GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

TREBALL FINAL DE GRAU

SIMULACIÓ FOTOMÉTRICA DE SISTEMES ÓPTICS COMPLEXES

ADRIÀ ROIG DE BUSTOS

SANTIAGO ROYO ROYO
Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes (CD6)

1 DE JUNY DE 2016

GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

El/s Sr./Srs. Santiago Royo Royo com a tutor/s i director/s del treball,

CERTIFICA/CERTIFIQUEN

Que el Sr./Sra. Adrià Roig de Bustos ha realitzat sota la seva supervisió el treball "Simulació fotomètrica de sistemes òptics complexes" que es recull en aquesta memòria per optar al títol de grau en Òptica i Optometria.

I per a què consti, signo/em aquest certificat

Sr/a Santiago Royo

Director/a del TFG

Terrassa, 15 de Maig de 2016

GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

SIMULACIÓ FOTOMÉTRICA DE SISTEMES ÓPTICS COMPLEXES

RESUM

L'objectiu principal d'aquest treball és entendre que és un sistema LADAR i explicar com funciona. Prestarem molta atenció a la caracterització radiomètrica dels sistemes LADAR, que validarem i simularem amb un sistema LADAR senzill.

El programa utilitzat per duu a terme el projecte és el ZEMAX, un programa de disseny òptic molt complert que ens permetrà dissenyar i simular el nostre sistema LADAR.

En el context teòric del projecte és parlarà sobre els fonaments dels sistemes LADAR i la equació de rang, que és la principal eina per la caracterització radiomètrica dels sistemes LADAR. Per emmarcar els continguts, s'ha escrit un capítol introductori a la radiometria i la fotometria, on s'expliquen conceptes bàsics de les magnituds i relacions radiomètriques i fotomètriques. El treball també conté un capítol introductori sobre l'ús i les funcions bàsiques del ZEMAX, per tal d'entendre el procés que s'ha seguit en el transcurs del treball.

Finalment, a l'apartat de resultats hi ha un capítol de validació d'equacions teòriques mitjançant simulacions amb sistemes òptics senzills amb el ZEMAX. Posteriorment, i per tal de caracteritzar detalladament la radiometria d'un sistema LADAR, és simula amb un disseny senzill propi un sistema modificant diverses variables i característiques del *target* i de l'ambient.

GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

SIMULACIÓ FOTOMÉTRICA DE SISTEMES ÓPTICS COMPLEXES

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es entender qué es un sistema LADAR y explicar cómo funciona. Prestaremos mucha atención a la caracterización radiométrica de los sistemas LADAR, que validaremos y simularemos con un sistema LADAR sencillo.

El programa utilizado para llevar a cabo el proyecto es el ZEMAX, un programa de diseño óptico que nos permitirá diseñar y simular nuestro sistema LADAR.

En el contexto teórico del proyecto se hablará sobre los fundamentos de los sistemas LADAR y la ecuación de rango, que permite la caracterización radiométrica de los sistemas LADAR. Para enmarcar el trabajo, se ha escrito un capítulo introductorio a la radiometría y la fotometría, donde se explican conceptos básicos de las magnitudes y relaciones radiométricas y fotométricas. El trabajo también contiene un capítulo sobre el uso y las funciones básicas del ZEMAX, para entender el proceso que se ha seguido en el transcurso del trabajo.

Finalmente, en el apartado de resultados hay un capítulo de validación de ecuaciones teóricas mediante simulaciones con sistemas ópticos sencillos con el ZEMAX. Para caracterizar detalladamente la radiometría de un sistema LADAR se simulará con un diseño propio sencillo modificando diversas variables y características del *target* y del ambiente.

GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

SIMULACIÓ FOTOMÉTRICA DE SISTEMES ÓPTICS COMPLEXES

SUMMARY

The main objective of this project is to understand what a LADAR system is and explain how it works. We will pay close attention to the radiometric characterization LADAR systems, which we will simulate and validate with a simple LADAR system.

The program used to carry out the project is ZEMAX, an optical design software that will allow us to design and simulate our LADAR system.

In the theoretical context of the project we will discuss the fundamentals of LADAR systems and the range equation, which allows the radiometric characterization of LADAR systems. To understand the project, I have written an introductory chapter to radiometry and photometry, which explains the basic concepts about photometry and radiometry. The work also contains a chapter that explains the basic functions of ZEMAX in order to understand the process that has been followed during the project.

Finally, in the results section there is a chapter about the validation of theoretical equations using simulations with simple optical systems designed with ZEMAX. To characterize in detail the radiometry of a LADAR system we will simulate with a simple design modifying several variables and characteristics of the target and the environment.

GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

SIMULACIÓ FOTOMÉTRICA DE SISTEMES ÓPTICS COMPLEXES

EXTENDED SUMMARY

The main objective of the project is to validate and study with detail the radiometry and photometry of a complex optical system like a LADAR system (Laser Detection and Raging), that we can simplify as a light sonar to detect objects in space by emitting a signal and his posterior reception and processing. This study examines only the emission and reception of the signal and all optical phenomena occurring during the propagation of the signal to characterize the radiometry of the optical system in order to predict the power received by the detector. Other complex issues such as signal processing and study the noise of the signal are not the object of study in this project. It is very important the radiometric characterization of the system in order to process the signal received by the detector and calculate the position of the target. The detector must receive a minimum amount of radiant power, because the electrical signal produced by the photodiode is proportional to the power received by the detector.

To achieve this main objective it is necessary fully understand the fundamentals of LADAR systems, especially the range of the equation, which is the radiometric characterization LADAR system. You should also understand the basic concepts of radiometry and photometry in order to understand the radiometry of LADAR system. The most entertaining part and the one who has required more dedication has been learning to use ZEMAX, an optical design software, which has so many different

functions and we had to dominate many of them in order to carry out the simulations correctly.

The theoretical part have three different main parts. The first part is an introduction to radiometry and photometry that explains the basics of these disciplines. First of all, it is explained the definitions of radiometry and photometry and his relationship with the spectral sensitivity curve. Another important basic concept is the solid angle, which is essential to characterize a light source in a particular direction and, in general, the radiometry of any optical system. This part also explains the fundamental quantities in radiometry and photometry, which will define the emission, transmission and reception of radiant energy in any optical system. This part also explain in detail the Lambertian diffusers, because in our simulations we will define the target as a Lambertian diffuser. A Lambertian diffuser is an object that emits radiance or luminance that do not depend on the direction of observation. The end of this section explains the radiant flux transmission through a standard optical system, since there is always a loss of radiant energy when the light passes through an optical surface, even if this loss is very small. This loss can be minimized with optical coatings, but that's not the purpose of this project. The second part includes the theory about LADAR systems, ranging systems similar to RADAR systems but which work in a different part of the electromagnetic spectrum. The LADAR systems are based on the emission and subsequent reception of a signal, in this case is a laser that carries radiant energy, which by processing the electrical signal induced by the laser receiver, we can find out the exact position of an object through time of flight of the signal sent. The conversion of radiant energy to electrical signal is carried out using a photodiode. This phenomenon is proportional to the power or radiant flux received by the detector, therefore, the radiometric characterization of a LADAR system is essential. The range equation allows us to characterize the radiometry of any LADAR system and, therefore, it will be the main object of study of this project. This section also explains the components of any standard LADAR system and the similarities and differences between the LADAR and RADAR systems. The third part introduces the reader to ZEMAX, the optical design program used to design a simple LADAR system and carry out the radiometric simulations in this simple LADAR system. The program is very intuitive, but it is necessary to spend time to understand what you are doing in order to

find the correspondence between simulations and theoretical equations. The program works in two different modes, the sequential mode, in which the light travels through the optical system in a default order defined for the optical surfaces placed by the user without passing twice for same surface, and the non-sequential mode, in which the light has no predefined order and may pass several times in a surface or any time. Each mode is suitable for the design of a different type of optical systems, sequential mode is suitable for imaging systems like a telescope, and however, non-sequential mode is suitable for non-imaging systems like a LADAR system. This project talks about the various basic functions for each mode, which typically are similar, and specific functions for non-sequential mode to characterize the scattering or the bilk scattering in the optical system. We will also talk about light sources and detectors available ZEMAX. Personally I designed optical elements such as the diffusing lens of the laser beam and the receiving lens that focuses rays towards the detector using sequential design and then I add a flat surface as a target, a light source and detector using non-sequential design.

The results chapter also contains three sections, which are the validation of the theoretical equations, the explanation of my simple LADAR system design and simulation results with the simple LADAR system modifying several environmental ans target variables. The validation of the theoretical equations is presented with three simple systems that are used to justify the use of different equations using simulations of these simple systems. These three simple systems are subsystems of our LADAR system. The first system justifies the calculation of irradiance from the program and predicts the irradiance that the program will give you approximately, since it changes for each simulation. The system contains a point source that emits in a determined and fixed solid angle and changing the distance between the source and the detector we will change the irradiance received by the detector. The second system justifies the loss of radiant flux through a standard optical system without optical coatings. The system consists of a point source which sends light to a converging lens so that the entire flow passes through the lens and we collect the outgoing flux with a detector in the position of the image of the point source. The third main system justifies the great loss of energy in a system LADAR, because only a small portion of the scattered rays reach the detector. The system consists of a source that simulates a laser diode, a flat lambertian

surface as a target and a rectangular detector. The second section explains in detail the elements of my simple LADAR system, consisting of a source that simulates a diode laser, a diffusing lens that spread out the laser beam, a flat lambertian surface as a target and a receiving lens that focuses the rays into a rectangular detector. The last section presents the results of the simulations modifying several target variables and studying his influence into the radiometry of the system. The relationship between the distance from the target and received power detector is not linear because the distance is squared in the formula, however, the relationship between the reflection coefficient and the target received power is linear. The atmospheric simulations using the Mie model had shown that if a dense fog is between the target and the source, most of the rays do not reach the target and, therefore, no suitable rays are available for measures of position.

The most important conclusions that I have reached with the simulations are that the radiometric characterization of LADAR system is complex and depends on the optical elements involved in the system because they can change for every LADAR system. My LADAR system was very simple but has served to validate the theoretical equations of the equation range LADAR system. The distance of the target is the most important and decisive factor to characterize the power loss in a LADAR system. It has also been shown that complex atmospheric factors such as fog can significantly affect the measurements of the LADAR system and don't allow the emitted signal reach the target, and therefore, cannot make measurements of the position of the object.

The books used in this project talk about optics in general, particularly optical instruments, radiometry and photometry. To learn how to use the ZEMAX I used the ZEMAX user's manual. I found very instructive and useful the knowledge base of ZEMAX where people write articles that talk about how to use several advanced ZEMAX functions that are not explained in the user manual.

ÍNDEX

1. Presentació i motivacions personals del treball
2. Objectius del treball
3. Fonaments teòrics
   3.1. Radiometria i fotometria
      3.1.1. Definició de radiometria i fotometria
      3.1.2. Concepte d'angle sòlid
      3.1.3. Magnituds radiomètriques fonamentals
      3.1.4. Magnituds fotomètriques
      3.1.5. Difusors perfectes
      3.1.6. Avaluació radiomètrica d'un sistema òptic
   3.2. Sistemas LADAR
      3.2.1. Fonaments de los sistemes LADAR
      3.2.2. Radiometria d'un sistema LADAR i equació de rang
   3.3. Programa de disseny òptic (ZEMAX)
      3.3.1. Introducció a ZEMAX
      3.3.2. Mode seqüencial
      3.3.3. Mode no seqüencial
4. Resultats
   4.1. Validació
   4.2. Disseny del sistema LADAR
   4.3. Simulació del sistema LADAR
5. Conclusions

PRESENTACIÓ I MOTIVACIONS PERSONALS DEL TREBALL

L'objectiu principal d'aquest treball és modelitzar fotométricament i radiométricament un sistema òptic complex com un sistema LADAR (LAser Detection And Raging) que, com a simplificació ràpida, es pot dir que és un sonar de llum que permet localitzar objectes en l'espai gràcies a l'emissió d'una senyal i la seva posterior recepció i processament. Per tal de dur a terme aquest objectiu utilitzarem un programa de disseny òptic capaç de generar simulacions del sistema LADAR i validar els nostres càlculs teòrics i la literatura al respecte d'aquests tipus de sistemes òptics.

Pel que fa a les meves motivacions personals sempre hem va agradar molt la part d'òptica aplicada de la nostra carrera, que en la meva opinió és una part essencial de la mateixa. Quan vaig veure la proposta del projecte no vaig dubtar ni un segon en demanar el treball, que per la meva satisfacció, me'l van assignar. No hi ha una gran oferta d'aquests tipus de treballs així que em vaig sentir bastant afortunat i ho vaig afrontar amb moltes ganes.

El que més valoro de tot el projecte és haver tingut la oportunitat de iniciar-me en l'ús d'un programa de disseny òptic amb totes les infinites possibilitats que ofereix per dissenyar i simular qualsevol sistema òptic que et passi per el cap. Encara que només he tractat una part ínfima de les funcions del programa crec que ha sigut una bona iniciació i he après molt conceptes nous en òptica.

Adrià Roig

OBJECTIUS DEL TREBALL

Els objectiu principal treball és validar la correspondència entre la literatura i les equacions teòriques sobre els sistemes LADAR amb les simulacions realitzades amb un sistema LADAR senzill. Un objectiu important és entendre perfectament tota la part teòrica que envolta el treball com teoria sobre radiometria i fotometria i sobre sistemes LADAR, ja que si no s'entenen els conceptes teòrics no s'entendrà la correspondència amb les simulacions.

També s'estudiarà com afecten diversos paràmetres variables en la radiometria del sistema LADAR com són la distancia amb el *target*, que pot prendre una infinitat de valors, o el coeficient de reflexió difusa del *target*, que el seu rang de valors és més reduït però és important de caracteritzar.

Finalment intentarem simular el sistema LADAR quan les condicions ambientals no són ideals, modelitzant la atenuació atmosfèrica o la boira mitjançant diversos models teòrics.

FONAMENTS TEÒRICS

RADIOMETRIA I FOTOMETRIA

Definició de radiometria i fotometria

La radiometria estudia la energia radiant transportada per una ona electromagnètica per qualsevol longitud d'ona de l'espectre electromagnètic.

La fotometria estudia el flux de energia d'una ona electromagnètica a la regió visible del espectre electromagnètic i amb l'objectiu de la avaluació de la energia radiant com a estímul productor de una sensació visual. Es diferencia, doncs, de la radiometria en què està considerada per un determinat observador.

Cada observador te una sensibilitat espectral diferent, aquest fet ha portat al establiment de un observador teòric que s'utilitza com a referència. La CIE ha establert la sensibilitat espectral de l'observador patró en condicions fotòpiques (V_λ). En visió fotòpica, la màxima sensibilitat es troba a una longitud d'ona de 550 nanòmetres, mentre que en condicions escotòpiques aquest valor es desplaça a una longitud d'ona de 510 nanòmetres.

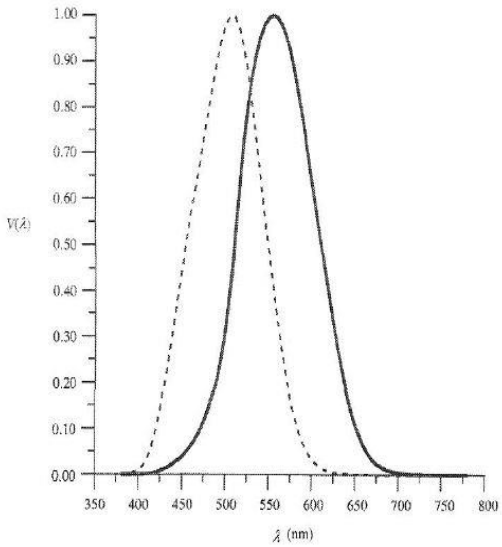


Figura 3.1.1 *Sensibilitat espectral en visió fotòpica i escotòpica*

Font: *Óptica Geomètrica*

Concepte d'angle sòlid

Angle sòlid (Ω): Considerem una superfície tancada S y un punt P al seu interior. Si des de P es traça un petit con que interseca amb al superfície S amb un centre O, la porció de l'espai delimitada per aquesta superfície cònica defineix l'angle sòlid. La seva unitat en el SI és el estereoradiant (sr). S'expressa com:

$$\Omega = \frac{S_{\perp}}{R^2} = \frac{S\cos\theta}{R^2}$$

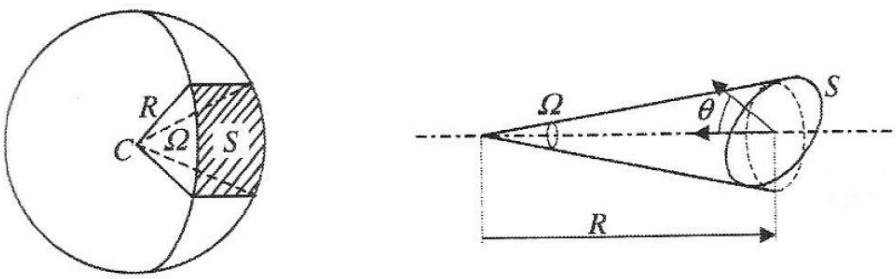


Figura 3.1.2 *Representació gràfica de l'angle sòlid*

Font: *Óptica Geomètrica*

On S és l'àrea de la superfície delimitada per el con, R és la distància entre el punt P i el punt O i θ és el angle format entre la normal de S i el vector PO. També es por definir l'angle sòlid en funció d'unes altes variables com:

$$\Omega = 2\pi\,(1 - \cos\alpha)$$

On α és l'angle entre la generatriu del con circular i el seu eix de simetria.

Magnituds radiomètriques fonamentals

Flux o potència radiant (F_e): Energia emesa per unitat de temps per un objecte en forma de radiació en totes direccions. La seva unitat en el SI és el watt (W).

Intensitat radiant (I_e): Flux o potència radiant emesa per unitat d'angle sòlid en una direcció específica. Serveix per caracteritzar fonts puntuals en una direcció concreta. La seva unitat en el SI són els W/sr. S'expressa com:

$$I_e = \frac{F_e}{\Omega}$$

Irradiància (E_e): Flux o potència radiant rebuda per un element de superfície per unitat d'àrea de la mateixa superfície. Els detectors utilitzen aquesta magnitud per mesurar el flux radiant que arriba a la seva superfície. La seva unitat en el SI són els W/m^2. S'expressa com:

$$E_e = \frac{F_e}{S_R}$$

Excitància radiant (M_e): Flux o potència radiant emesa per un element de superfície per unitat d'àrea de la mateixa superfície. Serveix per caracteritzar fonts extenses en totes direccions. La seva unitat en el SI són els W/m^2. S'expressa com:

$$M_e = \frac{F_e}{S_E}$$

Radiància (L_e): Intensitat radiant emesa per un element de superfície per unitat d'àrea de la mateixa superfície en una direcció específica. Serveix per caracteritzar fonts extenses en una determinada direcció. La seva unitat en el SI són els W/(sr·m^2). S'expressa com:

$$L_e = \frac{I_e}{S_E \cos\theta} = \frac{F_e}{S_E\,\Omega\,\cos\theta}$$

Magnituds fotomètriques

Flux lluminós (F): Flux radiant ponderat per la corba de la sensibilitat espectral de l'observador patró. La seva unitat en el SI és el lumen (lm). Amb aquesta definició s'assegura que certa quantitat de lúmens produirà la mateixa sensació. S'expressa com:

$$F = K_0 \sum V_\lambda(\lambda)\, F_e(\lambda)$$

On K_0 = 683 lm/W.

Intensitat lluminosa (I): Flux lluminós emès per unitat d'angle sòlid en una direcció específica. Serveix per caracteritzar fonts puntuals en una direcció concreta. La seva unitat en el SI és la candela (cd). S'expressa com:

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

Il·luminació (E): Flux lluminós rebut per un element de superfície per unitat d'àrea de la mateixa superfície. Els detectors utilitzen aquesta magnitud per mesurar el flux lluminós que arriba a la seva superfície. La seva unitat en el SI és el lux (lx). S'expressa com:

$$E = \frac{F}{S_R}$$

Excitància lluminosa (M): Flux lluminós emès per un element de superfície per unitat d'àrea de la mateixa superfície. Serveix per caracteritzar fonts extenses en totes direccions. La seva unitat en el SI són els lm/m^2. S'expressa com:

$$M = \frac{F}{S_E}$$

Luminància (L): Intensitat lluminosa emesa per un element de superfície per unitat d'àrea de la mateixa superfície en una direcció específica. Serveix per caracteritzar fonts extenses en una determinada direcció. La seva unitat en el SI és el nit (nt). S'expressa com:

$$L = \frac{I}{S_E \cos\theta} = \frac{F}{S_E\, \Omega\, \cos\theta}$$

Difusors i emissors perfectes

En general, la luminància depèn la direcció d'observació de la superfície. No obstant això, en els emissors i difusors perfectes la luminància és constant per a qualsevol direcció o angle d'observació.

En el cas d'un difusor perfecte quan la direcció d'observació coincideix amb la normal de la superfície. La luminància del difusor perfecte es defineix com:

$$L = \frac{I_0}{S}$$

D'altra banda, per a una direcció o angle d'observació qualsevol, la luminància del difusor perfecte ve donada per:

$$L = \frac{I_\theta}{S \cos\theta}$$

Igualant les expressions anteriors s'obté la llei dels difusors perfectes o llei de Lambert, que s'expressa com:

$$I_\theta = I_0 \cos\theta$$

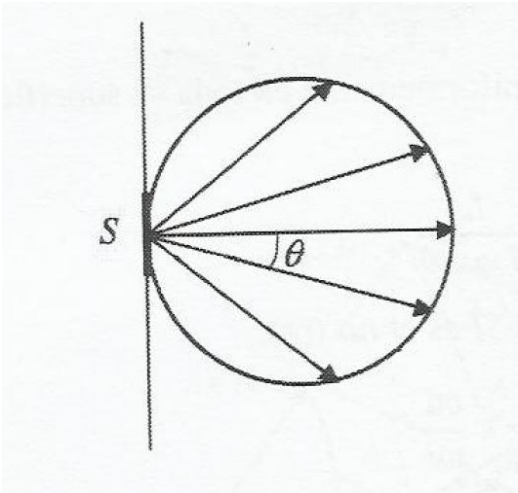


Figura 3.1.3 *Diagrama de distribució de la intensitat en un difusor perfecte*

Font: *Óptica Geomètrica*

Els objectes o superfícies que compleixen aquesta llei es diu que són difusors perfectes o lambertians. Una superfície amb certa rugositat es pot modelitzar com un difusor lambertià. Alguns exemples de difusors lambertians són el paper blanc, o una paret blanca.

Si es considera un emissor perfecte amb una excitància determinada, el flux emès per aquesta superfície es pot expressar com:

$$F = M\,S$$

Per altra banda, tenint en compte que la superfície emet en una semiesfera d'angle sòlid 2π, podem demostrar que el flux emès el podem expressar com:

$$F = L\,S\,\pi$$

Igualant les expressions anteriors s'obté que la luminància d'un emissor de excitància determinada es pot expressar com:

$$L = \frac{M}{\pi}$$

Per altre banda, si es considera un difusor perfecte, la luminància serà deguda al flux incident a la superfície. El flux emès per el difusor lambertià anirà donat per:

$$F = \rho\, F_i = \rho\, E\, S$$

On ρ és el coeficient de reflexió difusa.

Tenint en compte que el difusor emet en una semiesfera d'angle sòlid de 2π i igualant les expressions s'obté què la luminància d'un difusor perfecte que rep una determinada il·luminació es pot expressar com:

$$L = \frac{\rho\, E}{\pi}$$

Totes aquests expressions es poden aplicar amb les seves magnituds radiomètriques homòlogues, tenint en compte la relació entre la radiometria i la fotometria.

Avaluació radiomètrica d'un sistema òptic

La radiometria d'un sistema òptic ens donarà una primera aproximació a la simulació d'un sistema LADAR. Considerem un sistema òptic amb dos elements de superfície conjugats S i S', podem demostrar que el flux que incideix en la PE del sistema òptic , subtendint un angle sòlid determinat, ve donat per:

$$F = L\, S\, \Omega = \pi\, L\, S\, (\sin u)^2$$

On *u* és l'angle d'obertura del sistema, que determina angle sòlid del feix incident.

Aquest flux incident es transmetrà a través el sistema òptic en una certa quantitat proporcional, que vindrà donada per els coeficients de transmissió, reflexió i absorció definits en cada superfície del sistema òptic.

El flux transmès pel sistema el podem expressar com:

$$F' = T\,F$$

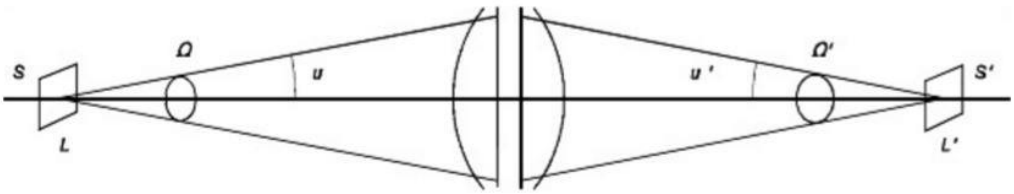


Figura 3.1.4 *Representació gràfica de la fotometria d'un sistema òptic*

Font: *Óptica Instrumental*

Des de l'òptica ondulatòria i considerant una incidència normal, podem demostrar que els factors de transmissió i reflexió es poden calcular com:

$$R = \frac{F_i}{F_r} = \left(\frac{n - n'}{n + n'}\right)^2$$

$$T = \frac{F_i}{F_t} = \frac{4\,n\,n'}{(n + n')^2}$$

$$R + T + A = 1$$

Pel que fa a l'absorció, normalment es considera nul·la. En cas contrari, també podem considerar que el vidre absorbeix la llum que passa un 1% per 10 mm de gruix de vidre. També es poden reduir les pèrdues per reflexió utilitzant làmines antireflectores, podent aconseguir pèrdues menors a l'1% del flux incident.

Finalment la il·luminació a la imatge es calcula aplicant la equació:

$$E' = \frac{F'}{S'} = \frac{\pi\,L\,T\,(\sin u)^2}{m^2}$$

$$m^2 = \frac{S'}{S}$$

SISTEMES LADAR

Fonaments dels sistemes LADAR

Tots els sistemes de detecció d'objectes, com els sistemes RADAR i LADAR, basen el seu funcionament a transmetre i rebre una ona electromagnètica i l'energia que transporta. L'única diferència entre aquests dos sistemes és que treballen en diferents zones de l'espectre electromagnètic. Mentre que el sistema RADAR treballa amb ones de ràdio, els sistemes LADAR treballen amb llum. D'altra banda, comparteixen certs principis comuns, com el temps de propagació. En aquest apartat parlarem les diferències i semblances dels sistemes RADAR i LADAR.

El subsistema generador de senyal, que en els sistemes RADAR és un oscil·lador o amplificador, en els sistemes LADAR és un làser, que determina la longitud d'ona i la forma de l'ona generada, així com la potència del senyal. Els sistemes RADAR normalment treballen amb bandes i els desenvolupadors de sistemes RADAR es solen guiar per factors com la propagació atmosfèrica per escollir les bandes. Però en general, la longitud de ona pot ser qualsevol si es realitza el disseny de l'oscil·lador corresponent. D'altra banda, els desenvolupadors de sistemes LADAR no tenen aquesta flexibilitat, perquè estan limitats a les longituds d'ona adequades per als làsers i detectors disponibles. Làsers de gas, com el de CO_2, operen en un rang de longituds d'ona molt discret i, tot i que es pot ajustar variant els isòtops del gas, el gas segueix operant en un rang discret. Els laseres d'estat sòlid també presenten característiques similars.

Les diferents formes de ona utilitzades en els sistemes RADAR són una ona contínua (CW), modulació de l'amplitud o la freqüència (AM / FM) o en forma de pols, són les mateixes usades en els sistemes LADAR, encara que el mecanisme per aconseguir una determinada forma d'ona és diferent per a cada sistema. Produir la forma d'ona desitjada en un sistema RADAR pot ser tan simple com encendre i apagar l'oscil·lador o transmissor, d'altra banda, en els sistemes LADAR s'aconsegueix operant en el camí òptic del làser.

Com el alineament òptic de els elements del sistema és crític, s'han d'utilitzar bases molt estables per als elements òptics.

Un cop s'ha generat el senyal, s'ha de llançar cap al *target*. En els sistemes RADAR s'utilitza una antena per aconseguir aquest objectiu. D'altra banda, en els sistemes LADAR aquest element és un telescopi o un sistema òptic divergent. La configuració més simple per a un sistema LADAR és la configuració biestàtica, en què el làser i el receptor estan separats. El principal avantatge d'aquesta configuració es que no hi ha cap interferència entre el canal generador i el canal receptor. Encara que aquesta configuració és mecànicament simple, ocupa un gran espai, especialment en sistemes RADAR. Degut a aquest inconvenient, la configuració més típica en sistemes RADAR es la monoestàtica, en que el generador de senyal i el receptor són un únic element.

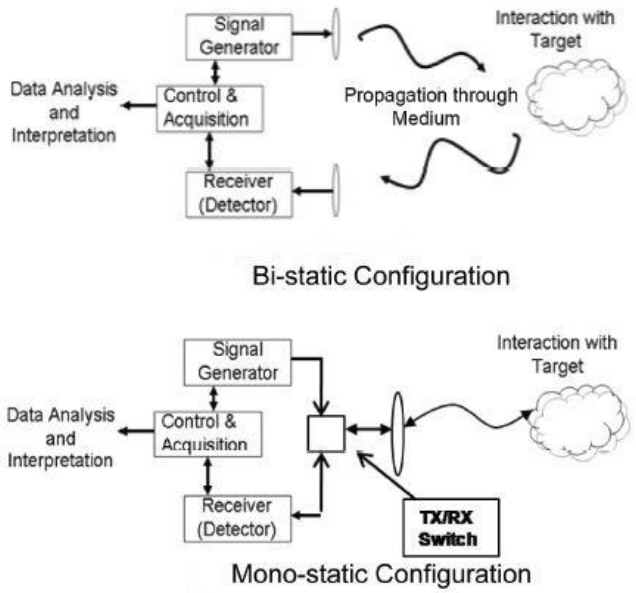


Figura 3.2.1 *Configuracions típiques dels sistemes LADAR i RADAR*

Font: *Direct-Detection LADAR Systems*

El subsistema receptor de senyal transforma l'energia que rep del *target* en senyal elèctrica que se pot processar per extreure la informació desitjada. Els sistemes LADAR no poden induir aquesta senyal elèctrica directament, per això s'utilitza un fotodíode per convertir els fotons incidents en senyal elèctrica.

Aquest fenomen és proporcional a la potència o flux radiant que rebi el receptor, per això és tan important la caracterització radiomètrica el sistema LADAR.

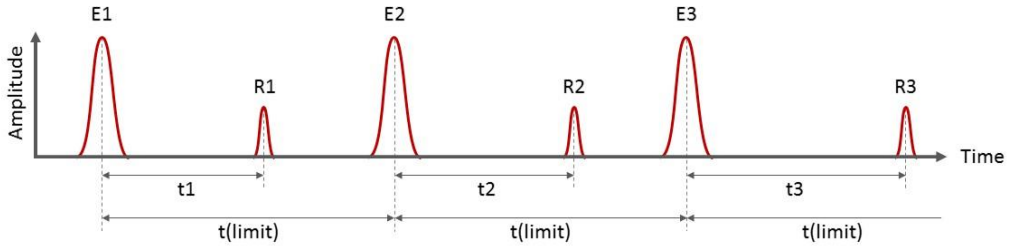


Figura 3.2.2 *Senyal de sortida d'un sistema LADAR*

Font: *Internet*

Com que les ones electromagnètiques viatgen a la velocitat de la llum en l'espai lliure, la relació entre la distància *R* i el temps de vol *t* ve donada per:

$$t = \frac{2R}{c}$$

Com que la majoria de sistemes RADAR terrestres tenen temps de vol *t* de només uns pocs segons normalment l'expressem en nanosegons, que permet simplificar encara més la equació, que podem expressar com:

$$t_{ns} = \frac{R}{0.150}$$

La resolució d'un sistema LADAR es defineix com la mínima distància de separació entre dos objectes il·luminats pel làser que poden ser detectats en el senyal rebuda. Si tenim en compte dos objectes són il·luminats amb dos polsos diferents que són prou petits, la resolució vindrà donada simplement per:

$$\Delta R = (R_1 - R_2)$$

D'altra banda, si un sol pols es suficientment ample per il·luminar els dos objectes simultàniament, la expressió de la resolució es pot escriure com:

$$t + \tau = \frac{2(R + \Delta R)}{c}$$

On τ és el temps de vol per la distancia ΔR, si treballem la expressió anterior podem veure que τ és pot expressar com:

$$\tau = \frac{2\Delta R}{c}$$

Alguns sistemes LADAR simples només fan una mesura per pols generat i no tenen en compte la resolució. No obstant això, hi ha sistemes LADAR que tenen processadors que permeten obtenir diverses mesures d'un sol pols generat.

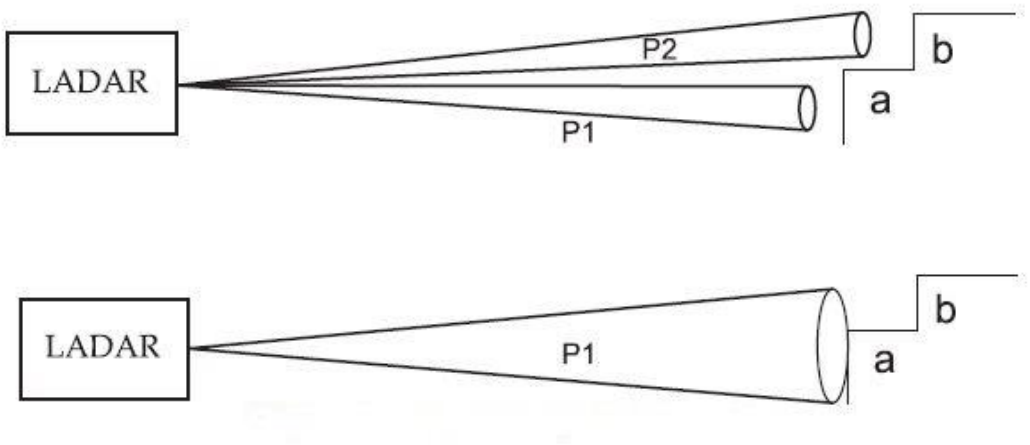


Figura 3.2.3 *Representació gràfica de la resolució d'un sistema LADAR*

Font: *Direct-Detection LADAR Systems*

Normalment, en els sistemes RADAR el *target* és de dimensions més reduïdes que les dimensions el feix incident, però en els sistemes LADAR és diferent, en aquests el *target* és més gran que el feix incident.

En sistemes LADAR el *target* es pot caracteritzar com un difusor lambertià o com difusor especular i també com a combinació de tots dos. Un superfície rugosa normalment la podem caracteritzar com un difusor lambertià, d'altra banda, les superfícies llises produeixen una difusió especular. La rugositat d'una superfície és una mesura relativa que depèn de la longitud d'ona amb al qual s'il·lumina la superfície, per això una superfície pot semblar rugosa amb una longitud de ona determinada i llisa amb una altra longitud d'ona diferent i presentar diferents comportaments segons el sistema de detecció que utilitzem.

En general, es pot establir les següents afirmacions sobre els sistemes RADAR i LADAR:

- Els sistemes RADAR són menys susceptibles a atenuació atmosfèrica que els sistemes LADAR.
- Els sistemes LADAR tenen una major resolució espacial però menor àrea efectiva de cerca que un sistema RADAR perquè els sistemes LADAR tenen una divergència menor que els RADAR.
- Els sistemes LADAR són mes efectius per fer mesures en espais reduïts com ambients urbans perquè presenten uns polsos molt curts i una divergència molt petita.

Radiometria d'un sistema LADAR i equació de rang

Cada sistema LADAR utilitza de una part diferent dels procés de propagació de la senyal generada. La descripció d'aquest procés es duu a terme mitjançant la equació de rang d'un sistema LADAR, que permet caracteritzar detalladament la radiometria d'un sistema LADAR. La equació de rang permet relacionar la potència del làser emissor amb la potència rebuda per el detector. Degut a que el procés de propagació por ser diferent segons el sistema LADAR, la equació de rang pot prendre diferents formes segons el sistema. En general s'han de tenir en compte els següents aspectes:

- Potència generada del làser (P_t)
- Diàmetre del làser i la seva divergència (θ_t)
- Transmissió atmosfèrica (τ_a)
- Reflectivitat del *target* (ρ_t)
- Dispersió angular del *target* (θ_R)
- Eficiència quàntica del receptor (η)

L'objectiu final de l'equació de rang és avaluar la quantitat d'energia emesa que finalment arriba al receptor, per, comparant-la amb les fonts de soroll, avaluar si el senyal és o no detectable.

Model de propagació del laser

Assumirem que el làser transmissor de senyal del sistema LADAR emet polsos de llum que existeixen per un curt període de temps, concretament considerarem que un pols rectangular que existeix durant un temps igual a la duració del pols. La potència instantània generada per el làser vindrà donada per la energia del pols dividit la duració del pols.

En aquest model de propagació del làser, el làser te un diàmetre que ve donat per multiplicar la divergència del làser per la distancia de propagació. Aquest model és vàlid quan el làser fa servir un element dispersor, en aquest cas l'angle de divergència anirà donat per el sistema dispersor, normalment un telescopi o un sistema divergent. Hi ha també sistemes LADAR en que el feix làser s'enfoca directament cap al *target*, en aquest cas el diàmetre del làser vindrà donat per el límit de la divergència del làser.

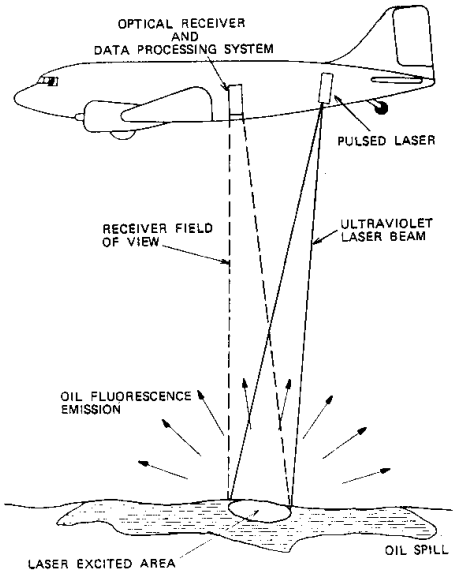


Figura 3.2.4 *Representació gràfica d'una aplicació d'un sistema LADAR*

Font: *Internet*

Una vegada sabem les dimensions del feix propagat, la irradiància *I* que arriba al *target* es por calcular com:

$$I_t = \frac{4\,P_t}{\pi(\theta_t R)^2}$$

En aquesta equació no s'han tingut en compte les pèrdues per la propagació atmosfèrica.

Transmissió atmosfèrica

Quan el làser generat es propaga a través de l'atmosfera, part de la seva energia és absorbida i dispersada per les partícules atmosfèriques i gasos. Aquesta atenuació depèn de la longitud d'ona del làser que es propaga per el medi.

Per quantificar la atenuació atmosfèrica es defineixen dos coeficients *a(R)* i *b(R)*, que són les coeficients d'absorció i dispersió respectivament. El coeficient absorció *a(R)* es degut a la presència de gasos comuns a la atmosfera, com el N_2, O_2 o CO_2.

El coeficient de dispersió *b(R)* depèn de la longitud d'ona i és degut a la dispersió de Rayleigh a través de les partícules atmosfèriques com al pols. La *R* en parèntesis denota que els coeficients poden canviar durant tota la propagació per els canvis en al composició atmosfèrica. Normalment no es coneix el valor d'aquests coeficients en tota la propagació i s'utilitzen valors mitjans per duu a terme els càlculs.

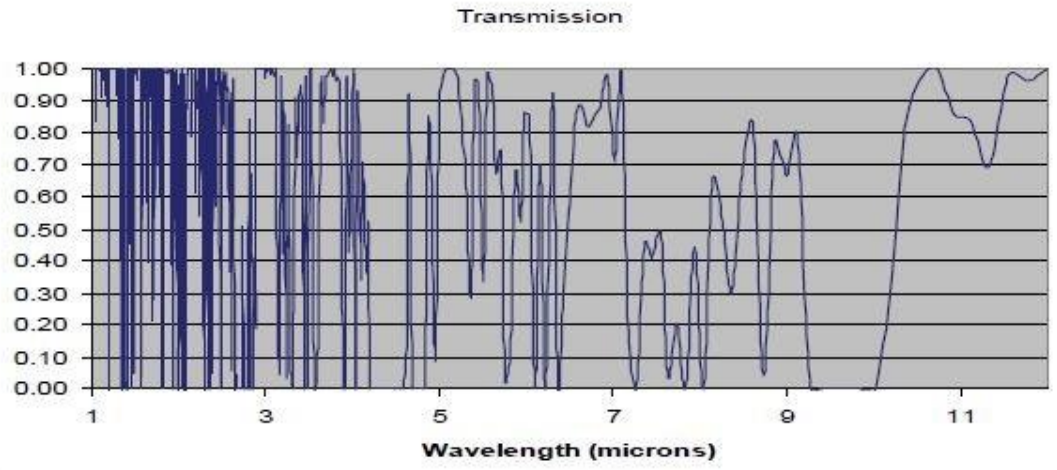


Figura 3.2.5 *Transmissió atmosfèrica*

Aplicant la llei de Beer per trobar la transmissió atmosfèrica, la expressió de la transmissió atmosfèrica queda com:

$$\tau_a = \exp[-(a+b)R]$$

Quan aquest efecte de atenuació atmosfèrica es té en compte en la propagació del làser cap al *target*, la irradiància que arriba el *target* s'expressa com :

$$I_t = \frac{\tau_a 4\, P_t}{\pi(\theta_t R)^2}$$

Reflectivitat del *target* i dispersió angular

La naturalesa reflectant del *target* es quantifica mitjançat la seva reflectància (p_t). La reflectància del *target* és una magnitud adimensional que mesura la capacitat d'un material per reflectir la radiació que hi incideix.

Els valors que pren aquest paràmetre oscil·len entre 2% i 25%, encara que en superfícies ben polides por arribar a valors molt més elevats. Un altre factor important per quantificar es el *dA*, que es calcularà en funció de quina es el mínim valor de aquestes tres quantitats:

- Mida del làser incident
- Mida angular del *target*
- Camp de visió del detector

Normalment el factor limitant és el làser incident, per tant el *dA* es pot calcular mitjançant l'expressió:

$$dA = \frac{\pi(\theta_t R)^2}{4}$$

Si el làser incident no és el factor limitant, el *dA* vindrà donat per la mida angular del *target* o el camp de visió del detector. Si el *target* és el factor limitant, el *dA* és calcula simplement com l'àrea del *target*, en canvi, si el camp de visió del detector rectangular limita el *dA* es calcula per l'expressió:

$$dA = (\gamma\, R)^2$$

On γ és pot calcular com la mida d'un costat del detector entre la focal de la lent que focalitza els raigs al detector.

Per calcular la potència del làser reflectida per el *target* s'han de tenir en compte tots els factors anteriors, per tant la expressió ve donada com:

$$P_{ref} = I_t \ \rho_t \, dA$$

La radiació reflectida pel *target* pot prendre diferents direccions depenent de la superfície reflectant. Per superfícies especulars, la divergència de la radiació reflectida es igual que la divergència de la radiació incident. Per superfícies rugoses, la radiació reflectida es difosa amb un angle més gran que la divergència de la radiació incident. L'angle sòlid en que la radiació és dispersada es denota com θ_R i generalment pot prendre valors de θ_t al quadrat per superfícies especulars i un valor de π per una superfície lambertiana. Valors entre aquests límits són possibles amb superfícies no completament llises o rugoses.

Si tenim la dispersió angular del raig reflectit podem calcular la irradiància *I* en el pla de la lent receptora. Això implica que la potència de la radiació dispersada és difosa per l'angle sòlid de la radiació dispersada. Es pot calcular aplicant l'expressió:

$$I_R = \frac{\tau_a \, P_{ref}}{\theta_R R^2}$$

La potència rebuda per el detector és el producte entre la irradiància rebuda per la lent receptora per la seva àrea. La expressió queda com:

$$P_R = \frac{\tau_a \pi \, D_R^2 \, P_{ref}}{4 \, \theta_R R^2}$$

Els equacions presentades en aquest apartat assumeixen que el feix làser arriba al *target* en un angle normal a la superfície del mateix *target*. Angles d'incidència no normals a la superfície del *target* produiran una potència menor al receptor.

Rendiment i eficiència del detector

La eficiència d'un sistema LADAR afecta a la potència mesurada per el sistema. La eficiència del sistema LADAR depèn de dos factors com són el factor de transmissió del sistema òptic i la eficiència quàntica del detector.

El factor de transmissió indica la fracció d'energia que transmet un sistema òptic. La equació definitiva per calcular la potencia que arriba al detector incorporant la transmitància del sistema òptic, s'expressa com:

$$P_R = \frac{\tau_o \tau_a^2 D_R^2 P_t \, \rho_t \, dA}{\theta_R R^2 (\theta_t R)^2}$$

El nombre de fotons *K* produïts per la potencia que arriba al detector és una variable aleatòria en que el seu valor ve donat per l'expressió següent :

$$E[K] = \frac{P_R \, \Delta t}{h\upsilon}$$

On E denota la operació d'esperança matemàtica. El nombre mitjà de fotoelectrons *N* produïts per el detector es igual al producte del nombre de fotons per la eficiència quàntica del receptor. Es pot expressar com :

$$E[N] = \eta \, E[K]$$

Els electrons produïts per la senyal òptica generen una senyal elèctrica que és digitalitzada. Aquesta senyal conté un component de soroll, que s'ha de tenir en compte però no tractarem en aquest treball.

PROGRAMA DE DISSENY ÒPTIC (ZEMAX)

Introducció a ZEMAX

ZEMAX és el programa estàndard de disseny òptic utilitzat en la industria que permet modelar, dissenyar i analitzar tot tipus de sistemes òptics, combinant disseny seqüencial i no seqüencial amb el anàlisis, optimització i simulació del sistema òptic. El programa ha sigut dissenyat per ser fàcil de fer servir, permetent una interacció amb el programa fàcil i molt intuïtiva.

Mode seqüencial

En el mode seqüencial, els raigs es calculen a través de les diferents superfícies en un ordre predefinit, des de la superfície objecte (OBJ) fins la superfície imatge (IMA). Els raigs passen un cop per cada superfície en l'ordre que nosaltres definim. El mode seqüencial no requereix molt de treball per part del ordinador per això es tan útil per al disseny, anàlisis i optimització de sistemes òptics. Aquest mode es especialment útil per sistemes òptics formadors de imatge com telescopis, microscopis y objectius fotogràfics, entre altres. La PE del sistema es defineix com la superfície predeterminada (STO), que es pot modificar directament o des del menú *System*.

Editors de dades

En mode seqüencial, les superfícies es poden crear o treure utilitzant el *Lens Data Editor*, així com definir els seus paràmetres i propietats . Els paràmetres que es poden introduir al programa són el radi de curvatura de les superfícies, la distància o espessor entre aquestes superfícies i el seu diàmetre, la seva esfericitat i el material.

Es necessari dir que si vols que la superfície sigui un mirall, no una superfície refractora, cal ficar *MIRROR* al apartat de material i també s'ha de definir un nou sistema de coordenades relatiu utilitzant un *coordinate break* (CB).

D'altra banda les propietats de la superfície s'editen des de la finestra *Properties* que inclou un gran nombre de característiques que es poden modificar, les principals són el tipus de superfície, la apertura del sistema, el *scattering* o dispersió, la inclinació o descentrament de la superfície i les característiques dels recobriments òptics.

Edit Solves Options Help

	Surf:Type	Comment	Radius		Thickness		Glass		Semi-Diameter		Conic
OBJ	Standard		Infinity		Infinity				Infinity		0.000000
1*	Standard		22.013593	V	3.258956	V	SK16		9.500000	U	0.000000
2*	Standard		-435.760436	V	6.007551	V			9.500000	U	0.000000
3*	Standard		-22.213277	V	0.999975	V	F2		5.000000	U	0.000000
STO*	Standard		20.291924	V	4.750409	V			5.000000	U	0.000000
5*	Standard		79.683603	V	2.952076	V	SK16		7.500000	U	0.000000
6*	Standard		-18.395333	M	42.207780	V			7.500000	U	0.000000
IMA	Standard		Infinity		-				18.172658		0.000000

Figura 3.3.1 *Editor de dades en mode seqüencial del programa*

Font: *ZEMAX*

Òbviament, a part del *Lens Data Editor*, hi ha altres editors com el *Merit Function Editor*, per editar la funció de mèrit utilitzada per optimitzar el sistema òptic, o el *Tolerance Data Editor* per toleràncies. No parlarem d'ells ja que no els he utilitzat i no han intervingut en el transcurs del projecte.

Finestra d'anàlisi

El menú *Analysis* et proporciona informació calculada segons els paràmetres i propietats definits prèviament al sistema òptic. El programa et pot proporcionar la informació gràficament o en text. Aquesta funció no canvia els paràmetres introduïts prèviament , nomes et dona la informació calculada de diversos aspectes del sistema òptic que tu has definit.

Pot realitzar càlculs de diversos camps com el traçat gràfic i analític de raigs, càlcul de la funció de transferència de modulació (MTF) o la funció de dispersió de punt (PSF), anàlisi del front d'ona, anàlisi de aberracions i càlculs de coeficients de Zernike, càlculs sobre polarització i càlcul del punts cardinals d'un sistema òptic.

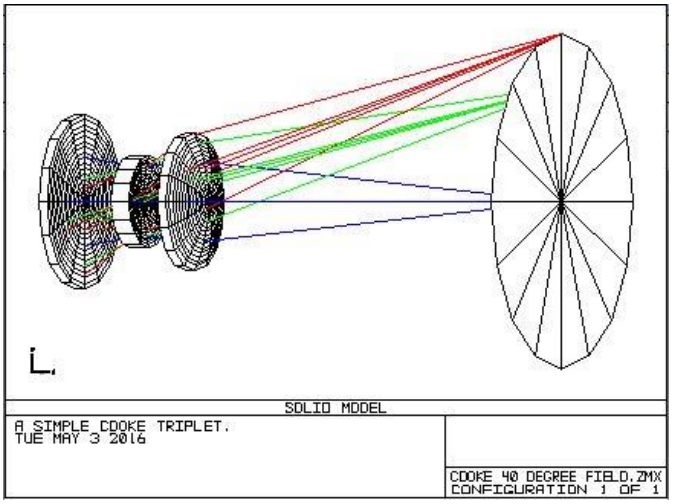


Figura 3.3.2 *Traçat de raigs 3D en un sistema òptic*

Font: *ZEMAX*

Això només és una petita mostra de tots els càlculs que es poden realitzar amb el programa. Per modificar i controlar la manera en que el programa et proporciona les dades i activar o desactivar certes opcions s'ha d'obrir la finestra *Settings*, que esta a les dades que et dona el programa.

Finestra del sistema

El menú *System* permet caracteritzar la llum que incideix al nostre sistema òptic que hem definit. Dins del menú *System* es poden distingir tres finestres principals que són la finestres *General*, *Field* i *Wavelengh*.

A la finestra *General* és poden definir conceptes com la apertura, les unitats, el medi, la polarització o caracterització els raigs. La finestra *Field* és defineix el camp del sistema òptic mitjançant l'angle o la mida del objecte o imatge. Finalment, la finestra *Wavelengh* permet definir les longituds d'ona de la llum que entra al sistema.

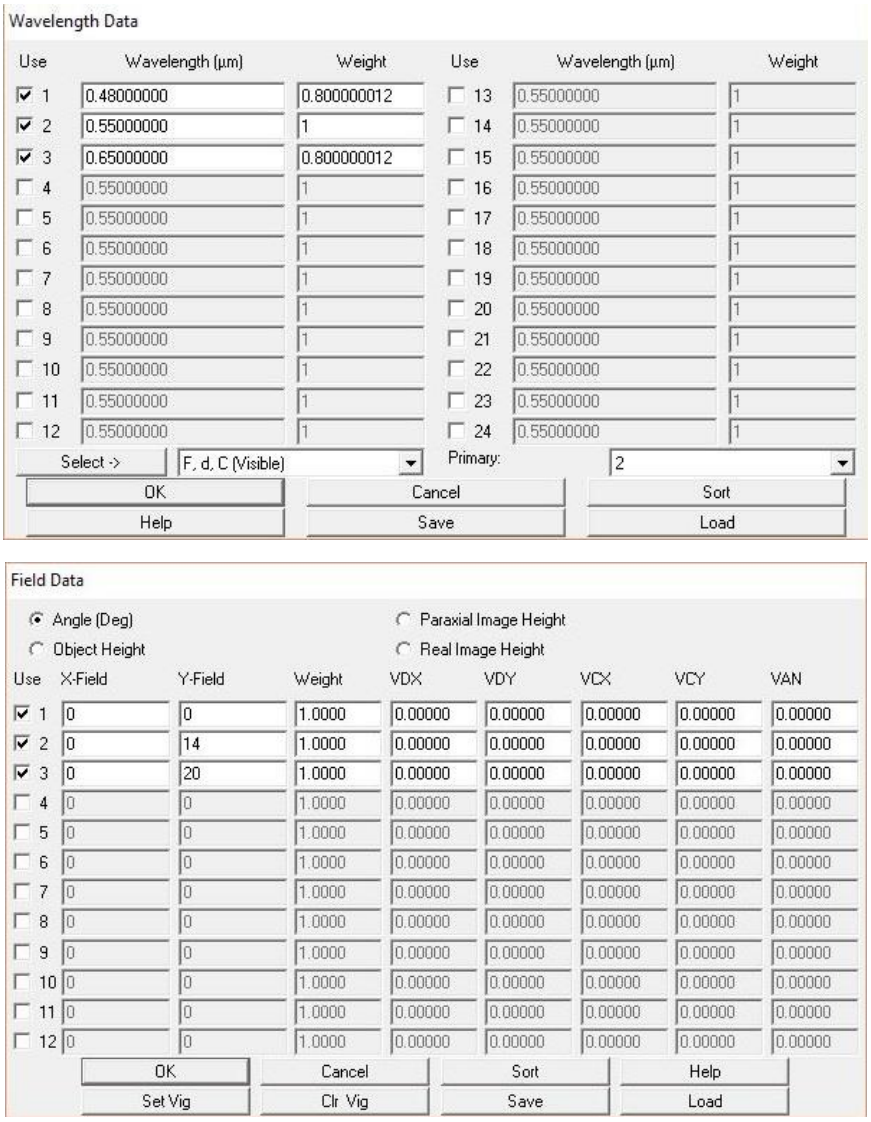


Figura 3.3.3 *Finestres de Wavelengh i Field del programa*

Font: *ZEMAX*

Finestra d'eines

El menú *Tools* permet realitzar funcions mes complexes com optimització i toleràncies, a mes de guardar bases de dades sobre catàlegs de materials i recobriments. També permet definir la dispersió o *scattering* i conté funcions molt útils per un disseny més fluït del sistema òptic.

Sistema normalitzat de coordenades

Degut a que hi ha diverses maneres de definir la apertura del sistema òptic i el seu camp, el programa treballa amb coordenades normalitzades. Tots els càlculs del programa utilitzen coordenades normalitzades, no els valors determinats que tu has introduït al programa.

Les coordenades normalitzades de camp es denoten com H_x i H_y i són utilitzades per el programa i diversos llibres de disseny òptic. El programa pot normalitzar les coordenades de dos modes diferents com són la normalització radial i la normalització rectangular.

En la normalització radial el programa calcula les coordenades normalitzades prenent com a referència un cercle unitari, d'altra banda, en la normalització rectangular calcula les coordenades normalitzades prenent coma referència un rectangle unitari.

Les coordenades normalitzades de apertura es denoten com P_x i P_y per definir qualsevol punt de la pupil·la del sistema. Es igual la definició que utilitzis per la apertura o el seu valor, per al programa el punt (0,0) en coordenades normalitzades es un raig que passa per el centre de la pupil·la o el punt (0,1) es un raig que passa per la part superior de la pupil·la.

Mode no seqüencial

El mode no seqüencial implica que no hi ha un ordre predefinit en les superfícies i els raigs poden passar per la mateixa superfície diverses vegades o simplement no passar per la superfície. La probabilitat de que un raig arribi a una superfície ve donat per la posició en el espai del objecte i les seves propietats i dimensions, a més de la direcció del propi raig. En mode no seqüencial es treballa en tres dimensions i cada objecte és independent del altre. Degut a que no té tantes limitacions com el mode seqüencial, també permet la simulació de sistemes no formadors de imatge. El mode no seqüencial representa una càrrega major per al ordinador degut a la quantitat de informació que treballa.

Com en el mode seqüencial, els menús *System*, *Analysis* i *Tools* esta disponibles, però amb un nombre menor funcions. Aquest mode incorpora funcions noves com al funció *Detectors*, que ens interessa molt a nosaltres.

Definició d'objectes

Per definir de manera senzilla els components del nostre sistema òptic no seqüencial utilitzarem el *Non-Sequential Component Editor*. De manera general podem distingir tres grups diferents d'objectes no seqüencials com són les fonts de llum, els objectes geomètrics que defineixen els components òptics del sistema i els detectors.

En general tots els objectes tenen uns paràmetres comuns i altres propis. Els paràmetres comuns són la posició i la inclinació en XYZ i el material.

Com al mode seqüencial, també es pot obrir la finestra *Properties*, que permet modificar les propietats del objecte, en el nostre cas serà important l'apartat de *scattering* i *bulk scattering*.

Per la posicionament del objectes es necessita una referència. El programa agafa coma referència el objecte que tingui la referencia 0, normalment el primer de la llista del editor. La posició del altres objectes es defineix prenent aquest com a referència.

Per a convertir un disseny seqüencial a un disseny no seqüencial s'utilitza la opció *Convert to NSC group*, que permet crear un objecte no seqüencial a partir de diverses superfícies seqüencials. Això ens permet fer simulacions amb fonts de llum i detectors amb qualsevol disseny seqüencial. Si no segueixes aquest procediment al canviar de mode seqüencial a no seqüencial es perdran totes del dades seqüencials.

Fonts de llum

Les fonts de llum són objectes que llancen raigs de llum al sistema òptic que hem definit prèviament. Com a objectes no seqüencials s'han de definir amb els paràmetres comuns esmentats anteriorment.

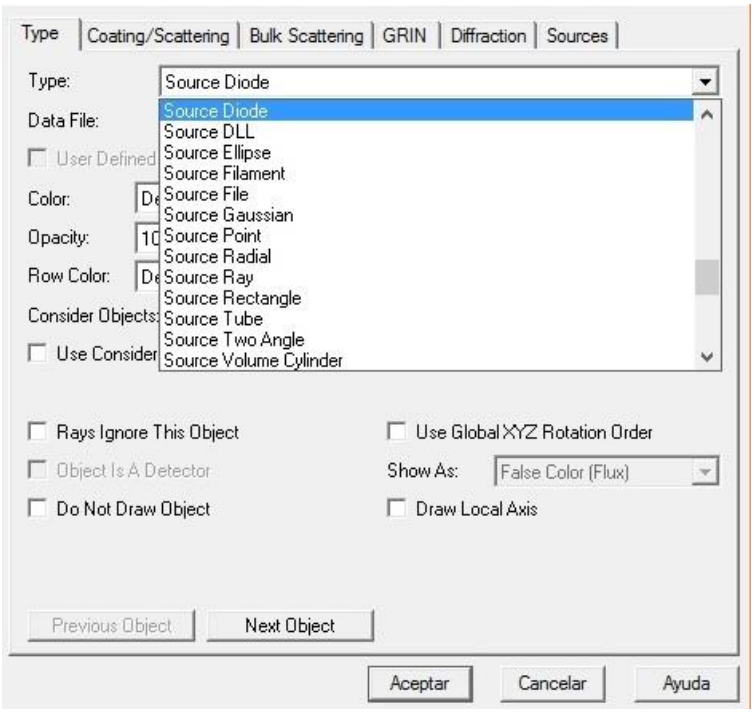


Figura 3.3.4 *Tipus de fonts de llum disponibles en el programa*

Font: *ZEMAX*

El programa pot simular amb diverses fonts de llum, les quals són una font díode, una font DDL, una font el·líptica, una font filament, una font puntual, una font radial, una font gaussiana, una font d'un sol raig, una font rectangular, una font cilíndrica i una font angular en XY.

Cada font de llum té uns paràmetres propis, però les fonts de llums també tenen uns paràmetres comuns entre elles que són el número de raigs gràfics i d'anàlisi, la seva potència o flux radiant i la longitud d'ona en que emet.

S'ha de dir que la font DDL és una font definida per l'usuari, s'ha de programar amb programes externs al ZEMAX i exportar l'arxiu al programa.

Detectors

Els detectors són objectes que detecten els raigs que arriben a la seva superfície i poden donar dades numèriques sobre aquests.

Quan un raig arriba a un detector, si el detector no té definit cap material el raig continuarà la trajectòria que portava encara que el detector ens doni dades numèriques sobre ell, d'altra banda, si el material es definit com ABSORB, el raig serà absorbit per el detector i també ens donarà dades numèriques. Cada tipus de detector té els seus propis paràmetres per definir. Els tipus de detectors que hi ha al programa són el detector rectangular, el detector superfície i el detector volum.

Per tal de realitzar una simulació del sistema òptic s'ha d' anar a *Ray Trace Control* dins la finestra *Detectors*, que permet controlar tots els factors que intervenen a la simulació. Una vegada s'han definit tots els raigs que es volen simular per dur a terme la simulació s'ha de prémer el botó *Trace*.

Per veure de manera gràfica i numèrica la infirmació del detector després de realitzar la simulació s'ha d'anar a *Detector Viewer* dins la finesta *Detectors*. Per tal de modificar la manera en que el programa et dona la informació s'ha d anar a *Settings*. Les magnituds en que el programa et dóna les dades són en irradiància incoherent i coherent, fase coherent, intensitat radiant, radiància i flux incident o absorbit.

També es poden donar les magnituds fotomètriques homòlogues, però s'ha de configurar prèviament abans de la simulació.

Scattering

La dispersió o *scattering* és por definir en qualsevol superfície del nostre sistema òptic, en el nostre cas serà el *target,* el programa conta amb diversos models de *scattering* però primer s'ha de parlar de diversos paràmetres comuns en tots els models. Aquests paràmetres són la fracció de dispersió i el nombre de raigs dispersos.

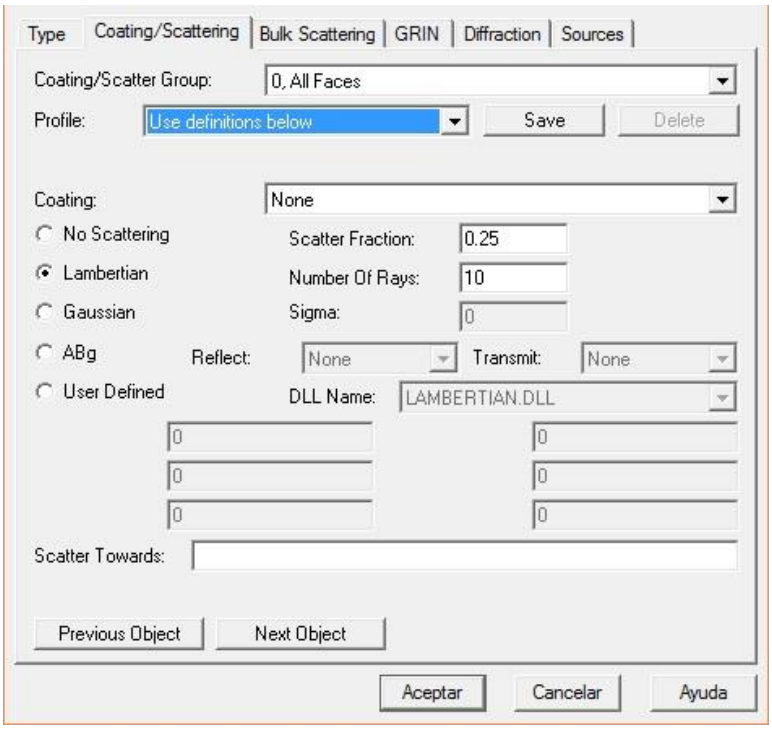


Figura 3.3.4 *Tipus de models de dispersió disponibles en el programa*

Font: *ZEMAX*

Amb aquests paràmetres és defineix la quantitat de energia que la superfície dispersarà i el nombre de raigs en que repartirà aquesta energia. S'ha de dir que en el model gaussià també s'ha de definir la sigma (σ) que és un paràmetre important en una distribució gaussiana. Els diversos models que el programa por simular són el model No *Scattering*, el model lambertià, el model gaussià, el model ABg i el model DDL.

S'ha de dir que el model DDL és un model definit per l'usuari, s'ha de programar amb programes externs al ZEMAX i exportar l'arxiu al programa.

Bulk Scattering

La dispersió volumètrica o *bulk scattering* és la dispersió de la llum quan passa a través d'un objecte volumètric. Nomes es pot definir amb objectes no seqüencials amb un determinat volum. El programa pot simular amb tres models diferents, que són el model No *Bulk Scattering*, el model angular i el model DDL.

El programa porta diversos models carregats en el model DDL. Dos d'aquests model són el model *Mie* i el model *Rayleigh* que permeten simular diferents condicions atmosfèriques.

RESULTATS

VALIDACIÓ DE RESULTATS

El aquest apartat justificarem les equacions que s'utilitzaran per realitzar els càlculs teòrics sobre la radiometria d'un sistema LADAR i la seva validesa comparat els nostres càlculs teòrics amb els resultats de les simulacions amb el ZEMAX. En aquest apartat discutirem tres sistemes senzills que poden considerar-se com a simplificacions dels subsistemes del nostre sistema LADAR.

Sistema 1

Aquest cas justifica com el ZEMAX calcula la irradiància que proporciona el detector en les simulacions.

Per tal de trobar la irradiància exacta de cada píxel del detector caldria saber la potència o flux radiat que arriba a cada píxel però això canvia per cada simulació i el programa no proporciona aquesta dada, només ens diu el flux total que ha arribat al detector. Dit això, podem aproximar el valor de la irradiància considerant que la potència arriba uniformement a l'àrea del detector impressionada, això ho podem expressar de forma matemàtica com:

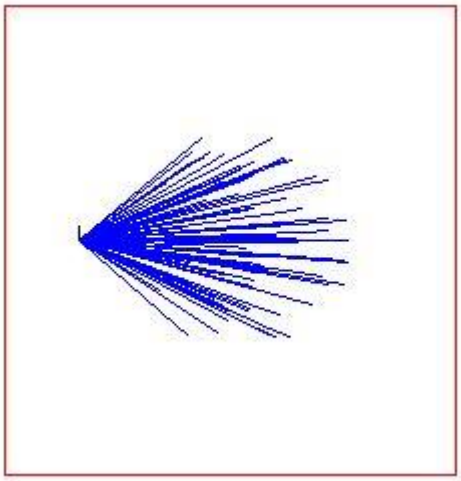


Figura 4.1.1 *Traçat gràfic de raigs en el sistema*

Font: *ZEMAX*

$$E_e = \frac{F_e}{S_R} = \frac{F_e}{N_P A_P}$$

Per la justificació del cas, he muntat un sistema que consta d'un font puntual de 100 W que emet en un determinat angle sòlid constant. Inicialment el detector s'ha situat a una distància de 100 mm de la font. Cal recordar que per la definició d'angle sòlid si doblem o reduïm a la meitat la distància, per tal de mantenir el angle sòlid constant, l'àrea serà multiplicada o dividida per 4 respectivament. El detector te unes mides de 80x80 mm i 40x40 píxels, a més sabem que a 100 mm els nombre total de píxels impressionats és de 276 píxels. Sabent això podem aproximar la irradiància en el detector.

Els càlculs efectuats per una distància de 100 mm són:

$$E_e = \frac{F_e}{N_P A_P} = \frac{100}{276 * 0{,}04} = 9{,}05\ W/cm^2$$

Si canviem la distància a 200 mm, el nombre de píxels i la irradiància vindran donades per:

$$N_{200} = 4\ N_{100} = 4 * 276 = 1104\ píxels$$

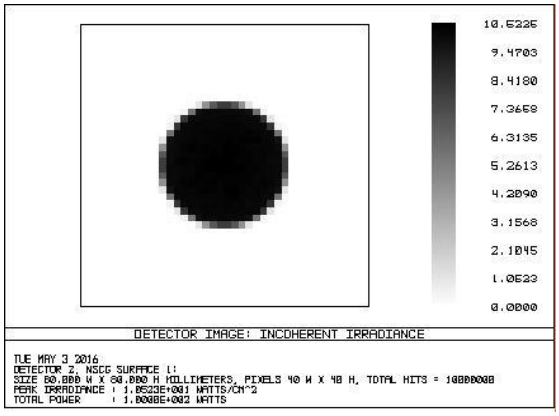
$$E_e = \frac{F_e}{N_P A_P} = \frac{100}{1104 * 0{,}04} = 2.26\ W/cm^2$$

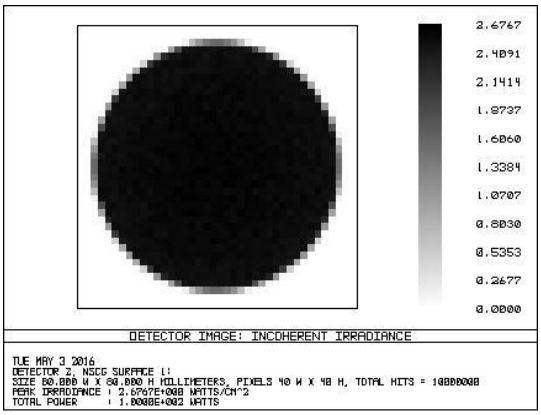
D'altra banda, si canviem la distancia a 50 mm, el nombre de píxels i la irradiància vindran donades per:

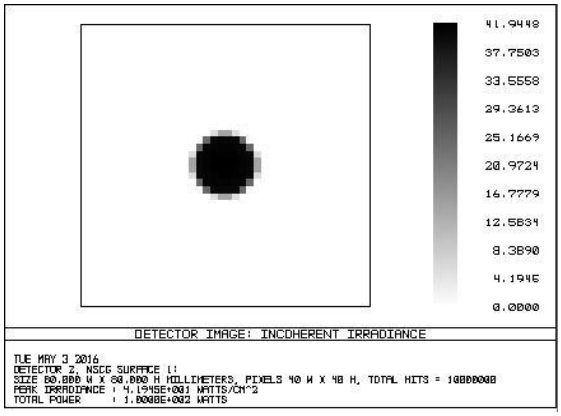
$$N_{50} = \frac{N_{100}}{4} = \frac{276}{4} = 69\ píxels$$

$$E_e = \frac{F_e}{N_P A_P} = \frac{100}{69 * 0{,}04} = 36{,}23\ W/cm^2$$

Com podem veure els resultats teòrics oscil·len entre els valors d'irradiància dels píxels del detector segons la escala de grisos numerada del detector. Les dades dels detectors són a la pàgina següent.







Figures 4.1.2 *Dades dels detectors a 100, 200 i 50 mm respectivament*

Font: *ZEMAX*

Sistema 2

Aquest cas justifica com el ZEMAX calcula el flux o potència radiant transmès a través d'un sistema òptic, tenint en compte les pèrdues per reflexió i absorció.

Per aquest cas he muntat un sistema que consta d'una font puntual de 100 W que emet en un determinat angle sòlid de manera que tot el flux emès passa per una lent biconvexa convergent de vidre BK7. El detector té unes mides de 60x60 mm i 200x200 píxels i inicialment ens situat aproximadament a la focal de la lent. Dit això, el flux transmès per la lent ve donat per:

$$F' = T\,F$$

On *T* es pot calcular mitjançant les expressions següents:

$$R = \left(\frac{n - n'}{n + n'}\right)^2$$

$$R + T + A = 1$$

Considerarem unes pèrdues de 1% per l'absorció de la lent i considerant les pèrdues per reflexió en les dues superfícies de la lent , els càlculs són:

$$R = \left(\frac{n - n'}{n + n'}\right)^2 = \left(\frac{1 - 1.5}{1 + 1.5}\right)^2 = 0{,}04$$

$$T = 1 - A - R = 1 - 0{,}08 - 0{,}01 = 0{,}91$$

$$F' = T\,F = 0{,}91 * 100 = 91\,W$$

Els càlculs teòrics corresponen perfectament amb les simulacions del ZEMAX. Les dades dels detectors són a la pàgina següent.

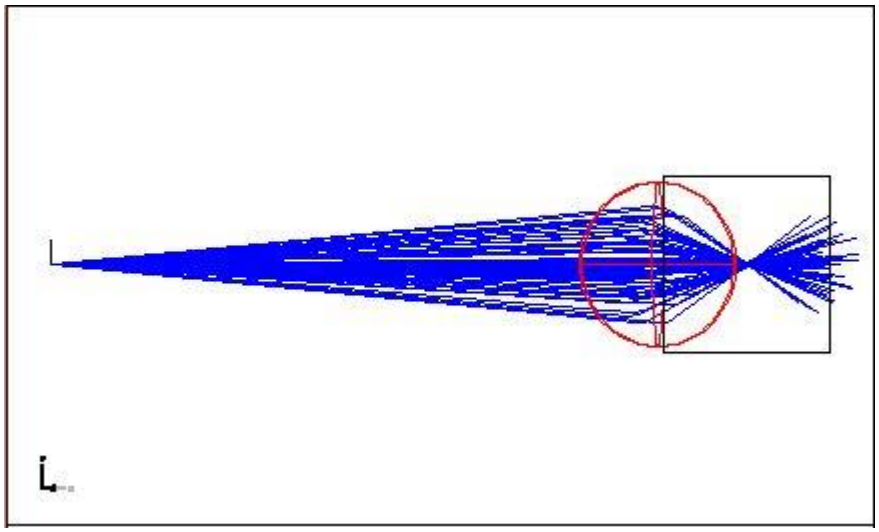
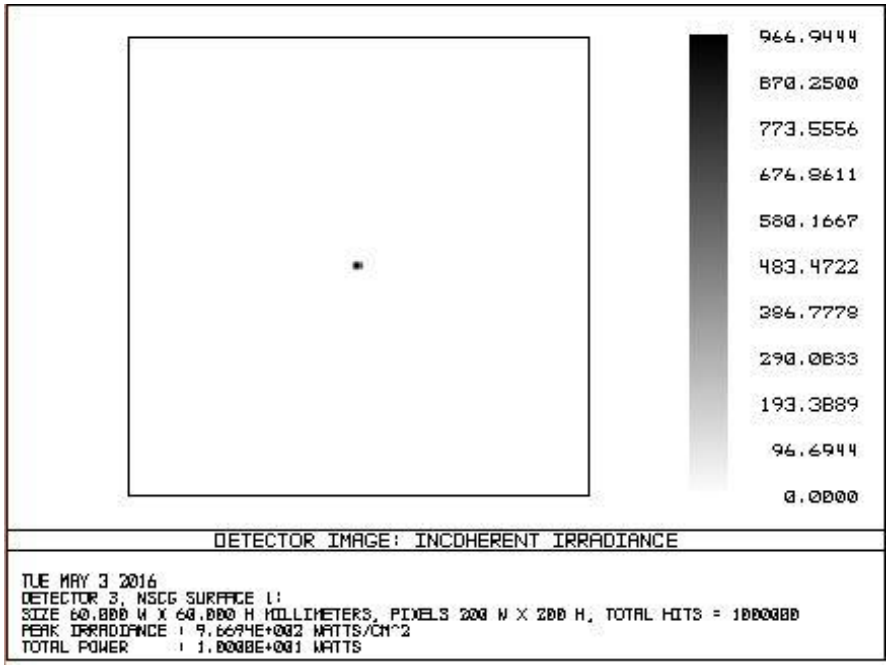


Figura 4.1.3 *Traçat gràfic de raigs en el sistema*

Font: *ZEMAX*



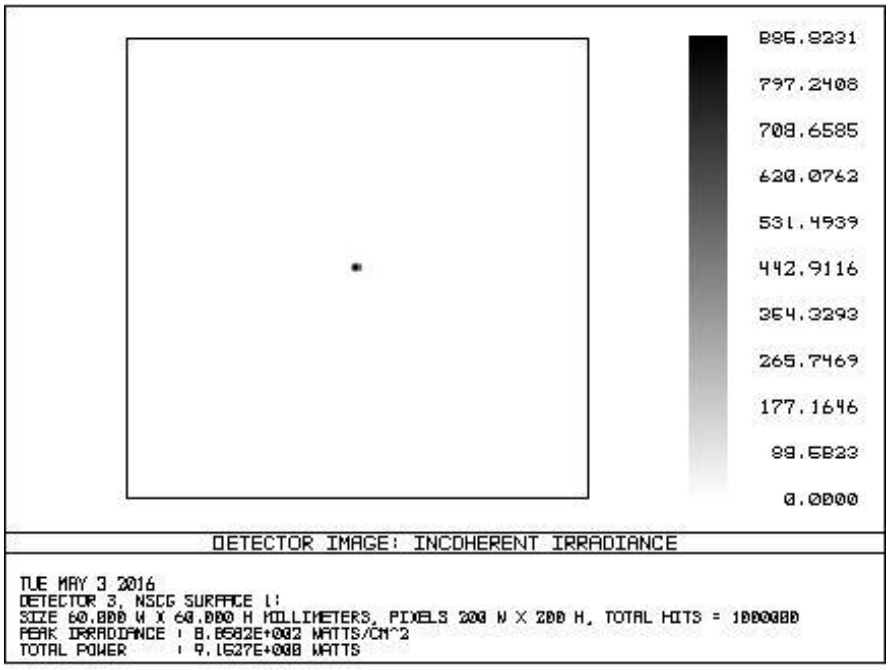


Figura 4.1.4 *Dades dels detectors sense i amb pèrdues respectivament*

Font: *ZEMAX*

Sistema 3

Aquest cas justifica com el ZEMAX calcula la pèrdua de flux o potència radiant en un sistema LADAR. Aquest pèrdua es deguda a que nomes una petita part dels raigs són captats per el nostre receptor, en aquest cas és directament el detector.

Per simplificar els càlculs enfocarem el problema des del punt de vista de potència i assumirem que és el feix làser qui limita la superfície incident en el *target*. Dit això, si el *target* és un difusor lambertià que emet en π, només captarem els raigs que estiguin dins del angle sòlid subtendit per la lent respecte al *target*. Això es pot definir matemàticament com:

$$P_R = \frac{\rho_t \, P_t \, \Omega_R}{\pi} = \frac{\rho_t \, P_t \, D_R^2}{\pi \, d^2}$$

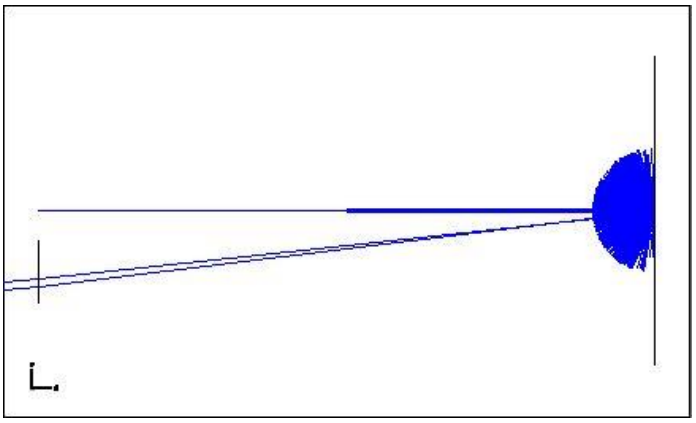


Figura 4.1.5 *Traçat gràfic de raigs en el sistema*

Font: *ZEMAX*

En aquest cas la nostra font és un díode de 1000 W i una divergència de 0,1° que simula el feix làser. El *target* està inicialment a una distància de 100 mm de la font i el detector i té un coeficient de reflexió difusa de 0,25. El detector té una mida de 40x40 mm i presenta 20x20 píxels. La potència a 100 mm es calcula com:

$$P_{100} = \frac{\rho_t \, P_t \, D_R^2}{\pi \, d^2} = \frac{1000 * 0.25 * 40^2}{\pi * 100^2} = 3{,}18 \, W$$

Si canviem les distàncies a 200 i 400 mm, la potència és veurà reduïda i es pot calcular aplicant la mateixa equació per les noves distàncies. La nova potència es calcula com:

$$P_{200} = \frac{\rho_t \, P_t \, D_R^2}{\pi \, d^2} = \frac{1000 * 0.25 * 40^2}{\pi * 200^2} = 0{,}79 \, W$$

$$P_{400} = \frac{\rho_t \, P_t \, D_R^2}{\pi \, d^2} = \frac{1000 * 0.25 * 40^2}{\pi * 400^2} = 0.19 \, W$$

Els resultats són coincidents amb els càlculs teòrics realitzats, podem afirmar que podem calcular la potència rebuda per el receptor mitjançant aquesta equació. Les dades dels detectors són a la pàgina següent.

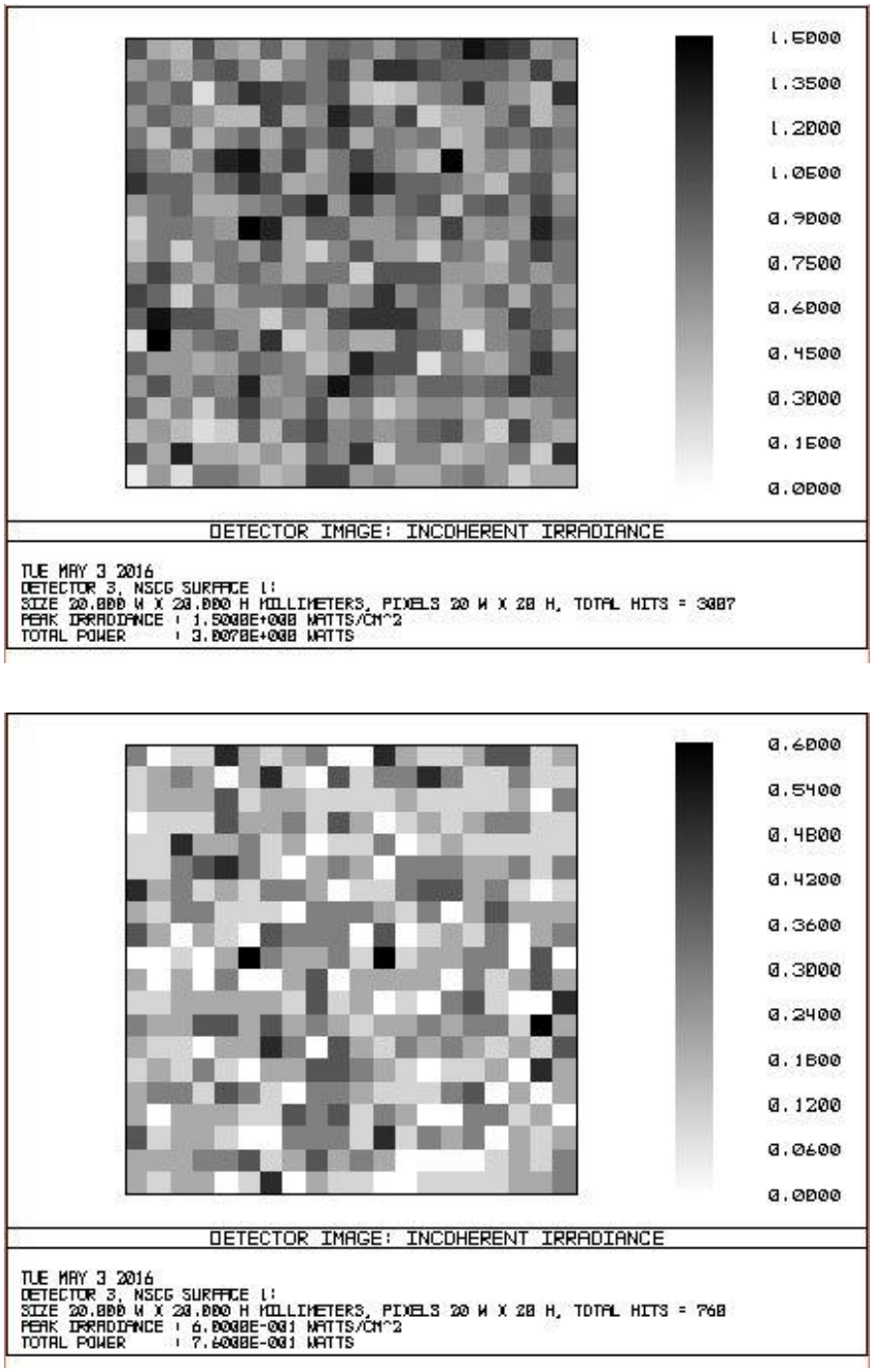


Figura 4.1.6 *Dades dels detectors a 100 i 200 mm respectivament*

Font: *ZEMAX*

DISSENY I CONFIGURACIÓ DEL SISTEMA LADAR

El aquest apartat explicarem detalladament quina és la configuració i disseny del sistema LADAR senzill per realitzar les simulacions.

El làser és simula amb un font díode amb una potència de 10000 W que emet en una longitud d'ona de 1550 nanòmetres i amb una divergència de 0,038°, que són paràmetres d'un làser real. La lent divergent difusora del feix està a 100 mm del làser i és de material BK7. El *target* està situat a 1000 mm de la lent difusora i la lent receptora i el caracteritzarem com un difusor lambertià amb un coeficient de reflexió difusa de 0,25. La lent convergent receptora té un diàmetre de 80 mm i és de material BK7. El detector està situat a 100 mm de la lent receptora i té unes mides de 50x50 mm i 40x40 píxels. Els altres paràmetres de les lents difusora i receptora no s'han esmentat perquè no intervenen en els càlculs.

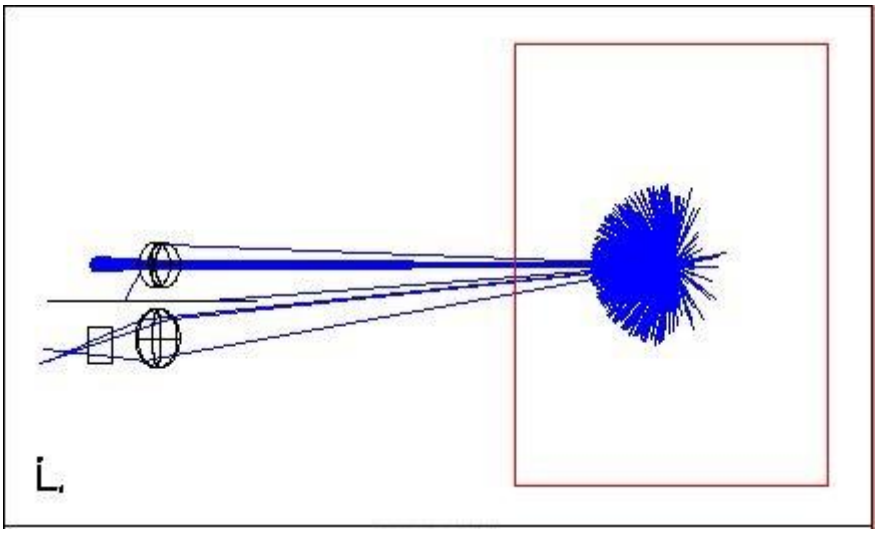


Figura 4.2.1 *Traçat gràfic de raigs en el sistema LADAR dissenyat*

Font: *ZEMAX*

SIMULACIONS DEL SISTEMA LADAR

En aquest apartat simularem amb el nostre sistema LADAR per veure com afecten els canvis en paràmetres del *target* i el medi de propagació del làser, com la distància o el coeficient de reflexió difusa del *target*. També s'intentarà simular la presencia de boira mitjançant el model Mie de dispersió atmosfèrica.

Influència de la distància del *target*

Per veure com afecta la distància del *target* en la radiometria del sistema LADAR farem simulacions per 1000, 2000, 4000 i 8000 mm de distància del *target* respecte la lent receptora i la lent difusora. Com en la validació assumirem que el feix làser limita l'àrea impressionada en el detector i ho valorarem des del punt de vista de potència per facilitar els càlculs. També es tindran en compte la transmitància de tos els elements òptics del sistema. Dit això, els càlculs teòrics són els següents:

$$P_{1000} = \frac{T\ \rho_t\ P_t\ \pi\ R_R^2}{\pi\ d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{1000^2} = 3{,}36\ W$$

$$P_{2000} = \frac{T\ \rho_t\ P_t\ \pi\ R_R^2}{\pi\ d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{2000^2} = 0{,}84\ W$$

$$P_{4000} = \frac{T\ \rho_t\ P_t\ \pi\ R_R^2}{\pi\ d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{4000^2} = 0{,}21\ W$$

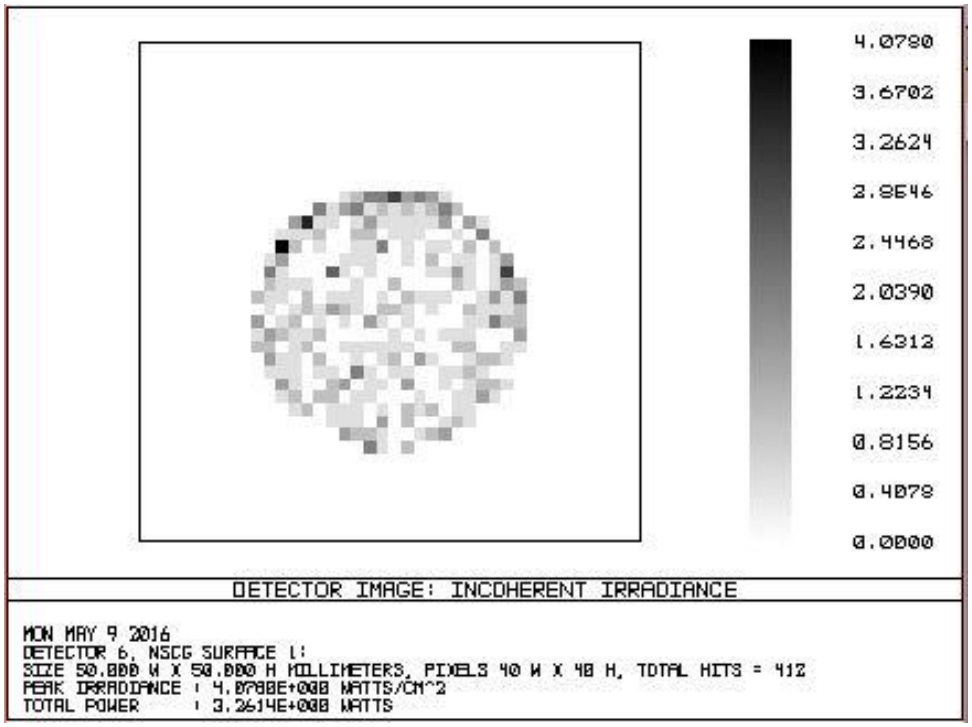
$$P_{8000} = \frac{T\ \rho_t\ P_t\ \pi\ R_R^2}{\pi\ d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{8000^2} = 0{,}0525\ W$$

Ara a continuació es presenten els resultats donats per el detector del programa tenint en compte tots els factors esmentats anteriorment.

d	Potència teòrica	Potència simulada
1000	3,36 W	3,2614 W
2000	0,84 W	0,8208 W
4000	0,21 W	0,2059 W
8000	0,0525 W	0,0555 W

Com podeu veure els resultats de els simulacions presenten poca diferència amb els resultats teòrics. També es important notar que el nombre de raigs que incideixen al detector també es redueixen proporcionalment amb la potència. Les dades dels detectors són a la pàgina següent.

Com podem veure la relació entre aquests dues variables no és lineal. Per justificar això només hem de mirar la fórmula utilitzada per realitzar els càlculs. La distància està al quadrat a la fórmula per tant la seva relació no és lineal.



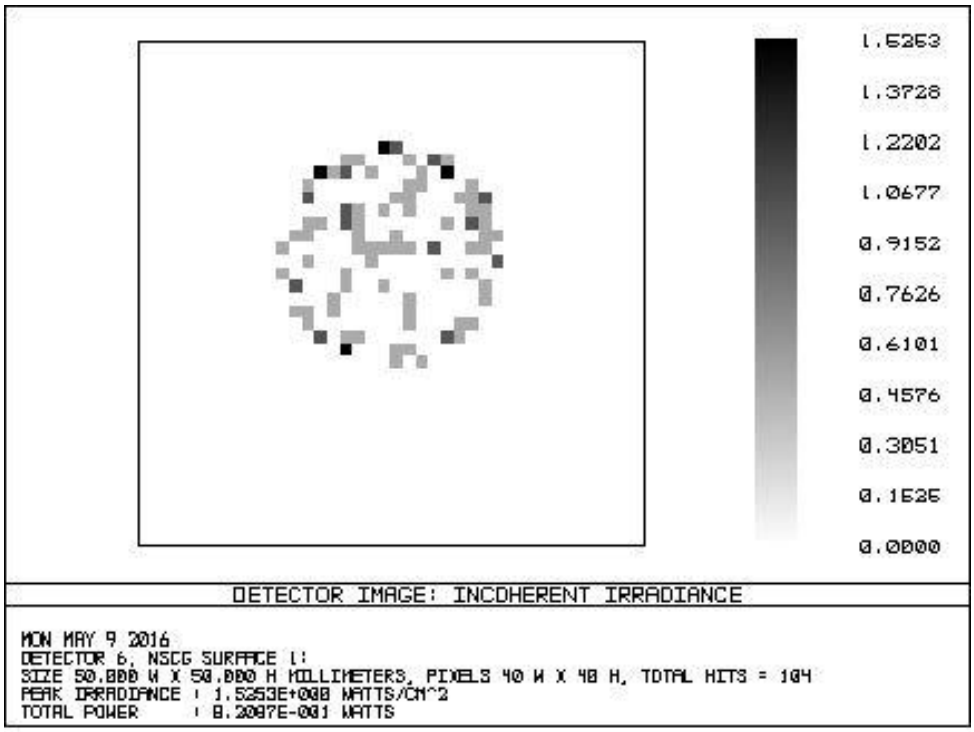
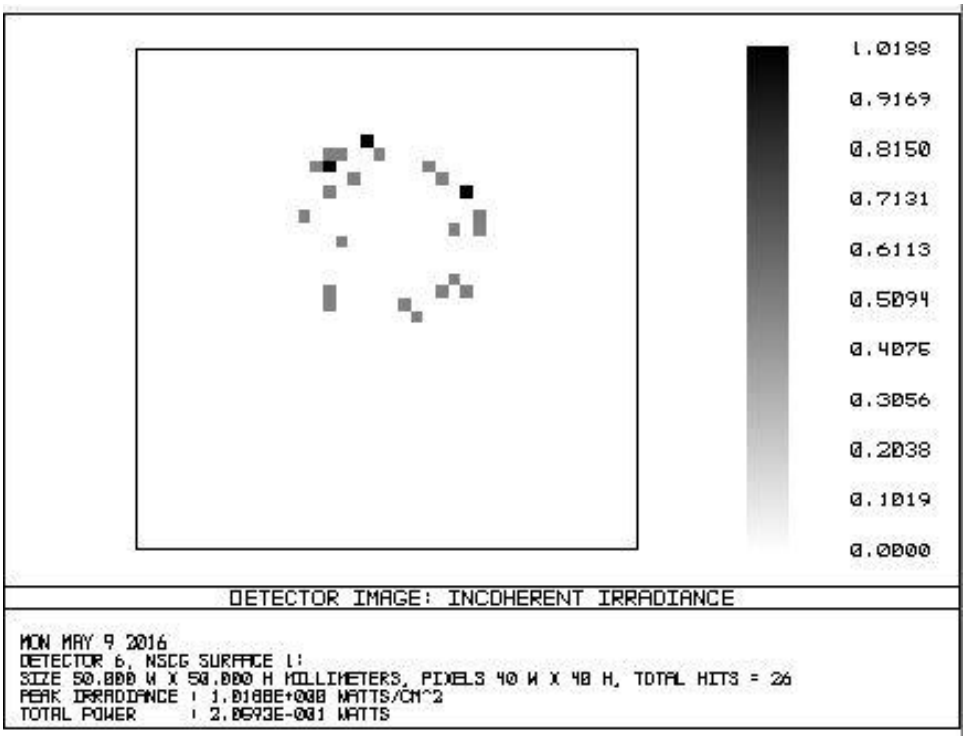


Figura 4.3.1 *Dades dels detectors a 1000 i 2000 mm respectivament*

Font: *ZEMAX*



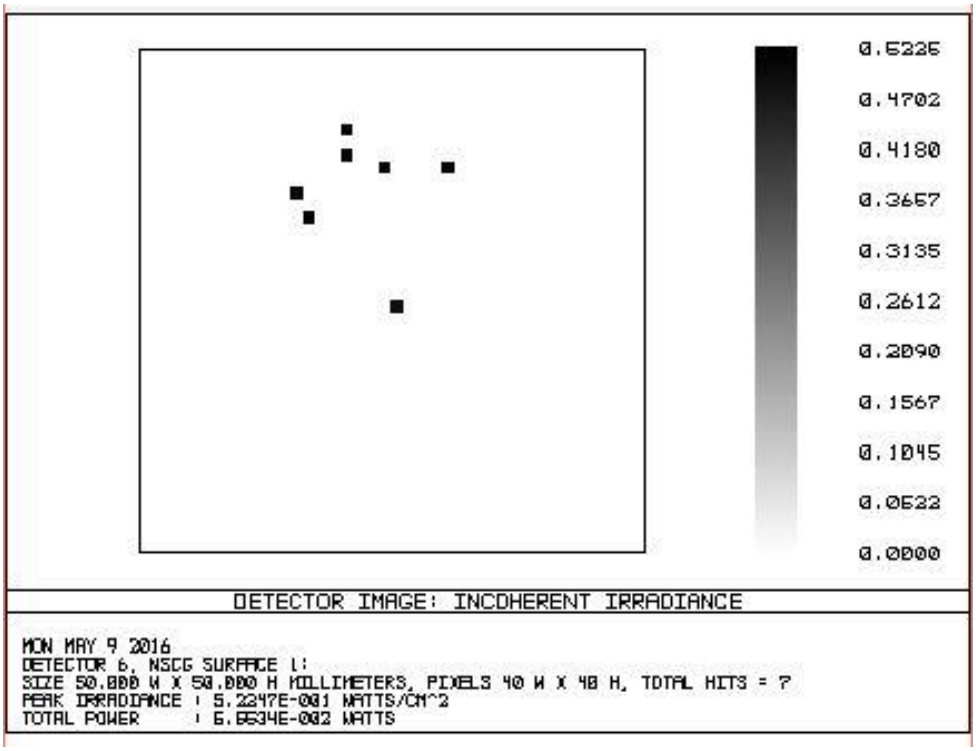


Figura 4.3.2 *Dades dels detectors a 4000 i 8000 mm respectivament*

Font: *ZEMAX*

Influència del coeficient de reflexió difusa del *target*

Ara estudiarem la influència del coeficient de reflexió difusa en la potència rebuda per el detector. Continuarem tenint en compte les mateixes consideracions que abans i realitzarem els càlculs i les simulacions per uns valors del coeficient de reflexió difusa de 0.1, 0.15, 0.2 i 0.25 respectivament. Dit això, els càlculs teòrics són:

$$P_{0,25} = \frac{T\,\rho_t\,P_t\,\pi\,R_R^2}{\pi\,d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{1000^2} = 3{,}36\,W$$

$$P_{0,1} = \frac{T\,\rho_t\,P_t\,\pi\,R_R^2}{\pi\,d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}1 * 10000 * 40^2}{1000^2} = 1{,}344\,W$$

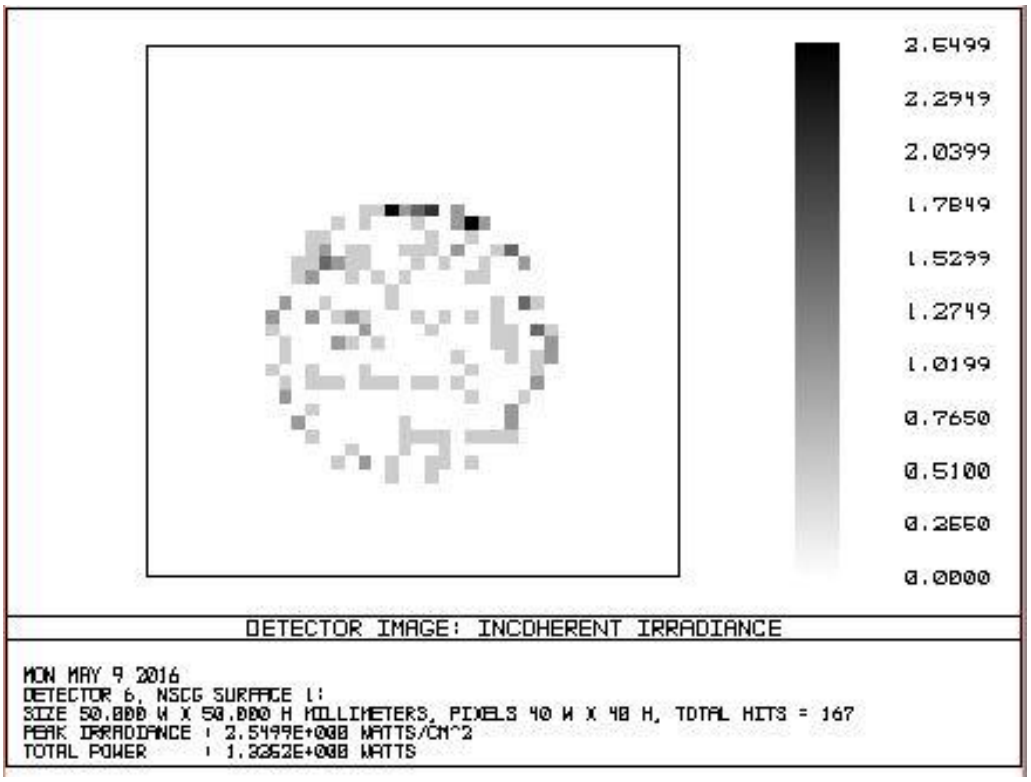
$$P_{0,15} = \frac{T\,\rho_t\,P_t\,\pi\,R_R^2}{\pi\,d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{1000^2} = 2{,}016\,W$$

$$P_{0,2} = \frac{T\,\rho_t\,P_t\,\pi\,R_R^2}{\pi\,d^2} = \frac{0{,}84 * 0{,}25 * 10000 * 40^2}{1000^2} = 2{,}688\,W$$

Ara a continuació es presenten els resultats donats per el detector del programa tenint en compte tots els factors esmentats anteriorment. Com podeu veure els resultats de els simulacions presenten poca diferència amb els resultats teòrics.

ρ	Potència teòrica	Potència simulada
0,25	3,36 W	3,2614 W
0,2	2,688 W	2,6686 W
0,15	2,016 W	1,9716 W
0,1	1,344 W	1,3352 W

Aquesta relació entre la potència rebuda i el coeficient de reflexió difusa és una relació lineal, en canvi, la relació entre la distància i la potència rebuda no és lineal.



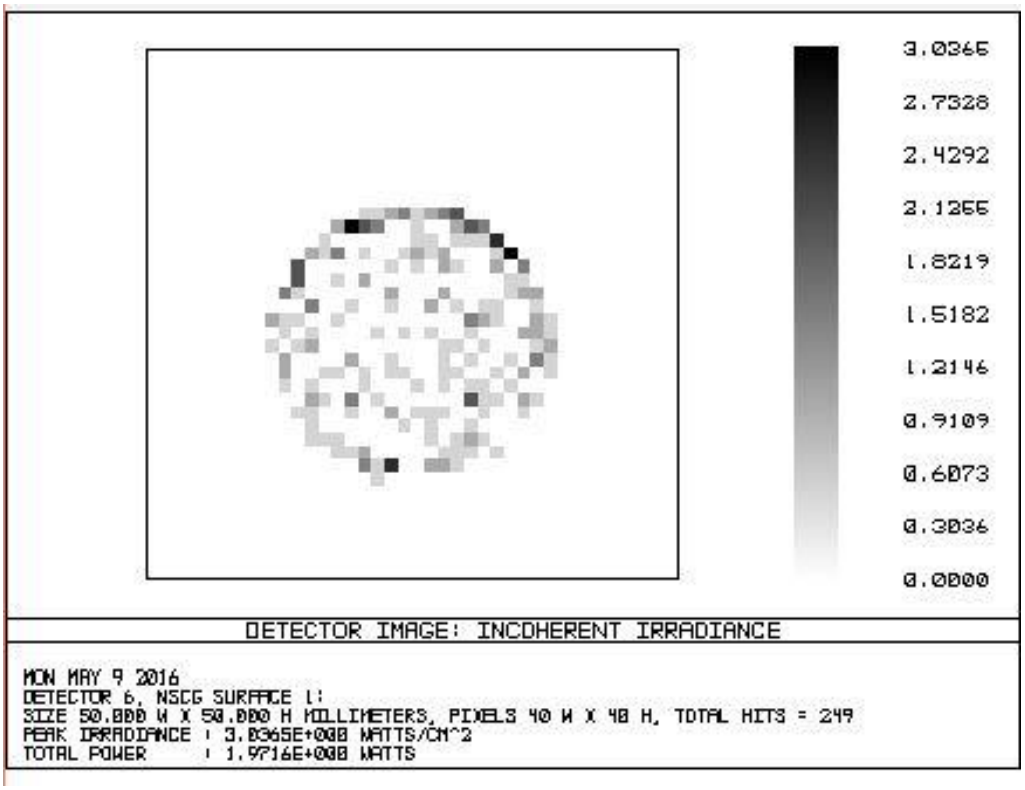
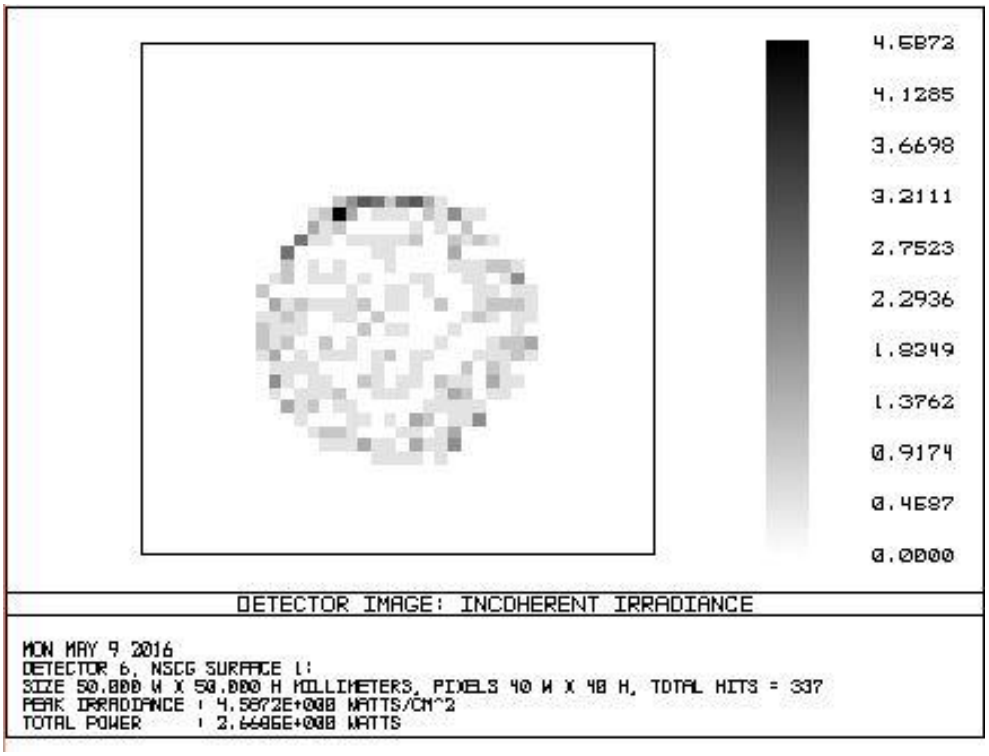


Figura 4.3.3 *Dades dels detectors per coeficients de reflexió difusa de 0,1 i 0,15*

Font: *ZEMAX*



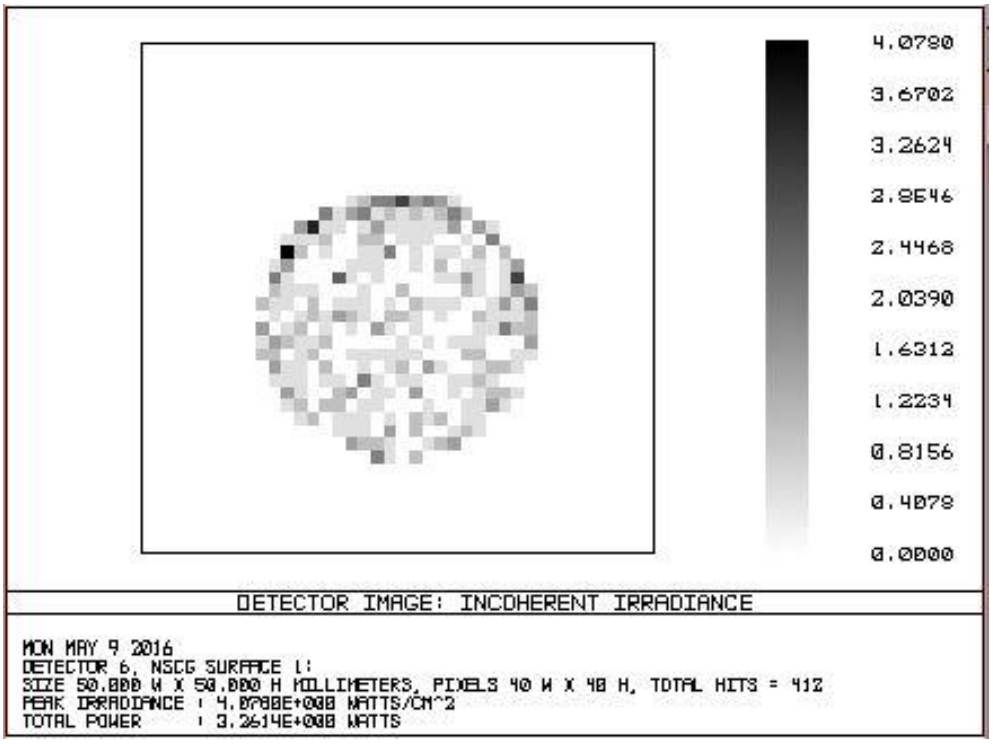


Figura 4.3.4 *Dades dels detectors per coeficients de reflexió difusa de 0,2 i 0,25*

Font: *ZEMAX*

Simulacions amb models atmosfèrics

Per tal de simular l'efecte sobre el sistema LADAR d'un fenomen com la boira, s'ha utilitzat el model de Mie que caracteritza la difusió en partícules esfèriques de una mida major que la longitud d'ona de la radiació que incideix en el medi difusor. Els paràmetres fixes de la simulació són la mida de la partícula que fixarem com a 10 micròmetres i l'índex de refracció de les partícules que prendrà un valor de 1,33. Nosaltres variarem la densitat de partícules del medi per diferents valors per observar els efectes que té en el sistema i la potència rebuda per el detector, de manera que simularem una boira més o menys densa.

Per simular en medi atmosfèric s'ha definit prèviament un volum rectangular i s'hi ha definit el model de Mie. S'ha de dir que com el objecte no te definit cap material i per tant és aire. El model conté aire amb partícules esfèriques d'aigua que simularà la boira.

Si definim la densitat de partícules per centímetre cúbic amb un valor de 1000000, que en aquests cas seria un boira molt densa, les dades obtingudes sobre el traçat de raigs i del detector de la simulació són aquestes:

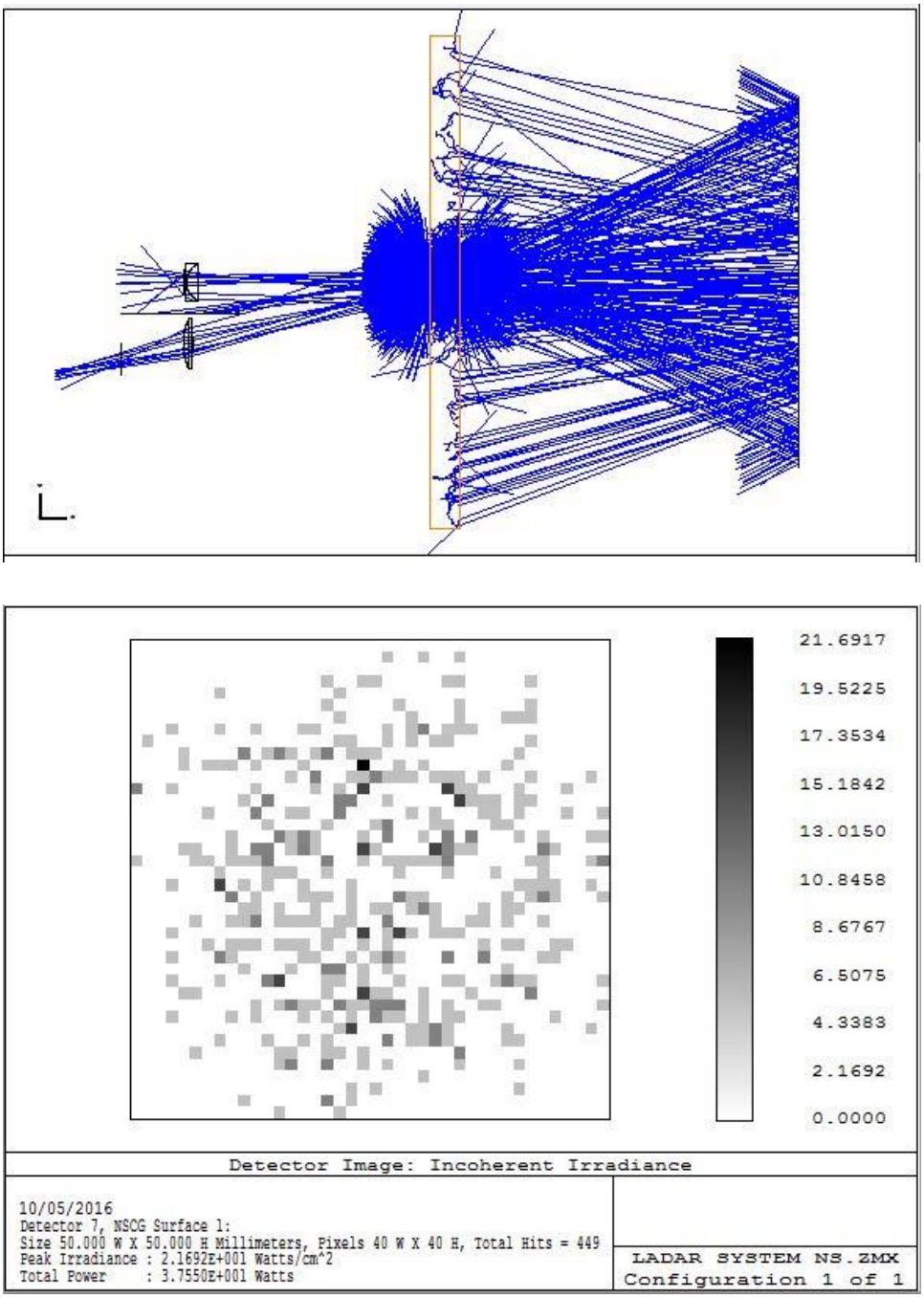


Figura 4.3.5 *Traçat gràfic de raigs i detector per una densitat de 1000000 de partícules per cm^3*

Font: *ZEMAX*

Si definim la densitat de partícules per centímetre cúbic amb un valor de 100000, que seria una boira amb menys densa que la anterior, les dades obtingudes sobre el traçat de raigs i del detector de la simulació són aquestes:

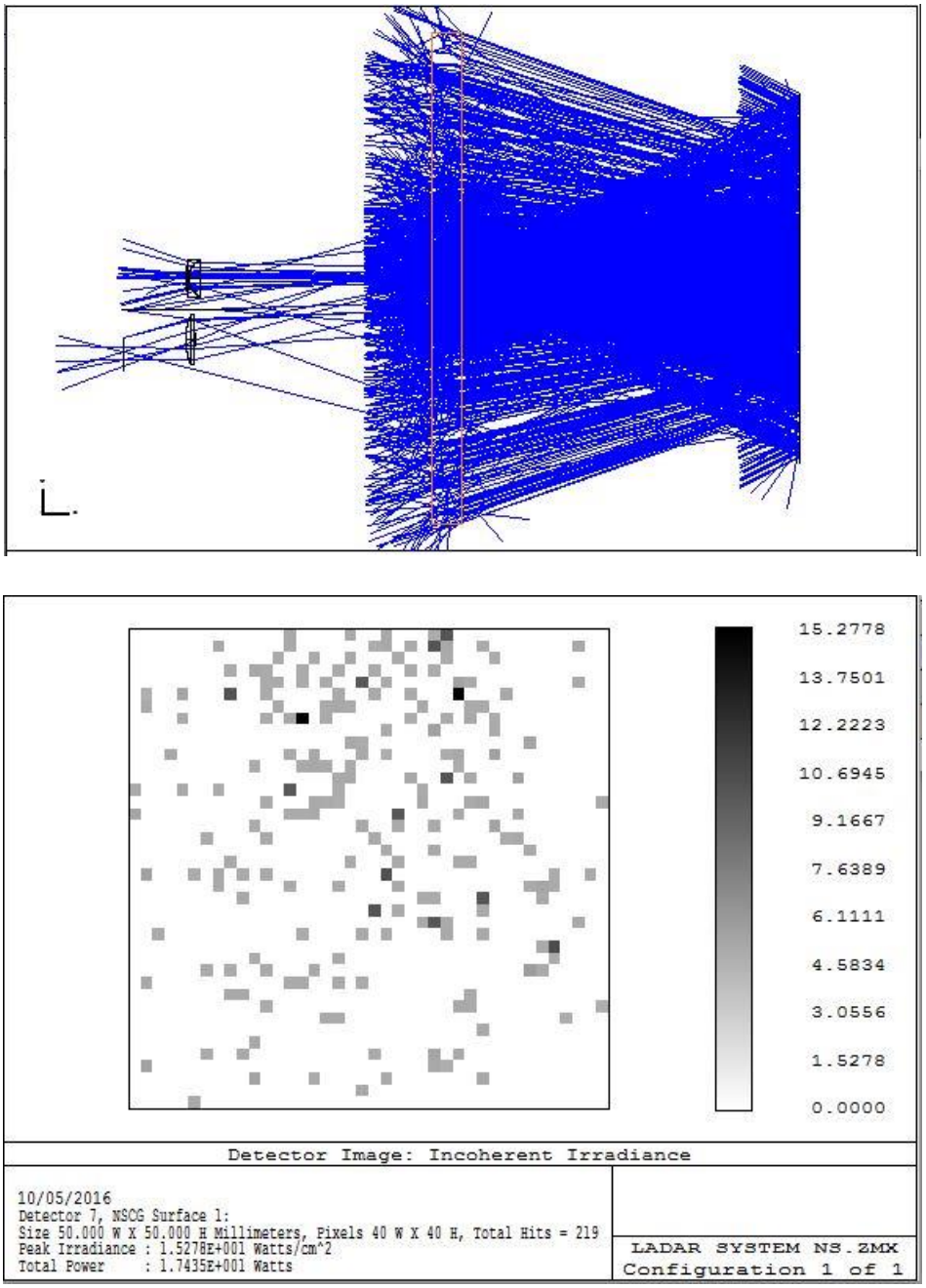


Figura 4.3.6 *Traçat gràfic de raigs i detector per una densitat de 100000 de partícules per cm^3*

Font: *ZEMAX*

Si definim la densitat de partícules per centímetre cúbic amb un valor de 1000, que seria una boira amb una densitat molt menor que les anteriors, les dades obtingudes sobre el traçat de raigs i del detector de la simulació són aquestes:

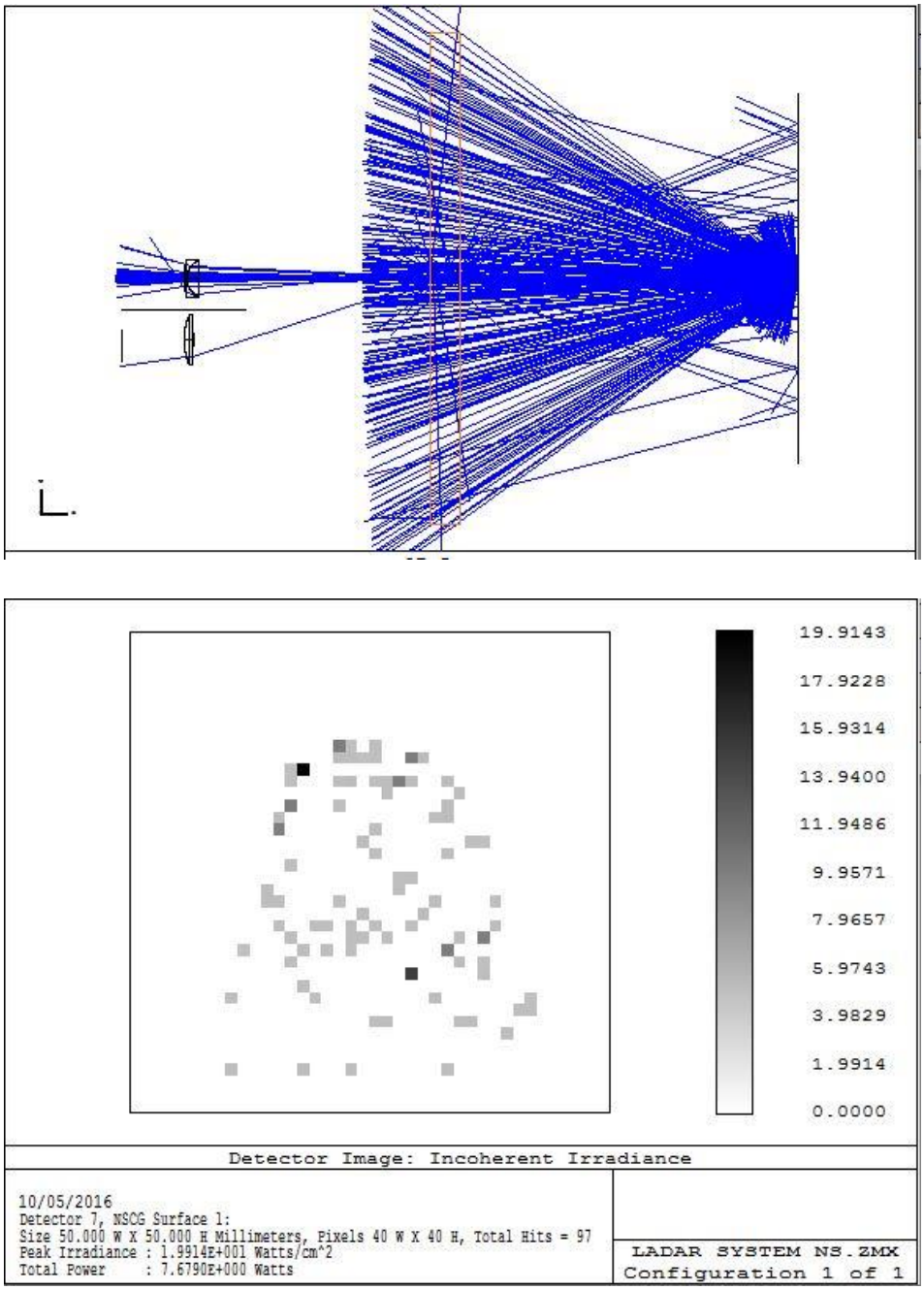


Figura 4.3.6 *Traçat gràfic de raigs i detector per una densitat de 1000 de partícules per cm³*

Font: *ZEMAX*

Com podem veure la densitat de partícules en la simulació afecta molt als resultats obtinguts. Podem observar en el traçat gràfic de raigs que quan la densitat és elevada molts raigs són dispersats abans d'arribar al *target* per la boira i simplement no arriben al *target*, per tant no són útils per duu a terme els càlculs relacionats amb la posició del *target*. D'altra banda, com són dispersats abans d'arribar al *target* arriben en major quantitat al detector i per tant produeixen una potència major al detector, tot i que és una potència sense informació del pols.

Si observem el traçat gràfic de la simulació amb densitat menor podem observar que s'assembla més a un traçat sense la influència de la boira i els raigs no són tant dispersats i la majoria arriben al *target*. També cal destacar que la potència és menor i més pròxima als resultats sense boira.

CONCLUSIONS

- S'han explicat detalladament els fonaments i el funcionament dels sistemes LADAR, així com les seves diferències amb els sistemes RADAR i la seva resolució.
- S'ha explicat detalladament la equació de rang dels sistemes LADAR, que permet la caracterització radiomètrica dels sistemes LADAR.
- S'ha definit detalladament les característiques del *target*, incloent la quantitat d'energia que reflecteix i la seva distribució angular.
- S'han definit el model estàndard de propagació d'un làser polsat en un sistema LADAR.
- S'han definit concretament els elements i subsistemes que formen un sistema LADAR.
- S'ha definit el fenomen de transformació de senyal radiant a senyal elèctrica que es duu a terme als detector mitjançant un fotodíode.
- S'ha explicat detalladament la diferencia entre radiometria i fotometria i la seva relació.
- S'ha explicat detalladament el concepte d'angle sòlid i la seva relació amb la fotometria i la radiometria.
- S'han explicat detalladament les magnituds radiomètriques i fotomètriques fonamentals.
- S'han definit detalladament que són els difusors perfectes o lambertians i la seva radiometria i fotometria.
- S'ha definit detalladament la radiometria i la fotometria d'un sistema òptic estàndard i els factors que intervenen en la transferència de energia en el sistema òptic.
- S'ha explicat quin és programa de disseny òptic utilitzat en el projecte, incloent els dos modes en que opera.

- S'ha explicat detalladament com funciona el mode seqüencial i les seves funcions rellevants per al disseny d'un sistema LADAR senzill.
- S'ha explicat detalladament el posicionament de superfícies i la definició de paràmetres en el mode seqüencial.
- S'ha explicat detalladament com definir la llum incident, incloent conceptes com el camp i la apertura del sistema òptic.
- S'han definit els sistemes de coordenades normalitzats del programa.
- S'ha explicat detalladament el mode no seqüencial i les seves funcions més rellevants per la simulació i disseny d'un sistema LADAR senzill.
- S'ha explicat detalladament el posicionament i la caracterització d'objectes no seqüencials en el mode no seqüencial.
- S'ha explicat les fonts de llum disponibles del programa i les seves característiques.
- S'han definit els detectors disponibles al programa i les seus paràmetres propis.
- S'ha explicat com duu a terme una simulació i com definir les seves variables.
- S'ha explicat com modelar *scattering* i *bulk scattering* en el programa mitjançant diferents models.
- S'han validat les equacions teòriques de transferència de flux radiant per un sistema òptic estàndard.
- S'han validat les equacions teòriques per caracteritzar la radiometria d'un sistema LADAR senzill.
- S'han validat les equacions per al càlcul de irradiància d'un detector.
- S'ha explicat detalladament el disseny propi d'un sistema LADAR senzill.
- S'han caracteritzat els canvis en la radiometria d'un sistema LADAR senzill si prenem coma variable la distància del *target*.
- S'han caracteritzat els canvis en la radiometria d'un sistema LADAR senzill si prenem coma variable el factor de reflexió difusa del *target*.
- S'ha caracteritzat la influencia de boira en un sistema LADAR senzill.

BIBLIOGRAFIA I REFERÈNCIES

- J. ANTÓ i N. TOMÁS, *Óptica Instrumental,* Edicions UPC (1996)
- J. ESCOFET, M.S. MILLÁN I E. PÉREZ, *Óptica geométrica,* Ariel Ciencia (2004)
- E. HECHT, *Óptica,* Addison-Wesley (1999)
- R. RICHMOND I S. CAIN *Direct-Detection LADAR Systems,* SPIE Press (2010)
- *Optical Design Program User's Manual,* ZEMAX (2011)

- How to simulate atmospheric scattering using Mie model https://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-simulate-atmospheric-scattering-using-a-mie [11-05-2016]

- Bulk scattering with the Rayleigh model http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/bulk-scattering-with-the-rayleigh-model [11-05-2016]

- Exploring non-sequential mode in ZEMAX https://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-non-sequential-mode-in-zemax [11-05-2016]

- Exploring sequential mode in ZEMAX http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-sequential-mode-in-zemax [11-05-2016]

- How to create a simple non-sequential system http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-create-a-simple-non-sequential-system [11-05-2016]

- What scattering models are available in ZEMAX
  http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/what-scattering-models-are-available-in-zemax [11-05-2016]

- How to model scattering efficiently
  http://www.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/how-to-model-scattering-efficiently [11-05-2016]