بازسازی جبهه موج با حسگر هارتمن

پایان نامه کارشناسی ارشد

امیر اصغر شرقی بناب

استاد راهنما :

دکتر احمد درودی

اردیبهشت ماه 1388

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به پدر و مادر عزیزم به پاس

زحمات بی دریغشان

قدردانی و تشکر

از استاد گرامی جناب آقای دکتر درودی به خاطر راهنمایی های صبورانه ایشان در تمام مراحل این پایان نامه تشکر می کنم و آرزوی موفقیت روزافزون در تمام مراحل زندگی برای ایشان دارم.

از آقای رامین شمالی به دلیل کمک هایی که به من کردند کمال تشکر را دارم.

از آقای رمضانی به خاطر همراهی من در انجام پایان نامه و از آقای رحیم تراشکار که زحمات زیادی را در تراش قطعات مورد نیاز متحمل شدند قدردانی می کنم.

چکیده

تلاش های زیادی در سال های اخیر انجام گرفته تا بتوان تصویر واضحی از اجرام سماوی، بدون تاثیر تلاطم جو دریافت کرد. اتفاقی که می افتد این است که جبهه موج وقتی از محیطی با ضریب شکستهای متفاوت عبور می کند، تغییر شکل می دهد و تحت تاثیر آشفتگی محیط قرار می گیرد. روش های مختلفی برای اندازه گیری این جبهه موج آشفته وجود دارد. که از آن جمله می توان به روش شیک-هارتمن اشاره کرد.

در این رساله حسگر شیک-هارتمن طراحی شد و از آن برای تعیین ابیراهی در چند سیستم اپتیکی استفاده شد.

در فصل اول انواع حسگرهای جبهه موج معرفی شده و نحوه عملکرد هر کدام توضیح داده می شود. در فصل دوم روش هایی برای بازسازی فاز از مشتقات فاز، با بیان هندسه های مختلف ذکر شده است.

در فصل سوم به توضیح حسگر شیک-هارتمن ساخته شده در این رساله پرداخته شده است.

و در انتها از این حسگر برای آزمون عدسی دوتایی مجهول و آزمون سطوح غیر کروی استفاده شده است که در فصل چهارم با جزئیات توضیح داده شده است.

واژگان کلیدی:

حسگر شیک-هارتمن، حسگرهای جبهه موج، بازسازی جبهه موج، هندسه ساسول، اپتیک تطبیقی، سطوح غیرکروی،

فهرست

چکیده 5

1 جبهه موج، حسگرهای جبهه موج و انواع آن

1.1 مقدمه 10

2.1 جبههٔ موج 12

1.2.1 اصل هویگنس 13

2.2.1 نور ستارگان 14

3.2.1 پرتو نور 14

3.1 آشفتگی جو 15

1.3.1 پارامتر فرید 16

4.1 تئوری تشکیل تصویر.....16
5.1 چند جمله ای های زرینکه.....20
1.5.1 توصیف جبهه موج بر حسب چند جمله ای های زرینکه.....24
6.1 حسگر جبهه موج.....26
1.6.1 حسگر انحنا سنج 27
2.6.1 حسگر پیرامید.....30
1.2.6.1 مزایای حسگر پیرامید.....32
3.۶.۱ حسگر شیک- هارتمن.....32
1.3.۶.۱ مزایای حسگر شیک-هارتمن.....35
2.3.۶.۱ معایب حسگر شیک-هارتمن.....35

2. توصیف روش های بازسازی فاز از مشتقات فاز

1.2مقدمه.....37
2.2 بازسازی جبهه موج از مشتقات فاز.....37
3.2 روش منطقه ای.....37
1.3.2 روش هادگین.....39
2.3.2 روش فرید.....40
3.3.2 روش سوس ول.....40
4.2 فرمول بندی حل مسئله.....41
1.4.2 هندسه هادگین.....41
2.4.2 هندسه فرید.....41
3.4.2 هندسه ساسول.....42

5.2 نظریه تقریب.....42

1.5.2 آشنایی با تقریب و نرمها.....43

6.2 فرمول بندی ماتریسی و استفاده از روش تقریب کمترین مربعات 45

8.2 منابع خطا.....51

3 طراحی و ساخت حسگر شیک-هارتمن

1.3 مقدمه.....54

2.3 آرایه ریز عدسی ها.....54

1.2.3 آرایه مورد استفاده در چیدمان آزمایشگاهی.....56

3.3 آشکارساز 57

4.3 طراحی نگهدارنده آرایه ریزعدسی ها.....58

5.3 نرم افزار حسگر شیک-هارتمن.....59

4 کاربرد حسگر شیک-هارتمن برای آزمون سطوح غیر کروی

1.4 مقدمه.....63

2.4 سطوح اپتیکی غیر کروی.....63

3.4 ویژگی های سطوح غیر کروی.....64

1.3.4 سهمی گون.....64

2.3.4هذلولی گون.....65

3.3.4 بیضی گون.....65

4.4 چیدمان آزمایشگاهی 66

بررسی خطاها.....70

نتایج و پیشنهادات.....72

مراجع.....74

فصل اول

جبهه موج، حسگر های جبهه موج و انواع آن

1.1 مقدمه

اپتیک تطبیقی برای اولین بار به منظور از بین بردن ابیراهی ناشی از جو توسط هورس بابکوک[1] در سال 1935 به جهان معرفی شد[1]. با وجودی که مقاله اولیه صرفا در رابطه با تصویر برداری نجومی در طول موج های خاص بود، به نظر می آید که اولین توصیف از یک مبحث خیلی فراگیرتر باشد که بعد ها کاربرد های فراوانی در صنایع نظامی، پزشکی، لیزر و زمینه های دیگر ایجاد کند[2].

از لحاظ کامل بودن، مقاله بابکوک بی نظیر است چرا که علاوه بر بیان اصول اولیه این روش، روش هایی نیز برای اندازه گیری اختلال ها ذکر کرده و استفاده از آینه شکل پذیر را ارائه کرده است. او در رابطه با بسیاری از الزامات این زمینه بحث می کند و نتیجه می گیرد که چنین تکنولوژی به تفکیک بالای زمانی نیاز دارد و محاسبه اختلال های ایجاد شده در جبهه موج فقط برای ستاره های روشنتر از قدر 6/5 در آسمان امکان دارد. بعد از پیشنهاد اولیه بابکوک فعالیت در زمینه اپتیک تطبیقی آغاز شد. از آنجا که اپتیک تطبیقی در صنایع نظامی کارایی خوبی دارد سرمایه گذاری زیادی روی این پروژه در راستای اهداف نظامی انجام گرفت بطوریکه می توان گفت که جنبه نجومی آن فراموش شد. چرا که اپتیک تطبیقی بسیار پر هزینه بوده و به حمایت های مالی زیادی احتیاج داشت. تا اینکه در اواسط دهه 80 بافینگتون[2] و همکارانش شروعی تازه برای استفاده از این تکنولوژی در نجوم داشتند. بافینگتون و همکارانش از یک آینه 6 تکه تک بعدی که توسط پیستون کنترل می شد استفاده کردند. پس از بافینگتون، هاردی از یک آینه دو بعدی یک تکه با قابلیت تغییر شکل به همراه یک حسگر جبهه موج تداخل سنجی برای تصویر برداری از ستاره ها و خورشید استفاده کرد. کاربردهای این چند نفر هم امیدوار کننده بود و هم نا امید کننده. امیدوار کننده از این جهت که مفید بودن آن را نشان می داد و

[1] Horace W. Babcock
[2] Andrew Buffington

ناامید کننده از این لحاظ که مخارج ان بسیار زیاد بود. در عین حال چون کاربرد آن فقط برای ستاره های پر نور بود علاقه تعداد کمی از منجمین را به خود جلب کرد.

وجود چند عامل در کنار هم باعث شد که از دهه 90 تا به حال فیزیکدانان از این سیستم بیشتر استفاده کنند:

1. رسیدن به حد کوانتومی آشکارساز ها، که باعث شد عکس برداری با کیفیت بالا انجام گیرد.

2. به کار بردن این سیستم در طول موج های مادون قرمز، که بسیاری از پیچیدگی ها و محدودیت ها را برطرف می کرد.

3. استفاده از ستاره های راهنمای لیزری برای حسگر های جبهه، که مشکل پیدا کردن ستاره پر نور طبیعی را برطرف کرد.

امروزه سیستم اپتیک تطبیقی بسیار پیشرفت کرده و این تکنولوژی درتلسکوپ های بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد و تصور یک تلسکوپ بدون استفاده از سیستم اپتیک تطبیقی غیر ممکن است.

سیستم اپتیک تطبیقی از بخش های متنوع زیادی تشکیل شده ولی به صورت کلی می توان گفت که از سه بخش کلی

1) حسگرجبهه موج
2) آینه شکل پذیر
3) سیستم کنترلی

تشکیل شده است. هر کدام از این بخش ها از اجزای زیادی تشکیل یافته اند و از تکنولوژی بسیار پیشرفته ای استفاده می کنند.

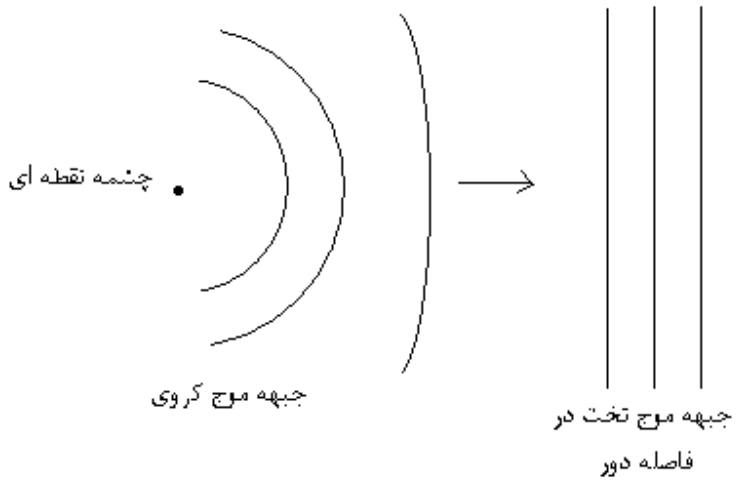
ما در این فصل حسگر های جبهه موج را بررسی خواهیم کرد. در فصل های بعدی به صورت خاص به بررسی حسگر شیک-هارتمن خواهیم پرداخت.

در این روش میزان انحراف جبهه موج در اثر آشفتگی اندازه گیری می شود. در روش شیک-هارتمن جبهه موج به آرایه ای از ریز عدسی ها برخورد می کند. اگر این جبهه موج تخت باشد در صفحه CCD مجموعه نقاط

منظمی را خواهیم دید که بیانگر کانون ریز عدسی ها است. ولی اگر جبهه موج در اثر عبور از جو آشفته شده باشد در اینصورت به دلیل اینکه برای ریزعدسی های مختلف جبهه موج با زاویه های مختلف برخورد می کند محل کانون جابجا خواهد شد و در صفحه CCD دیگر نقاط منظمی نخواهیم دید. با استفاده از مقدار جابجایی محل کانون برای هر ریزعدسی، زاویه ورودی جبهه موج و در نتیجه گرادیان فاز بدست می آید. موضوع مهمی که مطرح است این است که از زاویه فرودی جبهه موج به ریز عدسی ها چگونه می توان گرادیان فاز را به دست آورده و جبهه موج را بازسازی کرد. تعداد ریز عدسی هایی که استفاده خواهد شد و CCD که جهت ثبت داده ها استفاده خواهد شد جزء مهمترین بخش هایی است که باید مورد توجه قرار گیرند.

2.1 جبهۀ موج

جبهۀ موج سطحی است که بر آن آشفتگی نوری دارای فاز ثابتی است[3]. شکل 1-1 بخش کوچکی از یک جبهه موج کروی را که از چشمه نقطه ای شکل در محیطی همگن خارج می شود، نشان می دهد .



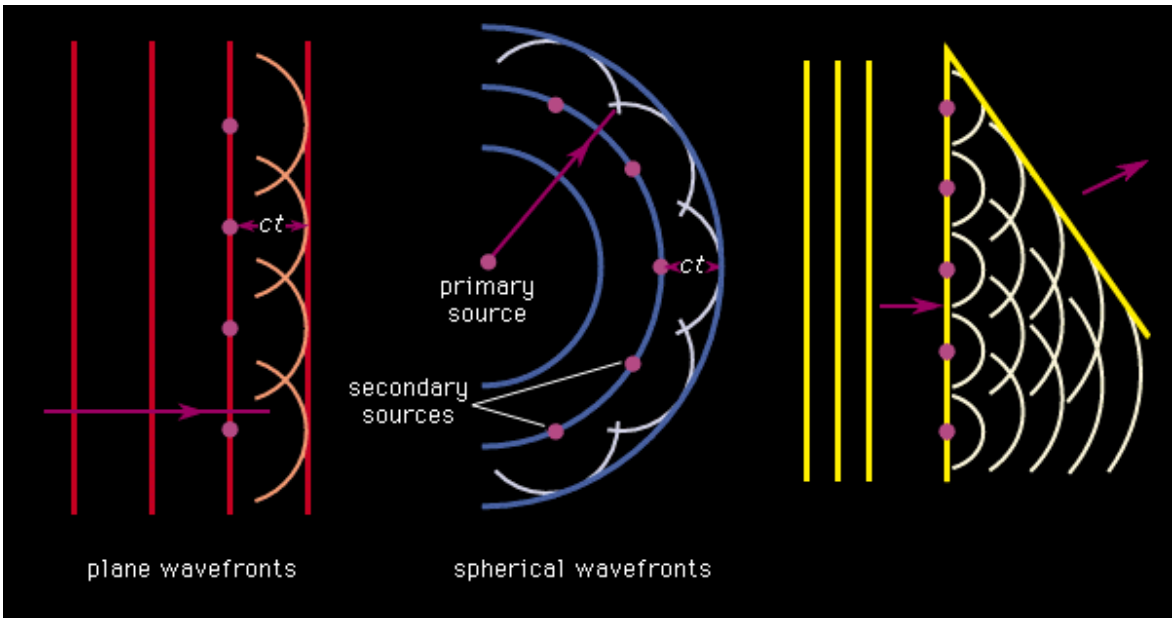
شکل1-1 جبهه موج کروی

برای بررسی و بیان انتشار موج در محیط های مختلف معادلات ماکسول به خوبی پاسخگو هستند بطوریکه با حل این معادلات می توان شکل موج و نحوه انتشار آن با زمان را بدست آورد.

از طرف دیگر به صورت ساده با استفاده از اصل هویگنس می توان به صورت هندسی انتشار موج را بررسی کرد.

1.2.1 اصل هویگنس

طبق اصل هویگنس هر نقطه روی جبهۀ موج اولیه همانند یک چشمۀ امواج کروی ثانویه عمل می کند بطوریکه جبهۀ موج اولیه در لحظه بعدی پوش این موجک های ثانویه است. افزون بر این، این موجک ها با سرعت و بسامدی مساوی با سرعت و بسامد موج اولیه در هر نقطه از فضا به پیش می روند. اگر محیط همگن باشد این موجک ها می توانند با شعاع متناهی تشکیل شوند و در صورتی که محیط ناهمگن باشد موجک ها به ناچار شعاع های بی نهایت کوچکی خواهند داشت(شکل 1-2).



شکل 1-2 اصل هویگنس

روشن است که اگر شعاع یک جبهه موج کروی در زمان t برابر با r باشد در لحظه بعدی $t + dt$ شعاع آن $r + vdt$ خواهد شد که در اینجا v سرعت فاز موج است[3].

2.2.1 نور ستارگان

ستارگان اجرام نورانی هستند که در فاصله چندین سال نوری از ما قرار دارند. بررسی نور این اجرام مبحث مهمی در نجوم می باشد چرا که تنها راه آگاهی از این اجرام بررسی نور منتشر شده از آنها می باشد.
به دلیل زیاد بودن فاصله ما از ستارگان می توان به جرأت گفت این اجرام، که ابعاد بزرگی آنها می تواند خیلی بزرگتر از آنی باشد که تصور می کنیم، همانند یک منبع نور نقطه ای می باشند که امواج ساطع شده از آنها امواج کروی می باشد ولی در فاصله بی نهایت این امواج را با دقت خوبی می توان تخت فرض کرد. لذا در عمل ستارگان به عنوان یک منبع نور نقطه ای که جبهه موج آن تخت می باشد در نظر گرفته می شود.

3.2.1 پرتو نور

مفهوم پرتو نور چیزی است که در سرتاسر بحث نور و جبهه موج مورد توجه خواهد بود. پرتو نور خطی است که متناظر با راستای جریان انرژی تابشی در فضا کشیده می شود. در یک محیط همسانگرد، یعنی محیطی که خواص آن در تمامی جهات یکسان است، پرتوها گذرگاههای متعامد جبهه های موج هستند یعنی این پرتوها خطوطی اند که در هر نقطه سطح مقطع بر جبهه های موج عمودند. بدیهی است که در چنین محیطی، هر پرتو موازی بردار انتشار K است. درون مواد همسانگرد همگن پرتوها خطوط مستقیمی خواهند بود زیرا از راه تقارن نمی توانند در هیچ جهت ترجیحی خم شوند. بعلاوه به عنوان نتیجه ای از این نکته که سرعت انتشار در تمامی جهات در درون محیطی معین یکسان است فاصله مکانی بین دو جبهه موج، که در امتداد پرتوها اندازه گیری شده است. باید در همه جا یکسان باشد[3].

4.2.1 تلسکوپ های بزرگ

در سال های اخیر تلاش های زیادی برای طراحی و ساخت این تلسکوپ ها انجام گرفته و تکنولوژی فوق العاده ای در خدمت علم نجوم قرار گرفته تا رده جدیدی از تلسکوپ های اپتیکی را تهیه کند.

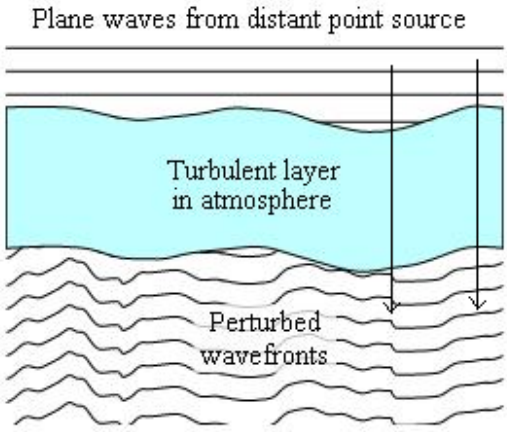
این تلسکوپ ها دارای قطر 30 متر تا 100 متر می باشند که هم آینه اولیه و هم آینه ثانویه آن ها به صورت تکه تکه می باشند.

پیش بینی می شود که این تلسکوپها با داشتن سیستم اپتیک تطبیقی در بیشتر اوقات، کارآیی خوبی داشته باشند و بتوان به تفکیک 1 میلی ثانیه در ناحیه V رسید .

3.1 آشفتگی جو

اتمسفر زمین یک محیط همگن و یکنواخت نیست و نواحی مختلف آن به دلیل اختلاف دما دارای ضریب شکستهای مختلف می باشند. لذا سرعت حرکت موج در نواحی مختلف تغییر خواهد کرد و نقاطی که دارای ضریب شکستهای زیاد هستند با سرعت پایینتر و نقاطی که دارای ضریب شکست های‌کمتر هستند با سرعت بالاتر حرکت خواهند کرد. بدین ترتیب اتمسفر بر روی انتشار نور تاثیر می‌گذارد و نور ستاره که جبهه موجش تخت است وقتی که از اتمسفر عبور می‌کند تحت تاثیر این اثر که آن را آشفتگی می‌نامند قرار می‌گیرد و دیگر موج تخت نخواهد بود.

تغییر در ضریب شکست منجر به ایجاد اختلاف فاز بین نقاط مختلف یک جبهه موج می‌شود. اپتیک تطبیقی در جستجوی برطرف کردن این ابیراهی‌های ایجاد شده خواهد بود شکل1-3.



شکل 1-3 اثر آشفتگی جو

1.3.1 پارامتر فرید

شناخت ابیراهی یک منطقه بسیار مهم است چرا که سیستم اپتیک تطبیقی، تلسکوپ و ... بر اساس مشخصه های آشفتگی جو منطقه مورد نظر طراحی خواهند شد. مطمئنا اگر آشفتگی جو در طراحی رصدخانه در نظر گرفته نشود میزان کارایی تلسکوپ غیر قابل پیش بینی خواهد بود.

آشفتگی جو را در قالب پارامترهایی معرفی می کنند. یکی از مهمترین این پارامتر ها، پارامتر فرید[3] است.

پارامتر فرید طولی است که جبهه موج را با تقریب خوبی بتوان تخت فرض کرد. این کمیت را با r_0 نمایش می دهند[4].

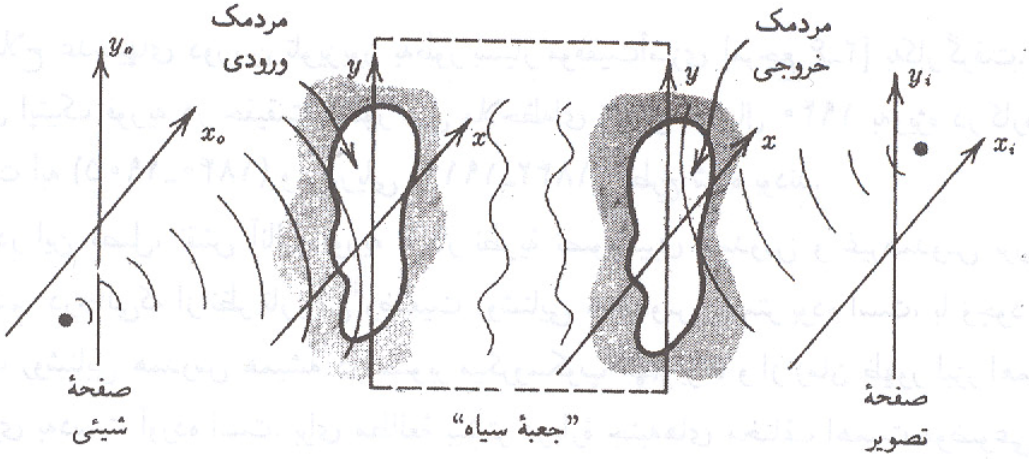
4.1 تئوری تشکیل تصویر[5]

فرض کنید که سیستم تصویرگیری مورد نظر از چندین تا عدسی که می توانند مثبت یا منفی باشند تشکیل شده است و این سیستم تصویرگیری، تصویر حقیقی از شیئ را ایجاد می کند. خواص این سیستم تصویرگیری

[3] Fried

را با این دیدگاه مشخص می کنیم که تمام عناصر تصویرگیری جملگی در یک جعبه سیاه منفرد جمع می شوند و اینکه خواص مهم سیستم فقط با مشخص کردن خواص نهایی این مجموعه کاملا بیان می شود.

با مراجعه به شکل 1-4 پایانه های این جعبه سیاه شامل یک مردمک ورودی، نشان دهنده یک دهانه متناهی (موثر یا واقعی) است که نور باید از آن بگذرد تا به عناصر تصویرگیری برسد، و یک مردمک خروجی (باز هم موثر یا واقعی)، نشان دهنده یک دهانه متناهی که هنگام ترک عناصر تصویرگیری نور باید از آن بگذرد، مشاهده می شود. فرض می شود که گذر نور از بین صفحات ورودی و خروجی را بتوان با اپتیک هندسی توصیف کرد.



شکل 1-4 مدل تعمیم یافته یک سیستم تصویرگیری

یک سیستم تصویرگیری را محدود شده با پراش گویند در صورتی که یک موج کروی واگرا، که از هر چشمه نقطه ای شیئ سرچشمه گرفته باشد را به یک موج جدید، باز هم کاملا کروی، تبدیل کندکه در یک نقطه ایده آل در صفحه تصویر همگرا شود. بنابراین خاصیت نهایی یک سیستم عدسی محدود شده با پراش آن است که یک موج کروی واگرای وارده بر مردمک ورودی یک موج کروی همگرا در مردمک خروجی منتقل شود.

از طرفی اگر در حضور یک چشمه نقطه ای، جبهه موج ترک کننده مردمک خروجی به طور قابل توجهی از شکل کروی کامل منحرف شود، می گوییم سیستم تصویر گیری ابیراهی دارد.

1.4.1 اثرهای پراش

چون اپتیک هندسی عبور نور از مردمک ورودی به مردمک خروجی را به خوبی توصیف می کند، اثرهای پراش نقش مهمی را در طول گذر نور از شیئ به مردمک ورودی و از مردمک خروجی به تصویر ایفا می کنند. در واقع، ارتباط دادن تمام محدودیت های پراش به هر یک از دو قسمت مسیر انتشار میسر است.

دامنه تصویر با یک انتگرال برهمنهی نشان داده می شود.

$$U_i(x_i, y_i) = \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x_i, y_i; x_0, y_0) U_0(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \qquad (2)$$

که در آن $U_i(x_i, y_i)$ دامنه تصویر در مختصات (x_i, y_i)، در پاسخ به یک چشمه نقطه ای $U_0(x_0, y_0)$ واقع در (x_0, y_0) است. در غیاب ابیراهی ها، پاسخ h از یک موج کروی که از مردمک خروجی به یک نقطه تصویر ایده آل $x_i = Mx_0$ ، $y_i = My_0$ همگرا می شود بدست می آید. در حالت کلیتر M می تواند منفی یا مثبت باشد.

با این طرز نوشتار تابع پخش شدگی را چنین تعریف می کنیم :

$$PSF = |h(x_i, y_i; x_0, y_0)|^2 \qquad (3)$$

از آنجا که توزیع دامنه نور حول نقطه تصویر ایده آل فقط نقش پراش فرانهوفر مردمک خروجی به مرکز مختصات $(x_i = Mx_0 , y_i = My_0)$ است. بنابراین

$$h(x_i, y_i; x_0, y_0) = K \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \exp\{-i \frac{2\pi}{\lambda d_i} [(x_i - Mx_0)x + (y_i - My_0)y]\} dxdy \qquad (4)$$

که K یک ثابت مختلط است و تابع مردمک P، داخل مردمک یک و خارج مردمک صفر است.

از این رو در حالت کلیتر تصویر را همگشت تابع پخش شدگی نقطه در شیئ مورد نظر در نظر می گیریم(شکل 1-5).