات شروع داده‌گیری

۳- مختصات پایان داده‌گیری

۴- تعداد توقف‌ها میان نقاط شروع و پایان

۵- آغاز داده‌خوانی

۶- ذخیره پروفایل موقعیت فعلی

۷- حذف گزینه انتخابی

۸- حذف تمام داده‌های دریافتی

۹- مشخصات دریافتی برای کمر باریکه

۱۰- مشخصات دریافتی برای زاویه واگرایی

۱۱- موقعیت (فاصله حسگر از لنز در محور انتشار)

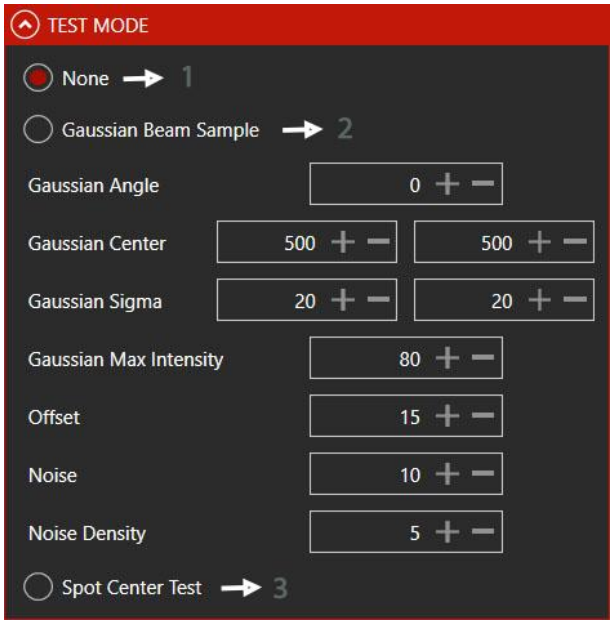
۱۲- پهنای افقی باریکه

۱۳- پهنای عمودی باریکه

۱۴- ذخیره‌سازی داده‌های دریافتی

۱۵- انجام محاسبات کمر باریکه

۱۶- انجام محاسبات زاویه واگرایی



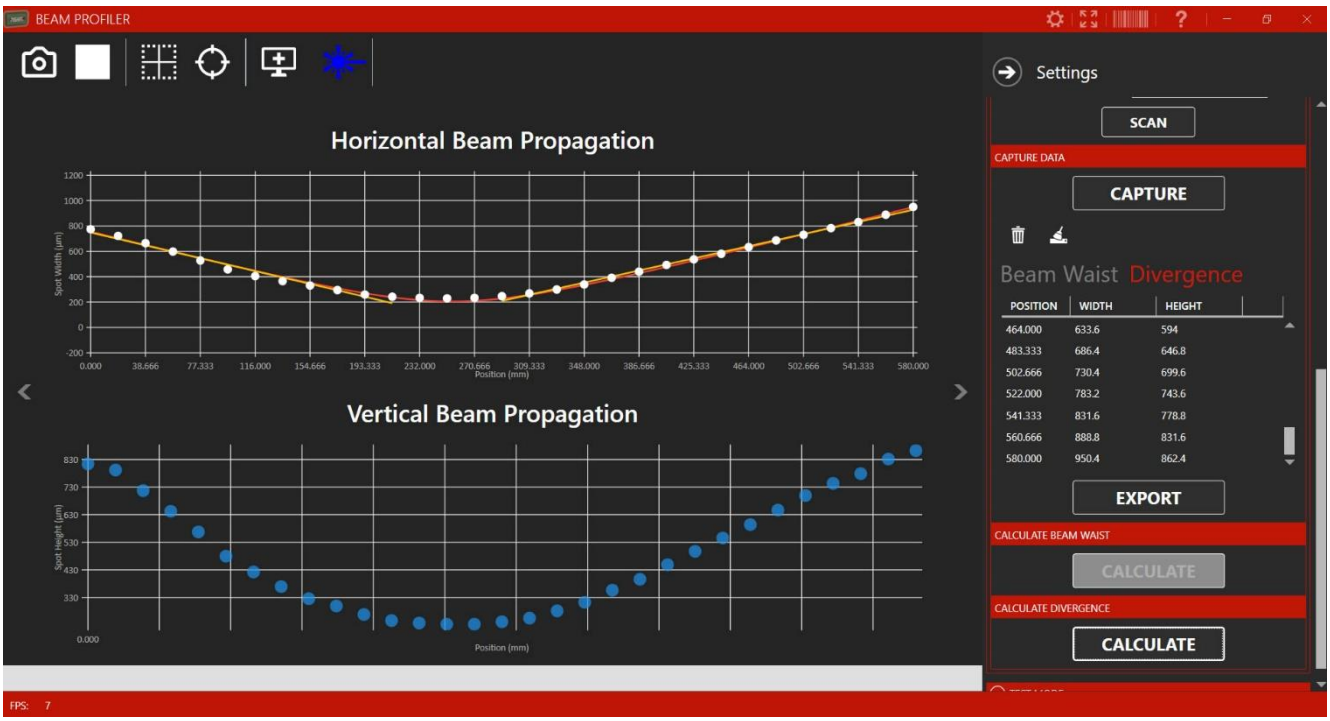
شکل ۲۸

تنظیمات حالت آزمون

۱- خاموش کردن حالت آزمون

۲- حالت آزمون پروفایل پرتو گاوسی

۳- حالت آزمون پرتو متحرک


BEAM PROFILER
Horizontal Beam Propagation
Spot Width (µm)
Position (mm)
Vertical Beam Propagation
Spot Height (µm)
Position (mm)
Settings
SCAN
CAPTURE DATA
CAPTURE
Beam Waist Divergence
POSITION WIDTH HEIGHT
464.000 633.6 594
483.333 686.4 646.8
502.666 730.4 699.6
522.000 783.2 743.6
541.333 831.6 778.8
560.666 888.8 831.6
580.000 950.4 862.4
EXPORT
CALCULATE BEAM WAIST
CALCULATE
CALCULATE DIVERGENCE
CALCULATE
FPS: 7

شکل ۲۹

Location z

	Mean Value	Standard Deviation
Beam Diameter $d\sigma$		
Beam Width $d\sigma x$		
Beam Width $d\sigma y$		
Azimuth Angle φ		

Focal Length

	Mean Value	Standard Deviation
Beam Divergence Angle $\theta\sigma$		
Beam Divergence Angle $\theta\sigma x$		
Beam Divergence Angle $\theta\sigma y$		

Beam propagation parameters derived from hyperbolic fit

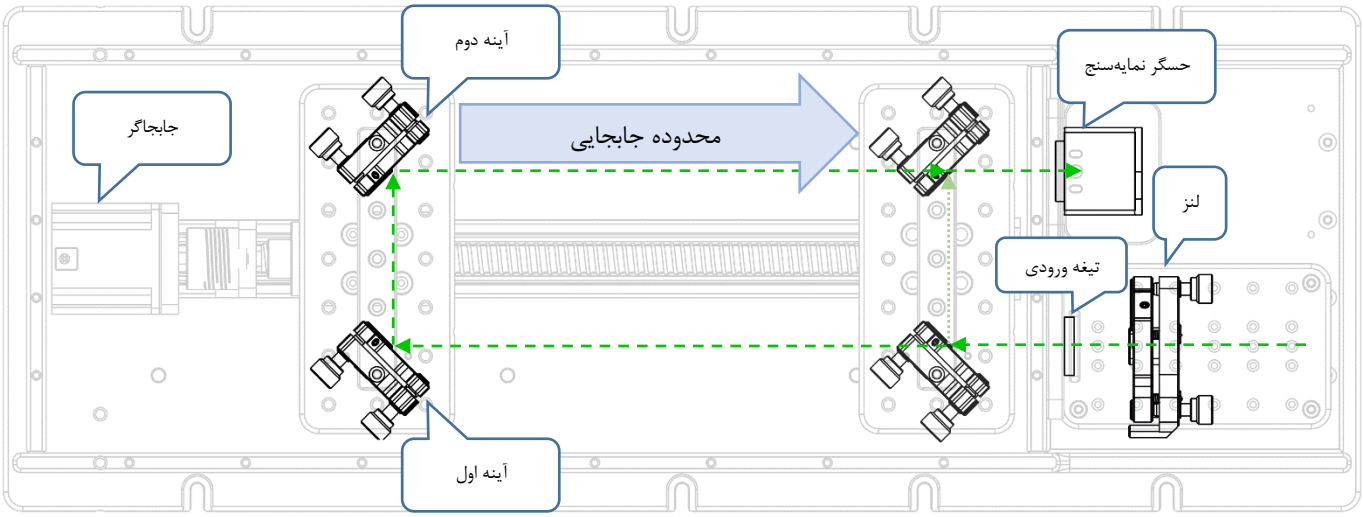
	Value	Estimated Uncertainty
Beam Waist Location $z0$		
Beam Waist Location $z0x$ (µm)	254.961	
Beam Waist Location $z0y$ (µm)	271.665	
Beam Waist Diameter $d0$		
Beam Waist Width $d0x$ (µm)	102.524	
Beam Waist Width $d0y$ (µm)	99.980	
Azimuth Angle φ		
Rayleigh Length zR		
Rayleigh Length zRx (mm)	31.036	
Rayleigh Length zRy (mm)	29.514	
Beam Divergence Angle $\theta\sigma$		
Beam Divergence Angle $\theta\sigma x$ (mRad)	2.476	
Beam Divergence Angle $\theta\sigma y$ (mRad)	2.371	
Beam Propagation Ratio M^2		
Beam Propagation Ratio Mx^2	0.750	
Beam Propagation Ratio My^2	0.700	

شکل ۳۰

۲-۳- چیدمان اپتیکی

پرتو ورودی پس از بازتاب از دو آینه داخلی، به حسگر نمایه‌سنج برخورد می‌کند. با توجه به نصب شدن آینه‌ها روی جابجاگر، جابجایی آینه‌ها باعث تغییر در طول مسیر اپتیکی می‌شود و با اینکار نمایه باریکه در مقاطع مختلف قابل اندازه‌گیری خواهد بود. مطابق استاندارد ISO-11146 برای اندازه‌گیری واگرایی و پارامتر کیفی M^2 لازم است حداقل پنج داده از میدان نزدیک و پنج داده از میدان دور ثبت شود. با توجه به محدود بودن بازه مسیر اپتیکی، ممکن است میدان‌های دور و نزدیک در محدوده اسکن دستگاه قرار نگیرد.

به همین دلیل از یک لنز کانونی کننده استفاده شده است. با توجه به تمرکز باریکه روی سطح حسگر، لازم است پرتو ورودی تا حدی تضعیف گردد که باعث آسیب‌دیدن سطح حسگر نشود. به همین دلیل لازم است متناسب با چگالی توان پرتو موردنظر، از فیلتر تضعیف‌کننده مناسب استفاده گردد (ر.ک. مشخصات نمایه‌سنج).



۴- راه‌اندازی

۴-۱ امنیت

باید توجه داشت که تمام نکات ایمنی ذکر شده در این دفترچه راهنما تنها زمانی مفید است که از دستگاه مطابق شرایط ذکر شده و برای کاربردهای آمده در دفترچه جاری استفاده شود. تمامی قطعات می‌بایست با کابل مناسب و شیلددار به یکدیگر متصل شوند. در صورتی که نیاز به جایگزینی برخی از قطعات ساخت شرکت نمایه پرتو آشا با تولیدات دیگر شرکت‌ها می‌باشد، لازم است مراتب را به صورت کتبی با بخش فنی شرکت درمیان بگذارید. در صورتیکه تغییری در اجزای دستگاه اعمال شود، ممکن است عملکرد آن دچار اشکال گردد.

با توجه به بازتاب جزئی بدنه و سطح حسگر پروفایل‌متر، توصیه می‌شود هنگام تغییر چیدمان، ابتدا منبع نوری را خاموش نموده یا خروجی آن را در حالت کم‌توان قرار دهید. همچنین لازم است پرتو نوری به صورت متعامد بر عدسی و پنجره ورودی بتابد.

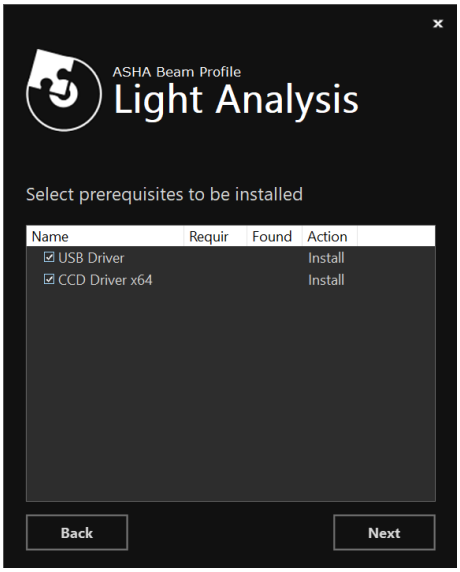
این دستگاه اندازه‌گیری دقیق، تنها زمانی قابل کالیبراسیون خواهد بود که مطابق بسته‌بندی اولیه در فوم و جعبه مخصوص قرار داده شود. توصیه می‌شود در صورت لزوم پیش از ارسال دستگاه به شرکت، جهت دریافت بسته‌بندی جایگزین اقدام نمایید.

۴-۲ نصب نرم‌افزار

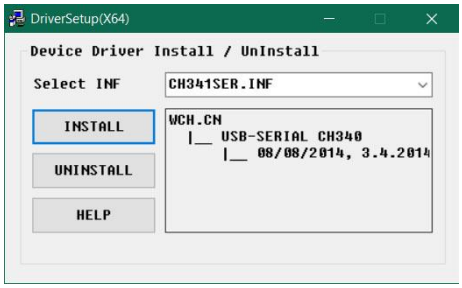
برای استفاده از مجموعه اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2 لازم است نرم‌افزار تحلیل پرتو (Light Analysis) روی رایانه نصب گردد. برای نصب این نرم‌افزار، اتصال اینترنت و یا اتصال دستگاه ضروری نمی‌باشد. درصورت اتصال رایانه به اینترنت، نرم‌افزار نصاب آشا به‌صورت خودکار آخرین نسخه نرم‌افزار تحلیل پرتو را بارگیری و نصب می‌کند. برای اجرای برنامه نصاب آشا می‌توانید از حافظه فلش و یا سی‌دی ارائه شده در بسته‌بندی استفاده نمایید.

در ادامه به‌صورت تصویری مراحل نصب نرم‌افزار تحلیل پرتو قابل مشاهده است.

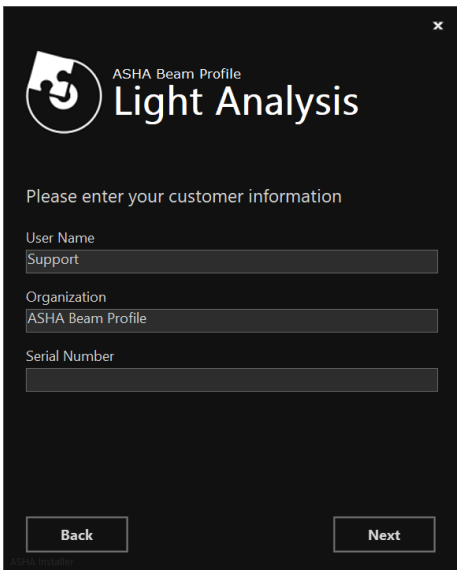
پس از اجرای برنامه نصاب آشا، از شما درباره زبان پیش‌فرض نرم‌افزار سوال پرسیده می‌شود. در این بخش می‌توانید از بین زبان‌های فارسی و انگلیسی یک مورد را انتخاب نمایید. در ادامه لیستی از راه‌اندازهای موردنیاز برنامه نشان داده می‌شود. برای استفاده از ویژگی‌های نرم‌افزار نمایه‌سنج دوبعدی لازم است متناسب با نوع حسگر خریداری شده، گزینه CCD Driver یا CMOS Driver انتخاب و نصب گردد.



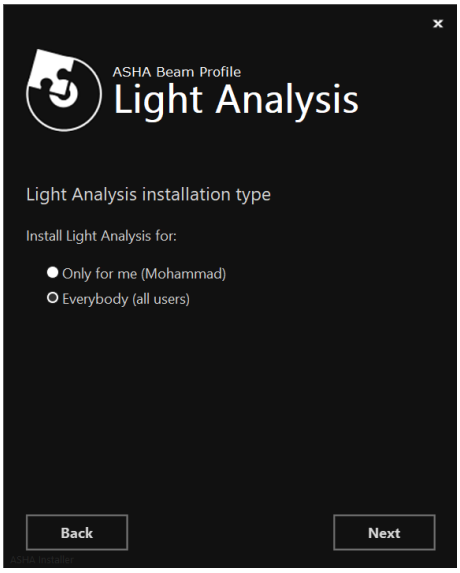
درصورتی‌که در کنار دستگاه نمایه‌سنج دوبعدی یکی از دستگاه‌های توان‌سنج، نمایه‌سنج یک‌بعدی و یا راه‌انداز جابجاگر با قابلیت اتصال به رایانه را تهیه نموده‌اید، می‌توانید با انتخاب گزینه USB Driver امکان ارتباط با آن دستگاه‌ها را نیز فراهم آورید.

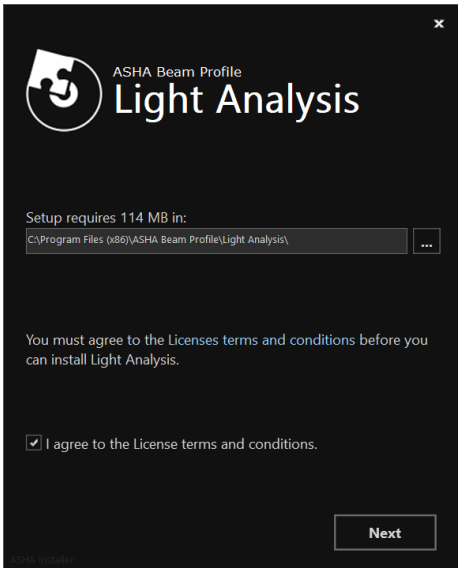


پس از نصب پیش‌نیازها، نرم‌افزار نصاب آشا مراحل نصب برنامه را ادامه می‌دهد. در این مرحله لازم است اطلاعات کاربری و سریال فعال‌سازی نرم‌افزار را وارد نمایید. در صورتی‌که از سریال فعال‌سازی مذکور اطلاعاتی ندارید با بخش پشتیبانی شرکت تماس حاصل فرمایید.

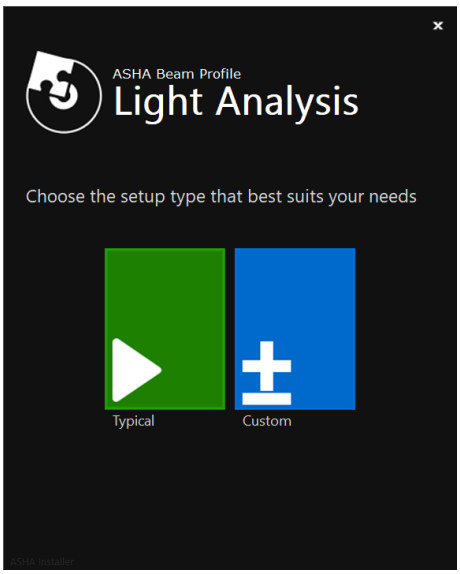


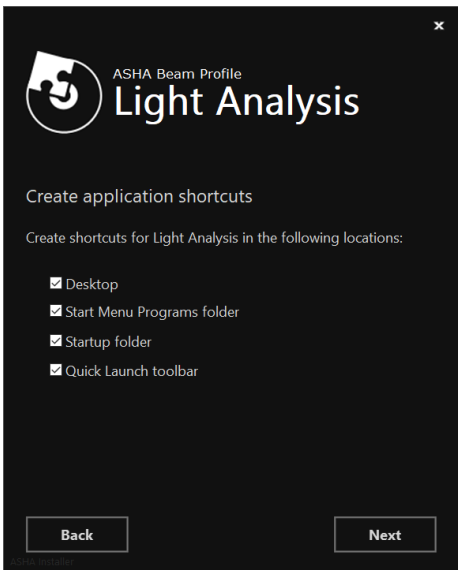
در این بخش مسیر نصب نرم‌افزار و قوانین و شرایط استفاده از آن قابل مشاهده است. اکیداً توصیه می‌شود شرایط استفاده به‌طور دقیق مطالعه گردد. در صورتی که سطح دسترسی مدیر را ندارید می‌توانید این نرم‌افزار را برای کاربر جاری نصب کنید. در این‌صورت تمام تنظیمات داخلی نرم‌افزار در سطح کاربر جاری ذخیره خواهد شد.



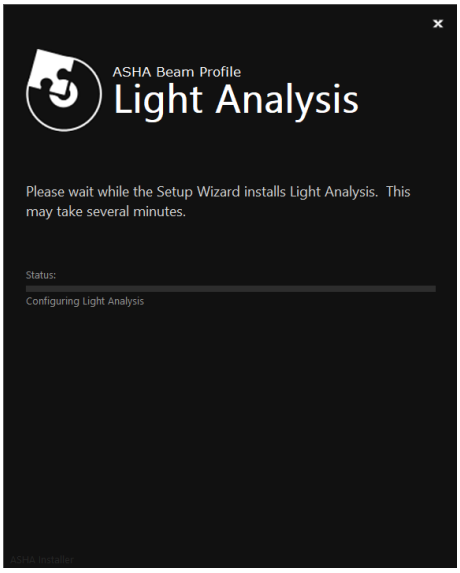


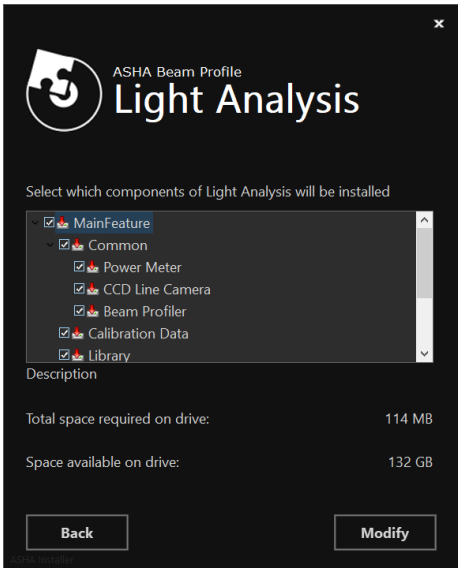
در ادامه می‌توانید تنظیمات مربوط به میان‌برها و ویژگی‌ها را انجام دهید. درصورتی که برای اولین بار از این نرم‌افزار استفاده می‌کنید و یا از ویژگی‌های آن اطلاعات کافی ندارید توصیه می‌گردد مراحل نصب را به‌صورت پیش‌فرض دنبال کنید.



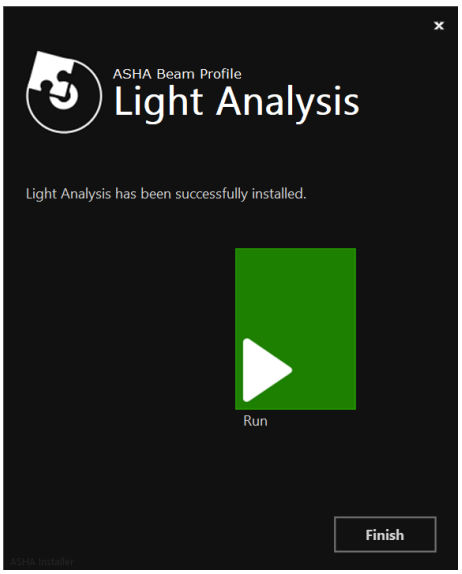


درصورت تمایل می‌توانید تنها بخشی از ماژول‌های نرم‌افزار را نصب و استفاده نمایید. به عنوان مثال ماژول راهنما یا ماژول به‌روزرسان می‌تواند از زنجیره نصب خارج شوند. لازم به توضیح است که عدم نصب هر ماژول باعث غیرفعال شدن برخی از امکانات نرم‌افزار می‌شود و توصیه می‌گردد تمام ماژول‌ها به صورت پیش‌فرض نصب گردند.





پس از گذشت مدت کوتاهی، نصب نرم‌افزار به اتمام می‌رسد و امکان استفاده از آن فراهم می‌شود.



۳-۴- آماده‌سازی

۳-۴-۱- نمایه سنجی

ابتدا لازم است متناسب با مشخصات حسگر موردنظر، از فیلتر تضعیف‌کننده مناسب استفاده نمایید. در صورت نیاز می‌توانید دو یا چند فیلتر تضعیف کننده را روی هم بسته تا توان عبوری از آن‌ها در محدوده کارکرد حسگر قرار گیرد. در هر صورت لازم است توجه داشته باشید که توان منبع نوری از توان تخریب فیلتر تضعیف کننده اول بیشتر نباشد. چرا که در صورت تخریب فیلتر اول، احتمال تخریب فیلترهای بعدی و در نهایت سطح حسگر بسیار زیاد خواهد بود.

پس از نصب کامل نرم‌افزار، کابل حسگر را به رایانه متصل کنید. سپس با فشردن دکمه جستجو، حسگرهای متصل شناسایی می‌گردد. درصورت اتصال بیش از یک حسگر، امکان انتخاب حسگر موردنظر از میان لیست حسگرهای متصل فراهم می‌شود. پس از انتخاب حسگر، دکمه اتصال را فشرده و پیغام اتصال را تأیید نمایید. در صورت عدم اتصال حسگر، پیامی ظاهر می‌شود و لازم است متناسب با توضیحات خطا، اقدام مقتضی را انجام دهید.

پس از باز شدن صفحه حسگر انتخابی، فرایند نمایه سنجی آغاز می‌شود. ابتدا لازم است پارامترهای اندازه‌گیری به درستی، با دقت و متناسب با ویژگی‌های پرتو لیزر مورد استفاده انجام شود. تمام پارامترهای موجود در بخش تنظیمات در اندازه‌گیری موثر بوده و لازم است به ترتیب از بالا به پایین تنظیم شود. اغلب محاسبات انجام شده در این نرم‌افزار به شکل توزیع شدت پرتو لیزر وابسته است. در حال حاضر محاسبات انجام شده بر پایه توزیع شدت گاوسی است و در صورت مغایرت نمایه پرتو مورد نظر، برخی از محاسبات مانند پهنای پرتو با خطا مواجه می‌شود. در هر مرحله از اندازه‌گیری باید توجه داشت که تمام نمایه پرتو و به صورت متعامد روی سطح حسگر تابیده شود و از لبه‌های حسگرفاصله داشته باشد (حداکثر از ۸۰ درصد از سطح مرکزی حسگر استفاده شود). همچنین شدت پرتو تابشی و نیز پارامترهای تنظیم شده به گونه‌ای باشد که بیشینه مقدار ثبت شده توسط حسگر در بازه ۸۰ الی ۹۵ درصد قرار گیرد و هیچ پیکسلی در وضعیت اشباع نباشد. تنظیم دقیق پارامترها باعث افزایش صحت دستگاه در اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۳-۴- اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2

برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2 لازم است راستای پرتو ورودی با محور حرکتی دستگاه هم‌تراز شود. به کمک تنظیم دو آینه بیرونی، می‌توان پرتو ورودی را تراز نمود. برای مطالعه روش پیشنهادی برای ترازمندسازی پرتو ورودی، بخش «تنظیم پرتو ورودی» را مطالعه نمایید.

با توجه به کانونی شدن پرتو لیزر روی سطح حسگر، لازم است در انتخاب فیلترهای تضعیف کننده دقت لازم را داشته باشید. عدم توجه به این موضوع می‌تواند باعث آسیب‌دیدگی جدی و دائمی حسگر نمایه‌سنج شود. در صورت نیاز به تنظیم آینه‌های درونی، لازم است با بخش فنی شرکت تماس بگیرید تا در صورت لزوم، توضیحات دقیق‌تری از نحوه تراز کردن آینه‌های داخلی در اختیارتان قرار گیرد.

۵- نمایه سنجی

۵-۱- حسگر آرایه‌ای نیمه‌هادی

برای نمایه‌سنجی اغلب از حسگرهای آرایه‌ای نیمه‌هادی تک‌رنگ (Monochrome) استفاده می‌شود. در این حسگرها، هر پیکسل معادل یک فوتودیود بوده و در هر فریم، نسبتی از شدت پرتو تابشی را در مدت زمان نورگیری، به صورت یک عدد دیجیتال اعلام می‌کند. بازه مقادیر هر پیکسل از صفر تا $2^d - 1$ خواهد بود که در آن d بیانگر عمق بیت (Bit depth) می‌باشد. درصورتی‌که مقدار یک پیکسل برابر با بیشینه مقدار خود یعنی $2^d - 1$ باشد، آن پیکسل در حالت اشباع بوده و مقدار آن غیر قابل قبول است. درصورتیکه در یک فریم از داده، پیکسلی در حالت اشباع قرار داشته باشد، آن فریم غیر معتبر بوده و برای تحلیل نباید مورد استفاده قرار گیرد. متناسب با تنظیمات حسگر و ویژگی‌های پرتو تابشی، ممکن است یک یا چند پیکسل در وضعیت اشباع قرار گیرند و لازم است پارامترها به نحوی تنظیم شود که هیچ پیکسلی در وضعیت اشباع نباشد. برخی از پیکسل‌ها ممکن است از نظر میزان حساسیت با عموم پیکسل‌ها متفاوت باشد و این امر باعث اشباع شدن زودهنگام این پیکسل‌ها می‌شود و به آن‌ها، پیکسل داغ (Hot Pixel) گفته می‌شود. در این نسخه از نرم‌افزار، امکان حذف پیکسل‌های داغ به صورت خودکار وجود ندارد. اگرچه این پیکسل‌ها خطای اندکی در محاسبات ایجاد می‌کنند، اما بهتر است پارامترها به گونه‌ای تنظیم گردد تا حتی این پیکسل‌ها نیز به سطح اشباع نرسند.

۵-۲- نگاشت رنگی

همانطور که گفته‌شد، در حسگرهای آرایه‌ای نیمه‌هادی، به ازای هر پیکسل در هر فریم، تنها یک عدد دریافت می‌شود و این عدد متناسب با شدت نور دریافتی توسط آن پیکسل در زمان نورگیری است. برای درک بهتر مقادیر دریافتی می‌توانیم هر فریم را به یک تصویر تبدیل کنیم. برای اینکار لازم است از یک نقشه رنگی (Color Map) برای نگاشت شدت هر پیکسل به رنگ استفاده کنیم. ساده‌ترین نقشه رنگی قابل تصور، طیف سیاه تا سفید می‌باشد. در این نقشه رنگی، شدت صفر معادل رنگ سیاه و شدت بیشینه (اشباع) معادل رنگ سفید است و تمام مقادیر این بین به صورت طیفی از سیاه تا سفید قابل تعریف است. در نرم‌افزار تحلیل پرتو، نقشه‌های رنگی متعددی تعریف شده است. پس از انتخاب نقشه رنگی، هر پیکسل با توجه به شدت پرتو دریافتی به رنگ بخصوصی درمی‌آید و این رنگ صرفاً بیانگر شدت روشنایی است و هیچ ارتباطی به طول‌موج پرتو ندارد.

۵-۳- حالت ضبط

حسگرهای آرایه‌ای نیمه‌هادی به صورت کلی در چهار وضعیت مختلف کار می‌کنند.

۵-۳-۱- وضعیت قاب کامل (Full-frame)

در هر فریم از این وضعیت، مقدار تمامی پیکسل‌ها دریافت و تحلیل می‌شود. با توجه به حجم بالای داده و پردازش در این حالت، زمان خواندن داده‌ها و پردازش آن‌ها بیشینه خواهد بود و نرخ تجدیدکاهش می‌یابد.

۵-۳-۲- وضعیت ناحیه موردنظر (Region of Interest)

در این وضعیت، بخشی از سطح حسگر که پرتو به آنجا تابیده شده است توسط کاربر جدا شده و صرفا داده‌های آن بخش دریافت و تحلیل می‌گردد. به دلیل امکان حذف نواحی تاریک (بی‌تأثیر) در این حالت، زمان خواندن و پردازش داده‌ها نسبت به حالت قاب کامل، کاهش یافته و نرخ تجدید افزایش می‌یابد. درصورتیکه منطقه موردنظر کوچک باشد، نرخ تجدید به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۵-۳-۳- وضعیت برش (Cropping)

در وضعیت برش، متناسب با وضوح انتخاب شده، بخشی از مرکز حسگر برش خورده و تنها داده‌های آن بخش خوانده و تحلیل می‌شوند. بنابراین ابعاد سطح مؤثر کاهش یافته و نرخ تجدید افزایش می‌یابد. درصورتیکه پرتو مورد سنجش ابعاد کوچکی داشته باشد، استفاده از این روش پیشنهاد می‌شود.

۵-۳-۴- وضعیت پرش (Skipping)

در این وضعیت تعداد مشخصی از پیکسل‌ها خوانده و پردازش نمی‌شوند. بنابراین وضوح تصویر کاهش یافته و نرخ تجدید افزایش می‌یابد. همچنین اثرات غیرواقعی نمونه‌برداری افزایش می‌یابد. این امکان بخشی از ویژگی‌های حسگر آرایه‌ای نیمه‌هادی بوده و به صورت کاملا سخت‌افزای پیاده‌سازی می‌شود. بنابراین نحوه اجرای آن به مشخصات حسگر وابسته است. درحال حاضر این وضعیت صرفاً به صورت مربعی قابل اجرا بوده و پرش‌های خطی (افقی یا عمودی) فعال نیست. به بیان دیگر، به ازای یک مربع ۲×۲ (یا ۳×۳، ۴×۴ بسته به وضوح انتخابی) تنها یک داده خوانده و پردازش می‌شود.

۵-۳-۵- وضعیت ادغام (Binning)

وضعیت ادغام مشابه وضعیت پرش می‌باشد با این تفاوت که بجای اینکه مقدار یک پیکسل به عنوان نماینده یک همسایگی مربعی خوانده شود، مجموع یا میانگین (با توجه به ویژگی‌های حسگر) پیکسل‌های آن همسایگی خوانده و پردازش می‌شود. در این وضعیت لبه‌های تیز، نرم‌تر شده و برخی از جزئیات (به دلیل میانگین‌گیری یا محاسبه حاصل جمع) از بین می‌رود.

۵-۴- تنظیم زمان نورگیری

زمان نورگیری یکی از مهم‌ترین پارامترهای قابل تنظیم در حسگرهای نوری نیمه‌هادی است و تأثیر بسیاری در سنجش نمایه لیزر دارد. برای نمایه‌سنجی لازم است پارامترها به گونه‌ای تنظیم شود که هیچ‌یک از پیکسل‌ها به سطح اشباع نرسند. متناسب با مشخصات حسگر آرایه‌ای، گام و بازه تنظیم زمان نورگیری متفاوت است. در اغلب حسگرها این بازه از ۵۰ میکروثانیه شروع و تا ۳ ثانیه با گام‌های ۵۰ میکروثانیه‌ای قابل تنظیم است. بازه پیشنهادی برای نمایه سنجی ۱ الی ۱۰۰ میکروثانیه است.

برای تنظیم زمان نورگیری به روش دستی، لازم است تمامی گزینه‌های تنظیم خودکار مانند زمان نورگیری خودکار، ضریب بهره خودکار و PID غیرفعال باشد. سپس با بررسی پارامترهای گزارش شده در بخش Calculation Results، مطمئن شوید بیشینه شدت پیکسلی در محدوده ۸۰ الی ۹۵ درصد قرار گرفته است. درصورتیکه افزایش زمان نورگیری مقدور نباشد، لازم است با استفاده از تقویت‌کننده آنالوگ موجود در حسگر، سیگنال دریافتی تقویت گردد. با تنظیم نرخ بهره، این عمل میسر می‌شود. در صورت عدم امکان کاهش زمان نورگیری، لازم است از تضعیف کننده خارجی (ND Filter) برای تضعیف شدت پرتو استفاده شود.

هرچه زمان نورگیری کمتر باشد، کمینه شدت پرتو قابل اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. همچنین افزایش بیش‌از حد زمان نورگیری باعث کاهش نرخ تجدید می‌شود. تنظیم این پارامتر به شدت پرتو تابشی وابسته است و درصورت تغییر شدت پرتو لازم است زمان نورگیری مجدداً تنظیم شود.

۵-۵- تنظیم نرخ بهره

در حسگرهای نوری نیمه‌هادی، ولتاژ هر یک از پیکسل‌ها به عددی دیجیتال تبدیل می‌شود. پیش از تبدیل مقادیر آنالوگ ولتاژ به عدد دیجیتال، مداری آنالوگ برای تقویت ولتاژ وجود دارد. بازه عملکرد این مدار در حسگرهای مختلف متفاوت است. از بهره می‌توان به عنوان پارامتر کمکی درکنار زمان نورگیری استفاده نمود و در زمان‌هایی که امکان افزایش زمان نورگیری وجود ندارد، تقویت سیگنال با استفاده از نرخ بهره، راهکار جایگزین است. با توجه به اینکه تقویت سیگنال باعث تقویت نویز نیز می‌شود، افزایش بیش‌ازحد نرخ بهره، خطای اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد.

۵-۶- تنظیم پارامترها به روش PID

یکی از روش‌های متداول تنظیم‌پارامتر برای بهینه‌سازی و رسیدن به وضعیت ایده‌آل، تکنیک PID است. به صورت کلی، این تکنیک با بهینه‌سازی تنها یک پارامتر، پارامتر دیگری را در سطح مشخصی پایدار می‌سازد. درصورتیکه چند پارامتر کنترلی وجود داشته باشد لازم است یک پارامتر به صورت مجازی تعریف شود و سایز پارامترها به صورت تابعی از پارامتر مجازی تعیین گردد. همچنین درصورتیکه پایدارسازی چند پارامتر مدنظر باشد، لازم است پارامتر جدیدی به صورت مجازی برای سنجش تعریف شود و تابعی از پارامترهای مورد سنجش باشد.

در این بخش، امکان تنظیم پارامتر مورد سنجش، سطح پایداری و بازه نوسان قابل قبول وجود دارد. هدف این بخش تنظیم شدت پیکسل انتخابی در سطح مشخص با دامنه نوسان مشخص است. گزینه‌های قابل انتخاب برای پایدارسازی شامل پیکسل بیشینه، نقطه مرکزی، نقطه مرکزی فیت گاوسی (افقی یا عمودی) و پیکسل دلخواه است. همچنین دو پارامتر شامل زمان نورگیری و نرخ بهره در این بخش به صورت خودکار تنظیم می‌شود. محاسبه زمان نورگیری و نرخ بهره از روی یک پارامتر مجازی انجام می‌شود و تلاش تکنیک PID، پایداری بیشینه شدت دریافتی پیکسل به کمک تنظیم همین پارامتر مجازی است. این محاسبه به چهار روش پیاده سازی شده است.

- بیشینه نرخ تجدید
- کمینه نویز
- بیشینه نرخ تجدید و کمینه نویز
- بدون شرط

در هریک از این روش‌ها، بیشینه زمان نورگیری و بیشینه نرخ بهره متناسب با تنظیمات وارد شده درنظر گرفته می‌شود. متناسب با این بیشینه‌ها، ابتدا زمان نورگیری مقدار دهی می‌شود و در صورت رسیدن این زمان به بیشینه قابل تنظیم خود، ادامه تنظیمات به کمک نرخ بهره انجام می‌شود. با هربار تغییر نرخ بهره، زمان نورگیری به گونه‌ای تنظیم می‌شود که اثر پله‌ای تغییر نرخ بهره تا حد ممکن جبران شود.

با توجه به شدت پرتو تابشی و سطح اشباع موردنظر لازم است ضرایب تکنیک PID توسط کاربر تنظیم شود. تنظیم این ضرایب روش‌های گوناگونی دارد و با توجه به ویژگی‌های پرتو می‌توان از تکنیک مناسب استفاده نمود. یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های تنظیم

پارامترهای PID، روش زیگلر – نیکولز است. اجرای این روش نیازمند اندازه‌گیری دامنه و دوره تناوب نوسان است که به کمک نمودار بیشینه شدت قابل انجام است. این محاسبات باید به صورت دستی و توسط کاربر انجام شده و ضرایب مربوطه در نرم‌افزار وارد شود.

۵-۶-۱ تکنیک تنظیم پارامتر پیشنهادی

با توجه به وابستگی ضرایب PID به عوامل گوناگون مانند توان و توزیع شدت پرتو، نقطه تنظیم، دامنه نوسان قابل قبول و غیره، می‌توان پارامترها را به صورت تجربی تنظیم نمود. برای اینکار لازم است یکبار تمامی ضرایب را صفر نموده و با استفاده از روش جستجوی باینری، ضرایب P، I و D را به ترتیب تنظیم کنید.

ابتدا ضریب P را یک و مابقی ضرایب را صفر قرار دهید. سپس دکمه ریست PID را فشرده و نمودار تغییرات بیشینه شدت را بررسی کنید. اگر سرعت رسیدن به نقطه تنظیمی کند بود، ضریب را دو برابر و اگر به سرعت از نقطه تنظیمی عبور کرد، آن را نصف کنید. سپس جستجو را به همین روش ادامه داده تا ضریب مطلوبی برای پارامتر P پیدا کنید. سپس ضریب P را ثابت نگه داشته و فقط ضریب I را تنظیم کنید. توجه کنید که پس از هربار تنظیم ضرایب، بهتر است محاسبه PID را ریست کنید تا جستجوی ضرایب به درستی انجام شود. در نهایت با تنظیم پارامتر D به روش مشابه، می‌توانید فرایند تنظیم پارامترهای زمان نورگیری و نرخ بهره را به صورت خودکار راه‌اندازی کنید.

۵-۷ تنظیم انحراف نور زمینه

این پارامتر در محاسبه مرکز و پهنای پرتو تأثیری نداشته و صرفا شکل ظاهری پرتو را هنگام نمایش تغییر می‌دهد. به کمک این پارامتر می‌توان مقدار ثابتی از تمامی پیکسل‌ها کسر نمود. به عنوان مثال می‌توان برای حذف نور زمینه یا برش نواحی کم‌توان از آن استفاده کرد. با استفاده از گزینه تنظیم خودکار انحراف نور زمینه، حسگر به گونه‌ای تنظیم می‌شود که شدت نواحی تاریک سطح حسگر به عنوان صفر درنظر گرفته شود.

۵-۸ اندازه‌گیری مرکز پرتو

محاسبه مرکز پرتو (Centroid) به سه روش قابل انجام است. در روش یک بعدی (1D)، ابتدا تصویر تجمیعی پرتو روی محورهای افقی و عمودی تشکیل شده و سپس مختصات نقاط بیشینه در هر محور به عنوان مختصات مرکز پرتو اعلام می‌شود. با توجه به این‌که داده‌های بدست آمده از حسگر آرایه‌ای، متناهی و گسسته هستند، بجای استفاده از روابط انتگرالی، آن‌ها را به صورت سیگما بازنویسی می‌کنیم. این‌کار زمانی مجاز است که پهنای پرتو از سطح حساس حسگر کوچک‌تر بوده و تمام پرتو روی سطح حسگر متمرکز شود. درصورتی‌که بخشی از پرتو خارج از سطح حساس حسگر تابیده شود، اندازه‌گیری با خطا مواجه خواهد شد.

$$C_x = \max_i \sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(i,j)i \qquad . \qquad C_y = \max_j \sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}} \hat{I}(i,j)j \tag{۵-۱}$$

در روش دو بعدی (2D) مطابق استاندارد ISO-11146، مرکز پرتو از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = \sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}} \sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(i,j) \tag{۵-۲}$$

$$C_x = \frac{1}{P}\sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}}\sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(i,j)i \qquad , \qquad C_y = \frac{1}{P}\sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}}\sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(i,j)j \qquad (۵-۳)$$

در این روابط w و h ابعاد سطح حسگر، C_x مختصات افقی مرکز پرتو، C_y مختصات عمودی مرکز پرتو و $\hat{I}(i.j)$ مقدار دریافتی از پیکسل ستون i اُم از سطر j اُم (نسبت به مرکز حسگر) پس از حذف نور زمینه است (مرکز حسگر، مبدا مختصات در نظر گرفته شده است).

در روش سوم، تنظیم این مختصات به صورت دستی بوده و کاربر باید مرکز پرتو را با استفاده از ابزار مربوطه مشخص نماید.

۹-۵- تخمین پهنای پرتو

محاسبات پهنای پرتو به دو روش یک‌بعدی و دوبعدی انجام می‌شود. در هر روش ابتدا میزان انحراف نور زمینه به صورت مجزا محاسبه شده و پس از حذف آن، مرکز پرتو محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه محاسبه پهنا به صورت انتگرالی انجام می‌شود، حذف صحیح انحراف نور زمینه، تأثیر مستقیمی روی محاسبات دارد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود چیدمان آزمایش تا حد امکان به صورتی باشد که نور زمینه کمتری واد حسگر شود.

محاسبه انحراف نور زمینه به سه روش انجام می‌شود

میانگین: در صورتیکه میانگین شدت پیکسل‌ها به عنوان نور زمینه درنظر گرفته شود، متناسب با پهنای پرتو و شکل توزیع توان، ممکن است بخشی از پرتو برش خورده و از محاسبات کنار گذاشته شود. درصورتیکه توزیع توان گاوسی باشد، با توجه به این که در این بخش صرفاً مرکز پرتو محاسبه می‌شود، این امر خطایی در محاسبات ایجاد نمی‌کند.

میانه کنتراست: در این روش، ابتدا کمینه و بیشینه مطلق محاسبه شده و میانگین این مقادیر به عنوان نور زمینه درنظر گرفته می‌شود.

میانگین / بیشینه: در این روش ابتدا میانگین و بیشینه مقادیر پیکسل‌ها محاسبه شده و میانگین این دو عدد به عنوان نور زمینه از کل داده‌ها کسر می‌گردد. این روش، سخت‌گیرانه ترین روش حذف نور زمینه بوده و عموماً باعث حذف نقاط کم‌توان پرتو از محاسبات می‌شود. در صورتیکه توزیع شدت پرتو متعارف نباشد، این روش مرکز شدتی پرتو را صرف‌نظر از شکل توزیع حواشی محاسبه می‌کند.

در روش یک بعدی، محاسبات با استفاده از تصویر تجمیعی پرتو روی محورهای عمودی و افقی انجام می‌شود. این درحالی است که در محاسبات دوبعدی، تک تک پیکسل‌ها در محاسبات دخیل شده و اندازه‌گیری طولانی‌تر و دقیق‌تر می‌شود. در روش یک‌بعدی تخمین پهنای پرتو، پس از حذف نور زمینه، ابتدا تصویر تجمیعی پرتو روی محورهای افقی و عمودی محاسبه شده و با استفاده از روابط زیر، پهنای پرتو تخمین زده می‌شود.

$$\langle\sigma_x^2\rangle = \frac{\sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}} \hat{I}\left(i,C_y\right)(i-C_x)^2}{\sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}} \hat{I}\left(i,C_y\right)} \qquad , \qquad \langle\sigma_y^2\rangle = \frac{\sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(C_x,j)\left(j-C_y\right)^2}{\sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(C_x,j)} \qquad (۵-۴)$$

در روش دو بعدی (2D) مطابق استاندارد ISO-11146، تخمین اندازه پرتو از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\langle\sigma_x^2\rangle = \frac{1}{P}\sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}}\sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(i,j)(i-C_x)^2 \quad , \quad \langle\sigma_y^2\rangle = \frac{1}{P}\sum_{i=-\frac{w}{2}}^{i=\frac{w}{2}}\sum_{j=-\frac{h}{2}}^{j=\frac{h}{2}} \hat{I}(i,j)\big(j-C_y\big)^2 \qquad (۵-۵)$$

۵-۱۰- اندازه‌گیری پهنای پرتو

برای محاسبه پهنای پرتو لازم است نور زمینه با دقت تنظیم و از داده‌ها کسر گردد. همچنین با توجه به دردسترس بودن تخمین پهنای پرتو، بجای استفاده از کل مقادیر فریم، صرفاً در محدوده مشخصی متناسب با ابعاد تخمینی محاسبات را انجام می‌دهیم. ابتدا لازم است ضریب مشخصی از تخمین پهنا به عنوان محدوده اعمال محاسبات انتخاب گردد (از میان گزینه‌های 6σ، 8σ و 12σ). سپس میانگین شدت پیکسل‌ها در محدوده انتخابی به عنوان نور زمینه کسر گردد. با توجه به اینکه این روش در تمامی اشکال توزیع شدت به خوبی کار نمی‌کند پیشنهاد می‌گردد در صورتی‌که توزیع شدت به صورت گاوسی نمی‌باشد، محاسبه انحراف نور زمینه به صورت دستی انجام شود. به عنوان مثال، اگر گزینه 6σ انتخاب شود، خواهیم داشت:

$$\langle w\rangle = 6\langle\sigma_x\rangle \quad , \quad \langle h\rangle = 6\langle\sigma_y\rangle \qquad (۶-۵)$$

۵-۱۱- محاسبه پهنای پرتو گاوسی ایده‌آل

پس از حذف نور زمینه و محاسبه مرکز پرتو، در این بخش یک توزیع گاوسی به داده‌ها فیت شده و سپس نیم‌پهنای آن فیت به عنوان نیم‌پهنای پرتو اصلی گزارش می‌شود. درصورتی‌که توزیع شدت پرتو اصلی گاوسی نباشد، این بخش با خطا مواجه می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه پهنای پرتو پیاده سازی شده است و لازم است متناسب با شرایط پرتو، از روش مربوطه استفاده نمود. در حالت کلی، تابع گاوسی دوبعدی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I(i,j) = \frac{P}{2\pi\sigma_x\sigma_y} exp\left(-\left(\frac{(x-C_x)^2}{2\sigma_x^2}+\frac{\big(y-C_y\big)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) \qquad (۷-۵)$$

در این رابطه P توان منبع لیزر است. اگر $\frac{1}{T}$ بیشینه شدت پرتو را به عنوان مرز پهنای پرتو درنظر بگیریم، برای پهنای پرتو خواهیم داشت:

$$FW_x = 2\sqrt{2\ln T}\,\sigma_x \quad , \quad FW_y = 2\sqrt{2\ln T}\,\sigma_y \qquad (۸-۵)$$

نرم‌افزار تحلیل پرتو برای اندازه‌گیری پهنای پرتو از سه آستانه متفاوت استفاده می‌کند. این آستانه‌ها شامل $\frac{1}{2}$، $\frac{1}{e}$، $\frac{1}{e^2}$ می‌باشد. درصورتی‌که از آستانه $\frac{1}{e^2}$ برای محاسبه پهنای پرتو استفاده کنیم، خواهیم داشت:

$$FW_x = 4\sigma_x \quad , \quad FW_y = 4\sigma_y \qquad (۹-۵)$$

۵-۱۱-۱- محاسبه یک‌بعدی پهنای پرتو

در این روش نمایه سطر و ستون مرکز پرتو به صورت مجزا درنظر گرفته شده و یک تابع گاوسی یک بعدی روی هرکدام از آن‌ها فیت می‌شود. سپس نیم‌پهنای هر فیت به عنوان نیم‌پهنای پرتو در محور مربوطه اعلام می‌شود. این روش در مقایسه با روش‌های دیگر، سریع‌تر است. همچنین با توجه به محاسبات یک بعدی، در صورت وجود خطا در یافتن مرکز پرتو، محاسبات پهنا با خطا مواجه می‌شود.

$$\langle\sigma_x^2\rangle = \frac{\sum_{i=C_x-\frac{\langle w\rangle}{2}}^{i=C_x+\frac{\langle w\rangle}{2}} \hat{I}\big(i,C_y\big)(i-C_x)^2}{\sum_{i=C_x-\frac{\langle w\rangle}{2}}^{i=C_x+\frac{\langle w\rangle}{2}} \hat{I}\big(i,C_y\big)} \quad , \quad \langle\sigma_y^2\rangle = \frac{\sum_{j=C_y-\frac{\langle h\rangle}{2}}^{j=C_y+\frac{\langle h\rangle}{2}} \hat{I}(C_x,j)\big(j-C_y\big)^2}{\sum_{j=C_y-\frac{\langle h\rangle}{2}}^{j=C_y+\frac{\langle h\rangle}{2}} \hat{I}(C_x,j)} \qquad (۱۰-۵)$$

که در آن $\langle w \rangle$ و $\langle h \rangle$، ضریبی از پهنای تخمینی بوده و متناسب با محدوده همسایگی انتخابی تعیین می‌گردد.

۵-۱۱-۲- محاسبه دوبعدی پهنای پرتو

در روش دو بعدی (2D) مطابق استاندارد ISO-11146-2، پهنای پرتو از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\langle P \rangle = \sum_{i=C_x-\frac{\langle w \rangle}{2}}^{i=C_x+\frac{\langle w \rangle}{2}} \sum_{j=C_y-\frac{\langle h \rangle}{2}}^{j=C_y+\frac{\langle h \rangle}{2}} \hat{I}(i,j) \qquad (۵-۱۱)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{\langle P \rangle} \sum_{i=C_x-\frac{\langle w \rangle}{2}}^{i=C_x+\frac{\langle w \rangle}{2}} \sum_{j=C_y-\frac{\langle h \rangle}{2}}^{j=C_y+\frac{\langle h \rangle}{2}} \hat{I}(i,j)(i-C_x)^2 \quad , \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{\langle P \rangle} \sum_{i=C_x-\frac{\langle w \rangle}{2}}^{i=C_x+\frac{\langle w \rangle}{2}} \sum_{j=C_y-\frac{\langle h \rangle}{2}}^{j=C_y+\frac{\langle h \rangle}{2}} \hat{I}(i,j)\left(j-C_y\right)^2 \qquad (۵-۱۲)$$

بنابراین اگر مرز اندازه‌گیری پهنای پرتو گاوسی را یک تقسیم‌بر e^2 درنظر بگیریم، قطر پرتو از روابط زیر بدست می‌آید:

$$d_x = 4\sigma_x \quad , \quad d_y = 4\sigma_y \qquad (۵-۱۳)$$

۵-۱۱-۳- محاسبه پهنای پرتو بیضوی

در این روش مشابه بخش دو بعدی، پهنای پرتو محاسبه می‌شود با این شرط که بجای محاسبه در محدوده مستطیلی همسایگی مرکز پرتو، در محدوده بیضوی حول مرکز پرتو با شعاع‌های بدست‌آمده از تخمین پهنا، محاسبات انجام می‌شود.

۵-۱۱-۴- محاسبه پهنا پرتو بیضی چرخیده

در این روش مطابق استاندارد ISO-11146-3، ابتدا زاویه انحراف دستگاه چرخیده محاسبه شده و سپس نیم‌پهنای پرتو به صورت بیضوی محاسبه می‌شود. در این حالت، برای اینکه نمایه محورهای عمودی و افقی از دستگاه چرخیده قابل نمایش باشد، متناسب با زاویه چرخش، ضریبی در خط‌کش اعمال می‌شود تا تصحیح موردنیاز صورت پذیرد.

۶- جابجاگر

در این دستگاه از یک جابجاگر یک‌بعدی استفاده شده است. در ابتدا و انتهای ریل جابجاگر، دو کلید تماسی و غیر تماسی قرار گرفته است تا از خروج جابجاگر از بازه مجاز حرکتی اجتناب شود. با هربار روشن شدن دستگاه، لازم است مبدأ مختصات بازیابی گردد. پس از آن امکان حرکت جابجاگر فراهم می‌شود. هر یک از فرامین حرکتی توسط نرم‌افزار تحلیل می‌شود و در صورت خارج محدوده بودن دستور حرکتی، خطایی مبنی بر عدم امکان اجرای فرمان حرکتی ظاهر می‌شود. لیکن توصیه می‌شود متناسب با طول مجاز جابجایی، در ارسال فرامین حرکتی به جابجاگر، دقت لازم را داشته باشید. در صورت خروج جابجاگر از محدوده مجاز حرکتی و تشخیص کلیدهای غیر تماسی، امکان جابجایی به صورت نرم‌افزاری غیر فعال می‌شود و لازم است پس از بازیابی مبدأ جابجایی، اندازه‌گیری را مجدداً تکرار نمایید.

۶-۱- بازیابی مبدأ جابجاگر

فرایند بازیابی مبدأ به صورت کاملا خودکار و در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، جابجاگر با بیشینه سرعت خود به سمت مبدأ جابجایی حرکت می‌کند. به محض برخورد با کلیدهای ابتدایی، متوقف شده و پنج میلیمتر از مبدأ فاصله می‌گیرد. سپس با دقت بیشتری به سمت مبدأ حرکت نموده و به محض رسیدن به کلید ابتدایی متوقف می‌شود. به دلیل استفاده از کلید غیر تماسی در این بخش و نیز پیاده سازی تکنیک دو مرحله‌ای، تکرار پذیری بازیابی مبدأ به شدت افزایش می‌یابد.

۶-۲- تعیین مبدأ مختصات مجازی

این نقطه با مبدأ جابجاگر متفاوت بوده و به صورت نرم‌افزاری تعریف می‌گردد. بنابراین مختصات هر نقطه به صورت نسبی و نسبت به مبدأ مختصات مجازی محاسبه و گزارش می‌گردد. این مبدأ در حافظه سخت‌افزار ذخیره شده و با خاموش و روشن شدن دستگاه تغییر نمی‌کند.

۶-۳- بازگشت به مبدأ مختصات

همانطور که گفته شد، مبدأ مختصات نقطه‌ای است مجازی در فاصله معین از مبدأ جابجاگر. بنابر این پس از روشن شدن جابجاگر و بازیابی مبدأ مختصات، امکان بازگشت به مبدأ مختصات فراهم خواهد شد. با هربار فشردن این دکمه، صرف نظر از موقعیت فعلی، جابجاگر به سمت مبدأ مختصات حرکت می‌کند.

۶-۴- میزان گام حرکتی

تنظیم میزان گام جابجایی پیش از ارسال فرمان حرکتی، بسیار ضروری است. این پارامتر تعیین کننده میزان جابجایی موردنظر است. در صورت تنظیم گام حرکتی به میزان غیر مجاز و یا قرار گرفتن دستگاه در خارج از محدوده مجاز در صورت اجرای فرمان، فرمان حرکتی اجرا نمی‌شود.

۶-۵- سرعت حرکت

حرکت جابجاگر به صورت شتاب ثابت انجام می‌شود. بنابر این روند حرکتی در سه مرحله انجام می‌شود. افزایش سرعت با شتاب ثابت تا رسیدن به بیشینه سرعت، حرکت با سرعت ثابت، کاهش سرعت با شتاب ثابت تا رسیدن به سرعت صفر. به بیانی دیگر، با شتاب ثابت به بیشینه سرعت حرکتی رسیده و پس از رسیدن به بیشینه سرعت، با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به نزدیکی مقصد برسد. سپس به صورت شتاب ثابت سرعت خود را کاهش می‌دهد به گونه‌ای که هنگام رسیدن به مقصد، سرعت صفر باشد و در نهایت در آنجا متوقف می‌شود. در این دستگاه صرفاً امکان تنظیم بیشینه سرعت مجاز وجود دارد و شتاب حرکتی مقدار ثابتی است. در صورت کم بودن گام حرکتی و یا زیاد بودن سرعت بیشینه، ممکن است جابجاگر پیش از رسیدن به سرعت بیشینه، از مرحله اول حرکتی (شتاب مثبت) وارد مرحله سوم حرکتی (شتاب منفی) می‌شود و عملا هیچ وقت به سرعت تنظیم شده نمی‌رسد. همچنین اگر پیش شروع مرحله سوم حرکتی (شتاب منفی)، فرمان جدیدی به دستگاه ارسال شود، پس از اتمام مرحله دوم (سرعت ثابت) متناسب با سرعت دستگاه و سرعت فرمان جدید، مرحله سوم متفاوت خواهد بود. اگر فرمان جدید در جهت موافق با حرکت فعلی باشد، مراحل سوم از حرکت جاری با مرحله اول از حرکت جدید ادغام شده و حرکت را در سرعت جدید ادامه می‌دهد. اما اگر جهت فرمان حرکتی جدید با جهت حرکت فعلی دستگاه مخالف باشد، مراحل توقف مشابه قبل انجام شده و سپس مراحل حرکت جدید آغاز می‌شود.

۷- پارامتر کیفی M^2

در این متن از عبارت «پهنای پرتو» بجای قطر پرتو یا شعاع پرتو استفاده شده است. عبارات قطر و شعاع پرتو گویای این نکته هستند که شکل پرتو دایروی است. اگرچه ممکن است شکل پرتو دایروی باشد، اما این یک حالت خاص است. همچنین از W برای نمایش پهنای پرتو کامل استفاده می‌شود. در متن استاندارد ISO-11146، از d_{σ_x} و d_{σ_y} برای نمایش پهنای پرتو کامل و از d_σ برای قطر پرتو استفاده می‌شود. در دیگر متون ممکن است از W یا w برای نمایش نیم‌پهنا (یا همان شعاع) استفاده شود. از Θ برای نمایش زاویه واگرایی و از θ برای نمایش نصف زاویه واگرایی استفاده شده است.

فاصله‌ها در راستای انتشار (محور z) و نسبت به محل لنز محاسبه شده است. W_0 پنای پرتو در کمر باریکه و Z_0 محل کمر باریکه است. Z_R طول رایلی نسبت به محل کمر باریکه است. در متن استاندارد ISO-11146، از زیروندهای x و y برای تفکیک محورها استفاده شده است اما در توضیحات ذیل از تفکیک محورها صرف‌نظر نموده و یک محور را تشریح می‌کنیم.

۷-۱ معرفی پارامتر کیفی M^2

پرتو لیزر پس از عبور از عدسی، کمر باریکه مصنوعی را تشکیل می‌دهد. انتشار پرتو در فضای آزاد، ارتباط مستقیمی با نحوه انتشار پرتو کانونی شده دارد. رابطه زیر، پهنای پرتو را در فواصل مختلف نسبت به محل کمر باریکه نشان می‌دهد.

$$W_z^2 = W_0^2 + \Theta^2 (z - Z_0)^2 \qquad (۷-۱)$$

بنابراین، پارامتر کیفی M^2 طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$M^2 = \frac{W_0 \Theta n}{4\lambda} \qquad (۷-۲)$$

که در آن n ضریب شکست محیط است و معمولا در فضای آزاد واحد درنظر گرفته می شود. همچنین طول رایلی طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Z_R = \frac{W_0}{\Theta} \qquad (۷-۳)$$

طول رایلی کامل، دو برابر Z_R و یا به صورت $Z_0 \pm Z_R$ درنظر گرفته می‌شود.

۷-۲ معرفی استاندارد ISO-11146

استاندارد ISO-11146 تحت عنوان کلی « لیزر و تجهیزات مرتبط با آن » تعریف شده است و شامل روش‌های اندازه‌گیری پهنا پرتو لیزر، زاویه واگرایی و نسبت انتشار پرتو است. این استاندارد تاکنون سه مرتبه بازنگری شده است و هربار پرتوها با توزیع پیچیده‌تری را شامل شده است. این موارد به ترتیب عبارت‌اند از:

- ISO-11146: پرتوهای غیرآستیگماتیک و آستیگماتیک ساده
- ISO-11146-2: فرم کلی پرتوهای آستیگماتیک عمومی
- ISO-11146-3: طبقه‌بندی پرتوهای لیزری به لحاظ ذاتی و هندسی، نحوه انتشار و جزئیات روش آزمون

۷-۲-۱ توزیع ویگنر (Wigner)

توزیع ویگنر یک تابع از دو پارامتر عرضی و دو پارامتر مختصات زاویه‌ای است که مقدار توان پرتو را در نقطه (x, y) در راستای (Θ_x, Θ_y) بیان می‌کند. توزیع چگالی توان $E(x, y)$ در مقطع اندازه‌گیری به کمک توزیع ویگنر به شکل زیر قابل تعریف است:

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y, \Theta_x, \Theta_y) d\Theta_x \, d\Theta_y \qquad (۷-۴)$$

حدود انتگرال‌گیری در عبارت بالا محدود است و عبارت است از بیشینه زاویه اشعه که در پرتو وجود دارد. این حدود به صورت قراردادی نامحدود درنظر گرفته شده است.

۷-۲-۲ توان پرتو

توان پرتو عبارت است از اندازه‌گیری میزان توزیع چگالی توان یک پرتو در سطح مقطع از یک مکان مانند z در راستای انتشار پرتو. اگر چگالی توان را در صفحه z و در مختصات (x, y) معادل $E(x, y, z)$ درنظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E(x,y,z)dx\,dy \qquad (۷-۵)$$

۳-۲-۷- ممان مرتبه اول توزیع ویگنر

ممان مرتبه اول توزیع ویگنر طبق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\langle x\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y,\Theta_x,\Theta_y)x\,dx\,dy\,d\Theta_x\,d\Theta_y \qquad (۷-۶)$$

$$\langle y\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y,\Theta_x,\Theta_y)y\,dx\,dy\,d\Theta_x\,d\Theta_y \qquad (۷-۷)$$

$$\langle \Theta_x\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y,\Theta_x,\Theta_y)\Theta_x\,dx\,dy\,d\Theta_x\,d\Theta_y \qquad (۷-۸)$$

$$\langle \Theta_y\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y,\Theta_x,\Theta_y)\Theta_y\,dx\,dy\,d\Theta_x\,d\Theta_y \qquad (۷-۹)$$

ممان مرتبه اول فضایی $\langle x\rangle$ و $\langle y\rangle$ مختصات مرکز پرتو را در صفحه اندازه‌گیری مشخص می‌کنند. این درحالیست که ممان زاویه‌ای $\langle \Theta_x\rangle$ و $\langle \Theta_y\rangle$ زاویه انتشار پرتو در مرکز هستند. ممان فضایی مرتبه اول را می‌توان به طور مستقیم از روی اندازه‌گیری توزیع چگالی توان در سطح مقطع راستای انتشار نیز اندازه‌گیری نمود.

$$\langle x\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} E(x,y)x\,dx\,dy \qquad (۷-۱۰)$$

$$\langle y\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} E(x,y)y\,dx\,dy \qquad (۷-۱۱)$$

۴-۲-۷- ممان مرتبه دوم توزیع ویگنر

ممان مرتبه دوم (قرارداده شده در مرکز) به کمک تعریف کلی ممان مراتب مختلف و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\langle x^k y^l \Theta_x^m \Theta_y^n\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y,\Theta_x,\Theta_y)(x-\langle x\rangle)^k (y-\langle y\rangle)^l (\Theta_x-\langle\Theta_x\rangle)^m \left(\Theta_y-\langle\Theta_y\rangle\right)^n dx\,dy\,d\Theta_x\,d\Theta_y \qquad (۷-۱۲)$$

که در آن، ضرایب k,l,m,n عداد صحیح نامنفی‌ای هستند که در رابطه $k+l+m+n=2$ صدق می‌کنند. به وضوح ده ممان مرتبه دوم متفاوت قابل تعریف است.

ممان‌های فضایی مرتبه دوم $\langle x^2\rangle$ ، $\langle y^2\rangle$ و $\langle xy\rangle$ بیانگر ابعاد عرضی توزیع چگالی توان در مقطع اندازه‌گیری هستند. ممان‌های زاویه‌ای مرتبه دوم $\langle \Theta_x^2\rangle$ ، $\langle \Theta_y^2\rangle$ و $\langle \Theta_x\Theta_y\rangle$ بیانگر واگرایی پرتو هستند و ممان‌های ترکیبی مرتبه دوم $\langle x\Theta_x\rangle$ ، $\langle y\Theta_x\rangle$ و $\langle y\Theta_y\rangle$ گویای ویژگی‌های فازی پرتو در مقطع اندازه‌گیری هستند. ممان فضایی (قرارداده شده در مرکز) مرتبه دوم را می‌توان به طور مستقیم از روی اندازه‌گیری توزیع چگالی توان در سطح مقطع راستای انتشار نیز اندازه‌گیری نمود.

$$\langle x^2\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} E(x,y)(x-\langle x\rangle)^2\,dx\,dy \qquad (۷-۱۳)$$

$$\langle xy\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} E(x,y)(x-\langle x\rangle)(y-\langle y\rangle)\,dx\,dy \qquad (۷-۱۴)$$

$$\langle y^2\rangle = \frac{1}{P}\int_{-\infty}^{\infty} E(x,y)(y-\langle y\rangle)^2\,dx\,dy \qquad (۱۵-۷)$$

سایر ممان‌های مرتبه دوم به کمک اندازه‌گیری ممان‌های فضایی در مقاطع دیگر و استفاده از قوانین انتشار ممان مرتبه دوم بدست می‌آیند.

۷-۲-۵- ماتریس پرتو

ماتریس متقارن ممان فضایی مرتبه دوم $\mathcal{W}$، ماتریس متقارن ممان زاویه‌ای مرتبه دوم $\mathcal{U}$ و ماتریس ممان مرتبه دوم مرکب $\mathcal{M}$ را به فرم زیر تعریف می‌کنیم:

$$\mathcal{W}=\begin{pmatrix}\langle x^2\rangle & \langle xy\rangle\\ \langle xy\rangle & \langle y^2\rangle\end{pmatrix}\quad,\quad \mathcal{U}=\begin{pmatrix}\langle \Theta_x^2\rangle & \langle \Theta_x\Theta_y\rangle\\ \langle \Theta_x\Theta_y\rangle & \langle \Theta_y^2\rangle\end{pmatrix}\quad,\quad \mathcal{M}=\begin{pmatrix}\langle x\Theta_x\rangle & \langle x\Theta_y\rangle\\ \langle y\Theta_x\rangle & \langle y\Theta_y\rangle\end{pmatrix} \qquad (۱۶-۷)$$

تمام ده ممان مرتبه‌دوم، ماتریس متقارن ۴×۴ به نام ماتریس پرتو را تشکیل می‌دهند:

$$\mathcal{P}=\begin{pmatrix}\mathcal{W} & \mathcal{M}\\ \mathcal{M}^T & \mathcal{U}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\langle x^2\rangle & \langle xy\rangle & \langle x\Theta_x\rangle & \langle x\Theta_y\rangle\\ \langle xy\rangle & \langle y^2\rangle & \langle y\Theta_x\rangle & \langle y\Theta_y\rangle\\ \langle x\Theta_x\rangle & \langle y\Theta_x\rangle & \langle \Theta_x^2\rangle & \langle \Theta_x\Theta_y\rangle\\ \langle x\Theta_y\rangle & \langle y\Theta_y\rangle & \langle \Theta_x\Theta_y\rangle & \langle \Theta_y^2\rangle\end{pmatrix} \qquad (۱۷-۷)$$

۷-۲-۶- ارتباط ممان‌های مرتبه دوم با ویژگی‌های فیزیکی پرتو

ممان‌های مرتبه دوم ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های فیزیکی پرتو دارند. ممان‌های فضایی مرتبه دوم، ابعاد عرضی توزیع چگالی توان را در مقطع اندازه‌گیری تشریح می‌کند. راستای کمینه و بیشینه پهنا – محورهای اصلی – همواره متعامد بر یکدیگر هستند. هر تابع توزیع چگالی به وسیله ابعاد در محورهای اصلی و جهت آن‌ها تعریف می‌شود. پهنای پرتو در راستای محور اصلی که به محور x نزدیک‌تر است، از رابطه

$$d_{\sigma_x}=2\sqrt{2}\left\{(\langle x^2\rangle+\langle y^2\rangle)+\gamma[(\langle x^2\rangle-\langle y^2\rangle)^2+4(\langle xy\rangle)^2]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۸-۷)$$

و پهنای پرتو در راستای محور اصلی که به محور y نزدیک‌تر است، از رابطه

$$d_{\sigma_y}=2\sqrt{2}\left\{(\langle x^2\rangle+\langle y^2\rangle)-\gamma[(\langle x^2\rangle-\langle y^2\rangle)^2+4(\langle xy\rangle)^2]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۹-۷)$$

بدست می‌آید که در آن

$$\gamma=sgn(\langle x^2\rangle-\langle y^2\rangle)=\frac{\langle x^2\rangle-\langle y^2\rangle}{|\langle x^2\rangle-\langle y^2\rangle|} \qquad (۲۰-۷)$$

زاویه میان محور اصلی که به محور x نزدیک‌تر است با محور y، زاویه آزیموتال نام دارد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\varphi(z)=\begin{cases}\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\langle xy\rangle}{\langle x^2\rangle-\langle y^2\rangle}\right) & \langle x^2\rangle\neq\langle y^2\rangle\\ sgn(\langle xy\rangle)\cdot\frac{\pi}{4} & \langle x^2\rangle=\langle y^2\rangle\end{cases} \qquad (۲۱-۷)$$

۷-۲-۷- قطر پرتو

d_g عبارت است از اندازه‌گیری میزان توزیع چگالی توان یک پرتو در سطح مقطع از یک مکان مانند z در راستای انتشار پرتو که از ممان مرتبه دوم مرکز نشأت گرفته شده است. این تعریف، حالت کلی‌تری از توزیع چگالی توان (نسبت به توزیع دایروی) را دربر می‌گیرد و توزیع بیضوی را نیز شامل می‌شود.

$$d_g = 2\sqrt{2}\sqrt{\langle x^2\rangle + \langle y^2\rangle} \qquad (۲۲-۷)$$

۷-۲-۸- محل کمر باریکه

$Z_{0,g}$ عبارت است از محلی در راستای انتشار که قطر پرتو به کمترین مقدار خود می‌رسد.

۷-۲-۹- طول رایلی

$Z_{R,g}$ فاصله کمر باریکه تا نقطه‌ای در راستای انتشار است که در آن، قطر پرتو $\sqrt{2}$ برابر قطر پرتو در کمر باریکه است.

۷-۲-۱۰- ضریب مؤثر انتشار پرتو

پارامتر M_{eff}^2 یک کمیت ثابت است که بیانگر قابلیت تمرکز یک پرتو آستیگماتیک عمومی است و بصورت کلی تشریح‌کننده نحوه انتشار پرتو یا تمرکز پرتو در میدان‌های دور و نزدیک است. این پارامتر به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$M_{\text{eff}}^2 = \frac{4\pi}{\lambda}[\det(\mathcal{P})]^{\frac{1}{4}} \qquad (۲۳-۷)$$

که در آن $\det(\mathcal{P})$ همان دترمینان ماتریس $\mathcal{P}$ است.

۷-۲-۱۱- آستیگماتیسم ذاتی

زاویه a یک پارامتر زاویه‌ای است و بیانگر آن است که یک پرتو آستیگماتیک عمومی تا چه حد می‌تواند به کمک لنز در فضای آزاد متمرکز شود. این پارامتر به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{a} = \frac{8\pi^2}{\lambda^2}\Big(\big(\langle x^2\rangle\langle\Theta_{\mathrm{x}}^2\rangle - \langle x\Theta_{\mathrm{x}}\rangle^2\big) + \big(\langle y^2\rangle\langle\Theta_{\mathrm{y}}^2\rangle - \langle y\Theta_{\mathrm{y}}\rangle^2\big) + 2\big(\langle xy\rangle\langle\Theta_{\mathrm{x}}\Theta_{\mathrm{y}}\rangle - \langle x\Theta_{\mathrm{y}}\rangle\langle y\Theta_{\mathrm{x}}\rangle\big)\Big) - (M_{\text{eff}}^2)^2 \geq 0 \qquad (۲۴-۷)$$

۷-۲-۱۲- پارامتر پیچش

پارامتر t بیانگر ویژگی‌های چرخش فاز جلوی پرتو است و نیز بیانگر حرکت زاویه مداری است که توسط پرتو منتشر می‌شود.

$$t = \langle x\Theta_{\mathrm{y}}\rangle - \langle y\Theta_{\mathrm{x}}\rangle \qquad (۲۵-۷)$$

پارامتر پیچش هنگام انتشار در فضای آزاد و لنزهای کروی ثابت می‌ماند و ممکن است تحت انتشار از طریق لنزهای استوانه‌ای تغییر کند.

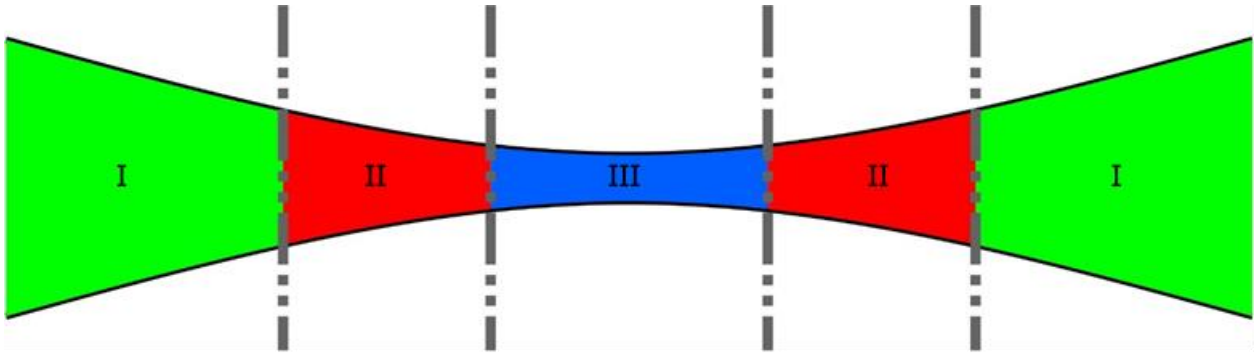
۷-۳- تنظیم پرتو ورودی

با توجه به محدود بودن سطح حساس حسگر و با توجه به لزوم تابش متعامد پرتو روی سطح حسگر برای اندازه صحیح پهنای پرتو لازم است پرتو ورودی با محور اسکن نمایه هم‌تراز باشد. تنظیم ترازمندی پرتو ورودی، امری تخصصی و حائز اهمیت است و هرچه با دقت بیشتری انجام‌شود، صحت آزمون انجام شده بیشتر خواهد بود.

برای اینکار بهتر است جابجاگر را در دورترین نقطه از حسگر آرایه‌ای قرار دهید (ابتدای مسیر). سپس پرتو ورودی را طوری تنظیم کنید که به وسط حسگر بتابد. در گام بعدی جابجاگر را آنقدر حرکت دهید که پرتو از سطح حسگر خارج نشود (مثلا در یکی از گوشه‌های حسگر قرار بگیرد). سپس با تنظیم آینه اول، مرکز پرتو را در نقطه قرینه نسبت به مرکز حسگر بتابانید. در نهایت با تنظیم آینه دوم، پرتو را به مرکز حسگر منتقل کنید. به ابتدای مسیر بازگردید و این فرایند را آنقدر تکرار کنید تا میزان جابجایی پرتو در کل مسیر، کمتر از ۵ درصد از سطح حسگر باشد. هرچقدر میزان جابجایی مرکز پرتو در طول مسیر کمتر باشد، پرتو ورودی ترازمندی بیشتری داشته و محاسبات با صحت بیشتری انجام می‌شود.

۴-۷- نمونه‌برداری در مقاطع مختلف

برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2 لازم است واگرایی، محل و پهنای کمر باریکه اندازه‌گیری شود. با توجه به استفاده از لنز کروی در چیدمان این دستگاه، در صورت موازی بودن پرتو ورودی، کمر باریکه در میانه مسیر تشکیل می‌گردد. فرم کلی انتشار باریکه در شکل زیر قابل مشاهده است.



در نواحی همگرایی و واگرایی (I)، پهنای پرتو تقریباً به شکل خطی تغییر می‌کند. بنابراین برازش یک تابع خطی روی داده‌های بدست‌آمده از این‌بخش، زاویه واگرایی را مشخص می‌کند. ناحیه کمر باریکه (III) محدوده‌ای است که در هر مقطع از آن، پهنای پرتو کوچک‌تر از $\sqrt{2}$ برابر کمر باریکه باشد. لازم است برای افزایش دقت اندازه‌گیری، نمونه‌برداری از این قسمت با دقت بیشتری (نسبت به ناحیه همگرایی / واگرایی) انجام شود. همچنین به دلیل کانونی‌شدن پرتو لیزر در این ناحیه، احتمال آسیب‌دیدگی سطح حسگر افزایش می‌یابد و لازم است فیلترهای کاهنده با دقت انتخاب و استفاده شوند.

ثبت داده‌های این بخش به دو صورت دستی و خودکار قابل انجام است. در هر حال لازم است داده‌ها به شکل صحیح ثبت گردند. مهم‌ترین پارامتر در صحت ثبت داده‌ها عبارت است از:

- ترازمندی راستای انتشار با راستای اسکن
- عدم خروج باریکه از سطح حساس حسگر
- عدم اشباع شدن حسگر هنگام اندازه‌گیری نمایه
- تنظیم مناسب پارامترهای زمان نورگیری و نرخ بهره با هدف قرارگیری بیشینه شدت دریافتی پیکسل در محدوده ۸۰ تا ۹۵ درصد شدت قابل دریافت (پیش از اشباع)
- حذف پیکسل‌های داغ از محاسبات

۱-۴-۷- اسکن دستی

برای ثبت داده‌ها به صورت دستی، کافیست جابجاگر را در مختصات موردنظر تنظیم کنید. سپس پارامترهای نمایه‌سنجی را تنظیم نموده و دکمه ثبت (Capture) را فشار دهید. درصورتی‌که پرتو به درستی تنظیم شده باشد، مشخصات اندازه‌گیری شده در حافظه ثبت می‌گردد. اگر نیاز به تکرار اندازه‌گیری در یک مقطع داشتید، کافیست جابجاگر را در مختصات موردنظر قرار داده و مجدداً ثبت داده را انجام دهید.

۲-۴-۷- اسکن خودکار

پس از تنظیم ترازمندی پرتو ورودی، لازم است متناسب با ویژگی‌های پرتو تابشی و دقت اندازه‌گیری موردنظر، محدوده و گام نمونه‌برداری در محور z را مشخص نمایید. پس از فشردن دکمه اسکن، دستگاه به صورت خودکار به محل مشخص شده رفته و شروع به اندازه‌گیری نمایه می‌کند. پس از اندازه‌گیری نمایه باریکه در محل جاری، به محل مشخص شده بعدی رفته و این روند را تا انتهای

مسیر انجام می‌دهد. پس از مشخص شدن زاویه واگرایی و محاسبه محل کمر باریکه و طول رایلی، اندازه‌گیری را در نزدیکی کمر باریکه با دقت بیشتری انجام می‌دهد. درصورتی‌که هریک از تنظیمات خودکار حسگر آرایه‌ای مانند زمان نورگیری خودکار، نرخ بهر خودکار یا PID فعال باشد، پس از قرارگیری جابجاگر در موقعیت جدید، دستگاه حداقل به مدت پنج ثانیه منتظر می‌ماند تا تنظیمات موردنظر اعمال گردد. درصورتیکه هنگام اسکن، باریکه قطع گردد نمایه سنجی در مختصات بعدی دنبال می‌شود. پس از ثبت آخرین داده، پیامی مبنی‌بر اتمام اسکن نمایش داده می‌شود.

۵-۷- اندازه‌گیری واگرایی و پارامتر کیفی M^2

برای اندازه‌گیری واگرایی و پارامتر کیفی M^2 لازم است نمایه پرتو در مقاطع مختلفی از راستای انتشار اندازه‌گیری شود. راستای انتشار با توجه به محل کمر باریکه و اندازه طول رایلی، به دو قسمت میدان نزدیک و میدان دور تقسیم می‌شود. میدان نزدیک به محوریت محل کمر باریکه و با دامنه طول رایلی تعریف می‌شود. میدان دور عبارت است از تمام نقاطی از راستای انتشار که فاصله آن‌ها تا محل کمر باریکه بیشتر از دو برابر طول رایلی باشد. طبق استاندارد ISO-11146 برای اندازه‌گیری دقیق پارامتر کیفی M^2 لازم است حداقل پنج داده از میدان نزدیک و پنج داده از میدان دور ثبت شود.

پس از ثبت داده‌ها به روش مطلوب، لازم است ابتدا محل و اندازه کمر باریکه محاسبه شود. برای این کار کافیست یک چندجمله‌ای درجه دوم به داده‌های بدست‌آمده از پهنای پرتو در مقاطع مختلف فیت شود و این کار به روش رگرسیون چندجمله‌ای انجام شده است. محل کمر باریکه با توجه به ضرایب چندجمله‌ای قابل محاسبه است. با قراردادن مختصات محل کمر باریکه در تابع فیت، اندازه کمر باریکه بدست می‌آید. در ادامه لازم است متناسب بافاصله کانونی عدسی و طول موج باریکه، مرز میدان‌های دور و نزدیک محاسبه شود. برای محاسبه زاویه واگرایی، از رگرسیون خطی روی داده‌های میدان نزدیک استفاده شده است. با این‌کار، تمامی پارامترهای موردنیاز برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی M^2 بدست آمده است.

۱-۵-۷- رگرسیون چندجمله‌ای

هدف اصلی رگرسیون، محاسبه مقدار یک متغیر وابسته از روی مقدار یک متغیر مستقل است. در حالت کلی معادله یک رگرسون چندجمله‌ای درجه m از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \cdots + \beta_m x_i^m + \varepsilon_i \qquad (۲۶-۷)$$

در این رابطه n که $n > m$ تعداد نقاط نمونه‌برداری، x_i مغتیر مستقل، y_i متغیر وابسته، $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_m$ مجهول و ε_i خطای تصادفی صرف‌نظر شده است و میانگین آن به ازای همه i ها صفر است. اگر ماتریس $\mathcal{X}$ را متشکل از داده‌های متغیر مستقل، ماتریس $\mathcal{Y}$ را متشکل از داده‌های متغیر وابسته و ماتریس B را مجهول درنظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$\mathcal{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad , \quad \mathcal{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \ldots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \ldots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \ldots & x_n^m \end{bmatrix} \quad , \quad \mathrm{B} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix} \quad , \quad \mathrm{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \qquad (۲۷-۷)$$

$$\mathcal{Y} = \mathcal{X}\mathrm{B} + \mathrm{E} \qquad (۲۸-۷)$$

با توجه به این‌که تمام x_i ها با یکدیگر متفاوت هستند و شرط $m < n$ برقرار است، الزامات وارون‌پذیری ماتریس $\mathcal{X}^T\mathcal{X}$ برقرار خواهد بود و با صرف‌نظر از ماتریس خطا E می‌توان ماتریس مجهول B را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\mathrm{B} = (\mathcal{X}^T\mathcal{X})^{-1}\mathcal{X}^T\mathcal{Y} \qquad (۲۹-۷)$$

۲-۵-۷- محاسبه زاویه واگرایی

طبق رابطه (۷-۱)، برای محاسبه زاویه واگرایی لازم است از رگرسون چندجمله‌ای درجه دوم روی داده‌های بدست‌آمده از پهنای پرتو در مقاطع مختلف استفاده نموده و با محاسبه محل و پهنای کمر باریکه، طول رایلی بدست آمده و با شکیل مرز میدان‌های دور و نزدیک، زاویه واگرایی محاسبه می‌شود.

$$W_x = \begin{bmatrix} w_{x,1} \\ w_{x,2} \\ \vdots \\ w_{x,s} \end{bmatrix} \quad , \quad W_y = \begin{bmatrix} w_{y,1} \\ w_{y,2} \\ \vdots \\ w_{y,s} \end{bmatrix} \tag{۳۰-۷}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & z_1^2 \\ 1 & z_2 & z_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & z_s & z_s^2 \end{bmatrix} \tag{۳۱-۷}$$

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & z_1^2 \\ 1 & z_2 & z_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & z_s & z_s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \tag{۳۲-۷}$$

$$\hat{\vec{\beta}} = (Z^T Z)^{-1} Z^T \vec{W} \tag{۳۳-۷}$$

در چندجمله‌ای درجه دوم، $-\frac{\beta_1}{2\beta_2}$ محل صفر شدن مشتق اول است. بنابراین کمر باریکه از طریق روابط زیر بدست می‌آید:

$$Z_0 = -\frac{\beta_1}{2\beta_2} \tag{۳۴-۷}$$

$$\mathrm{W}_0 = \sqrt{\beta_2 Z_0^2 + \beta_1 Z_0 + \beta_0} \tag{۳۵-۷}$$

$$W_R = \sqrt{2} W_0 \tag{۳۶-۷}$$

$$Z_R = Z_0 \pm \frac{\pi W_0^2}{\lambda} \tag{۳۷-۷}$$

۸- حالت آزمون

۸-۱- آزمون پرتو گاوسی

در این حالت، بجای استفاده از داده‌های حسگر آرایه‌ای، نرم‌افزار به صورت خودکار داده‌های ورودی را تولید می‌کند. داده‌تولیدشده توسط نرم‌افزار متناسب با تنظیمات کاربر بوده و می‌تواند شامل نور زمینه، نویز تصادفی، پرتو گاوسی با مختصات و پهنا و زاویه دلخواه باشد. با این آزمون می‌توان بخش‌های مختلف نمایه‌سنج را مورد آمون قرار داد.

۸-۲- آزمون پرتو متحرک

برای آزمون عملکرد نرم‌افزار در تشخیص مرکز پرتو، این قابلیت وجود دارد که مرکز پرتو با یک تناوب بیضوی حرکت کند. از این قابلیت می‌توان برای آزمون سرعت پاسخ‌دهی اجزاء پردازشی و گرافیکی استفاده نمود.

۸-۳- آزمون پارامتر کیفی M^2

برای سنجش بخش محاسبات، این امکان در نرم‌افزار فراهم شده است که پهنای پرتو به همراه مختصات مقاطع اندازه‌گیری به صورت پیش‌فرض به لیست داده‌ها افزوده شده و برای محاسبات زاویه واگرایی و پارامتر کیفی M^2 مورد استفاده قرار گیرد.