

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LÁSERES EN
FIBRA PARA SU APLICACIÓN EN LIDAR**

**(Study and analysis of fiber lasers for
application in LIDAR)**

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Raúl Cuerno Oruña

Octubre - 2013



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Raúl Cuerno Oruña

Director del PFC: María Ángeles Quintela Incera

Título: “Estudio y análisis de láseres en fibra para su aplicación en LiDAR”

Title: “Study and analysis of fiber lasers for application in LiDAR”

Presentado a examen el día: 30 de octubre de 2013

para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN, ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, Antonio

Secretario (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, María Ángeles

Vocal (Apellidos, Nombre): Fernández Ibáñez, Tomás

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi tutora la oportunidad que me ha dado de hacer este trabajo con ella, aun en condiciones ajustadas de tiempo, y ser tan cercana.

Gracias Marián.

Se hace difícil recordar la cantidad de personas que dejan huella por el camino académico, pero daré enormes gracias a muchos compañeros que me han ofrecido ayuda incondicional, sus apuntes y sobre todo su tiempo, muchos de ellos se han convertido en amigos y espero dentro de unos años seguir estando con ellos, estoy seguro que sabéis quienes sois y no hace falta que os nombre.

Gracias a mis amigos y compañeros de equipo, que me hacen desconectar del duro trabajo académico.

Agradecer a mi familia, tanto tíos, como abuelos y primos que se han preocupado por mí durante mis estudios.

Por último y más importante, agradecer infinitamente a mi padre, madre y hermana, por quererme como soy. A mi padre por ser como fue, por todos los valores que me ha enseñado, jamás los olvidaré. A mi hermana porque me quiere con locura. Y a mi madre, que es la mujer más maravillosa que conozco. Gracias por darme la oportunidad de educarme y ponerme por delante de ti en todos los ámbitos, me siento en deuda contigo. Esto va por vosotros.

A todos. Gracias.

“Estudio y análisis de láseres en fibra para su aplicación en LIDAR”

Palabras clave

Lidar, Láser de fibra, imagen 3D, Mode-locking, Q-switching.

Índice

Capítulo 1	1
Introducción, motivación y objetivos.....	1
Capítulo 2.....	3
2.1. ¿Qué es?.....	3
2.2. Fundamentos - Teoría.....	3
2.3. Términos básicos para entender el LiDAR.....	5
2.3.1. Términos más utilizados en la tecnología LiDAR.....	5
2.3.2. Principales componentes del LiDAR:.....	5
2.4. Clasificación	6
2.4.1. Por tipo de láser:.....	6
2.4.2. Por tipo de escaneado:.....	6
2.5. Ancho de pulso y frecuencia de repetición	8
2.6. Aplicaciones	8
2.6.1. Imagen 3D LiDAR	8
2.6.2. SLR (Satellite Laser Ranging).....	10
2.6.3. Batimetría.....	12
2.6.4. LiDAR viento.....	13
2.6.5. LiDAR de alta resolución espectral (HSRL) y LiDAR micro pulsos (MPL)	15
2.6.6. Topografía	16
2.6.7. Detección de velocidades	19

2.6.8.	Gestión forestal.....	20
2.6.9.	Otras aplicaciones.....	21
Capítulo 3.....		23
3.1.	Introducción.....	23
3.2.	Tipos de láseres	24
3.3.	Láser de fibra.....	25
3.4.	Ganancia y amplificación espontánea en fibras activas.....	25
3.5.	Ventajas y aplicaciones del láser de fibra	28
3.6.	Fibra de doble revestimiento.....	28
3.7.	Láser de fibra de Múltiples longitudes de onda.....	30
3.8.	El láser pulsado.....	31
3.8.1.	Cómo se generan los pulsos ultracortos.....	31
3.9.	Técnicas de pulsado	32
3.9.1.	Mode - locking.....	32
3.9.2.	Q - Switching.....	32
3.9.3.	SESAM.....	33
Capítulo 4.....		34
4.1.	<i>Sistema LiDAR de imágenes 3D de alta resolución formado por un láser de fibra, pulsado, de nanosegundos, monomodo y con alta potencia de pico.....</i>	34
4.1.1.	Introducción	34
4.1.2.	Configuración experimental	35
4.1.3.	Resultados experimentales	39
4.2.	<i>Perfiles atmosféricos de vapor de agua usando un sistema LiDAR de láser de fibra.</i>	41

4.2.1. Introducción	41
4.2.2. Configuración experimental	43
4.2.3. Resultados experimentales	45
4.2.4. Sistema receptor lidar	48
4.2.5. Conclusión	50
Capítulo 5.....	52
1.1. Conclusiones	52
1.2. Líneas futuras	53
Bibliografía.....	54

Índice de figuras

Figura 1: Ejemplo del sistema LiDAR.....	4
Figura 2: Tipos de escaneados LiDAR.	7
Figura 3: Imagen LiDAR en 3D	9
Figura 4: Funcionamiento Satellite Laser Ranging.....	11
Figura 5: Sonar y lidar se complementan entre sí al tomar cartas náuticas; sonar puede trazar un mapa de las aguas profundas en alta mar, mientras que la combinación de topografía (infrarrojo) y batimetría (azul-verde) lo hace en las aguas poco profundas como costas y playas.	13
Figura 6: Funcionamiento de un sistema LiDAR viento.	14
Figura 7: Mosaico de primera superficie y topografía sumergida	17
Figura 8 - Haz láser.....	19
Figura 9: Láser detección de velocidades	20
Figura 10: Gestión forestal en detalle.	21
Figura 11: Perfil vertical proporcionado por LiDAR nubes de aerosol y observaciones del satélite Pathfinder infrarrojo (CALIPSO).	22
Figura 12: Diagrama esquemático de un láser tipo, mostrando las tres partes importantes.	23
Figura 13: Funcionamiento de un láser en fibra.	25
Figura 14: Esquema de emisión estimulada y emisión espontánea.....	26
Figura 15: Dibujo de las señales ASE.	27
Figura 16: Fibra de doble revestimiento.....	29
Figura 17: (a) Configuración experimental para la topología paralela con acopladores. (b) Configuración experimental para la nueva topología con circuladores.....	31
Figura 18: Configuración experimental de un sistema láser de fibra MOPA.....	35
Figura 19: Salida potencia de pico versus potencia de bombeo con una frecuencia de 50 kHz y un ancho del pulso de 1.2 ns.	36

Figura 20: Salida de la forma temporal del pulso a 50 kHz de frecuencia de la (a) fuente láser y (b) amplificador de potencia.....	37
Figura 21: Respuesta espectral de (a) fuente láser, (b) preamplificador, y (c) amplificador de potencia.....	38
Figura 22: Configuración experimental del sistema Lidar de imagen 3D.	38
Figura 23: Laboratorio de exploración de resultados de las imágenes cromáticas del objeto espacial a 5m.....	39
Figura 24: Laboratorio de exploración de resultados de imágenes 3D del objeto espacial a 5m.	40
Figura 25: Diagrama de energía de Tulio.	43
Figura 26: Foto y esquema del transmisor láser de fibra de Tm:Germanio.....	44
Figura 27: Longitudes de onda "on-line" y "off-line".....	45
Figura 28: Salida del láser pulsado versus corriente del diodo.....	45
Figura 29: Energía óptica del diodo y energía de salida del láser versus frecuencia del pulso.	46
Figura 30: Energía de la salida láser Q-conmutada y longitud del pulso versus corriente del diodo en amperios.	47
Figura 31: Demostración de dos pulsos Q-conmutados procedentes de un sólo pulso del diodo.....	47
Figura 32: Energía de la salida láser en modo normal versus energía de entrada del diodo demostrando una eficiencia de la rampa de 0.28 y una eficiencia cuántica de 1.75.	48
Figura 33: Diagrama esquemático y foto del sistema receptor LiDAR.....	49
Figura 34: Gráfico del retorno LiDAR atmosférico y el correspondiente pulso láser entrando en la atmósfera.....	50

Capítulo 1

Introducción, motivación y objetivos

El láser es el principal componente activo para transmisiones ópticas, hoy en día esenciales para las comunicaciones. Este proyecto surge como motivación por estudiar y analizar el láser de fibra, y en concreto, pulsado, dopado con tierras raras como erbio, tulio o iterbio como componente activo amplificador. Con este estudio se mostrarán los principales componentes que forman el circuito emisor, las características óptimas para poder emplear estos láseres en diferentes ámbitos para aplicaciones LiDAR, que es una tecnología que funciona midiendo distancias y recopilando datos mediante el análisis de un emisor láser que envía pulsos y son recogidos a través de un receptor.

Este proyecto tiene como objetivo principal:

- Estudiar las principales características de las diferentes aplicaciones LiDAR (longitudes de onda, tasas de repetición, espectro, ancho de banda, etc).
- Estudiar y analizar los láseres de fibra y en mayor medida los pulsados.
- Mostrar los montajes necesarios del circuito emisor láser de fibra de cara a introducirlo en aplicaciones reales LiDAR.

El capítulo 1, como se ha visto anteriormente, es una breve introducción al proyecto, los diferentes pasos a seguir en este estudio de láseres de fibra y tecnología LiDAR; y fija los objetivos principales del proyecto.

El capítulo 2, ofrece una explicación acerca de la teoría y el concepto LiDAR, relevante en muchos ámbitos del mundo real: conceptos, términos básicos, componentes, aplicaciones, etc.

En el capítulo 3, se analiza y estudia el funcionamiento de láseres de fibra en modo continuo, y se explican las técnicas de modulación para la obtención de láseres pulsados.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En el capítulo 4, se estudian montajes de los láseres de fibra y en qué aplicaciones se pueden utilizar acorde con las características y prestaciones técnicas de LiDAR.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones y líneas futuras acerca de los láseres de fibra dopados con tierras raras para su aplicación en LiDAR, posibles mejoras en cuanto a diseño, y si es posible su implementación en el futuro.

Capítulo 2

LiDAR

2.1. ¿Qué es?

LiDAR (un acrónimo del inglés *Light Detection and Ranging*), también se usa el término LADAR para uso militar (*Laser Detection and Ranging*), se trata de un potente sistema de recolección de datos que provee información de un determinado ámbito de estudio. Es un sensor óptico activo que transmite rayos láser hacia un objetivo mientras se mueve a través de rutas. El reflejo del láser lo detectan y analizan los receptores en el sensor LiDAR. El láser puede trabajar en una longitud de onda entre 532 y 1550 nanómetros. La precisión en la altura suele estar entre 5 cm y 10 cm. Al igual que ocurre con la tecnología radar, donde se utilizan ondas de radio, la distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. Esta tecnología tiene múltiples ventajas frente al radar, que se mencionarán en el apartado 2.6.7 (Detección de velocidades) pero principalmente son:

- Mayor rapidez
- Las cortas longitudes de onda de luz frente a las largas longitudes de onda de radio
- El haz de luz no diverge tanto como la onda de radio y es mucho más estrecho que la onda radar, que se dispersa y rebota en el entorno.

2.2. Fundamentos - Teoría

El LiDAR es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS). Para realizar este escaneado se combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner.

Para conocer las coordenadas de la nube de puntos se necesita la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento. Para ello el sistema se apoya en un

sistema GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS). Conocidos estos datos y la distancia sensor-terreno obtenida con el distanciómetro (medidor láser, en inglés EDM) obtenemos las coordenadas buscadas. Entre las aplicaciones LiDAR se pueden encontrar:

- Visualización 3D con tecnología LiDAR terrestre y batimétrica.
- Visualización 3D de Aeropuertos con tecnología LiDAR Aéreo.
- Visualización 3D de imagen RGB e infrarroja sobre datos LiDAR.
- Visualización 3D de Carreteras con LiDAR Aéreo.
- LiDAR Aéreo aplicado a la gestión de líneas eléctricas.
- LiDAR Aéreo aplicado a captura de edificaciones en 3D.

El uso de LiDAR requiere conocer los requerimientos del proyecto en los que se desea usar. Una de las primeras decisiones a tomar es el tipo de técnica para la captura de los datos (aérea, terrestre, etc.). Pero también se deben de tener en cuenta las estaciones del año, en función de la aplicación, entre otros factores.

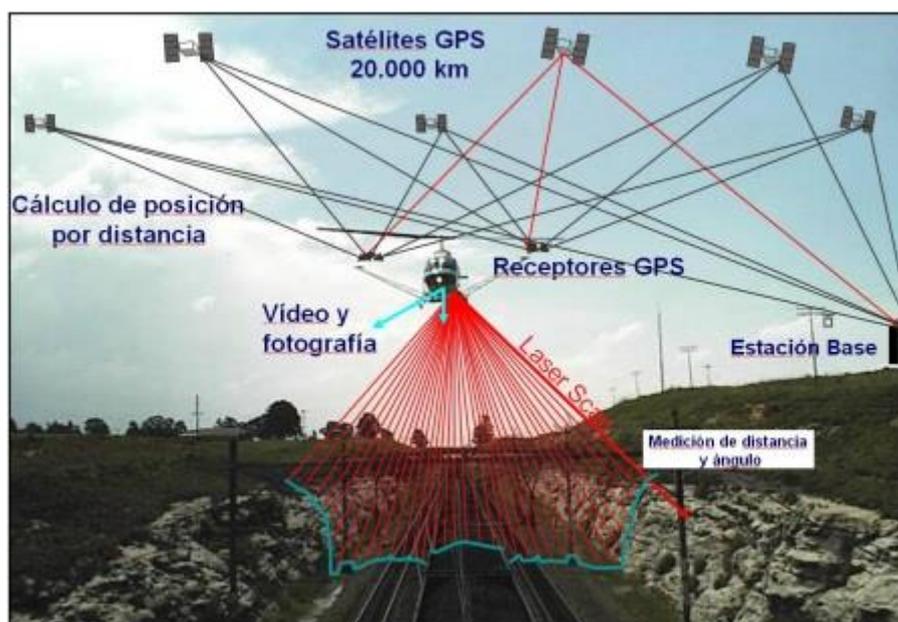


Figura 1: Ejemplo del sistema LiDAR

2.3. Términos básicos para entender el LiDAR

2.3.1. Términos más utilizados en la tecnología LiDAR

- *Pulso de repetición*: es el ritmo al que el láser emite pulsos, y se mide en Kilohercios (KHz). Por ejemplo, un pulso de 200 KHz de un determinado sensor significa que el LiDAR emite pulsos 200.000 veces por segundo (el receptor recibe posteriormente esa información).
- *Frecuencia de escaneo*: Mientras que el láser emite los pulsos de repetición, el escáner oscila (se mueve hacia delante y hacia atrás). El sistema móvil tienen un escáner que gira 360° continuamente, mientras que los sistemas aéreos se mueven adelante y atrás.
- *Ángulo de escaneo*: es el ángulo al que el escáner se mueve desde un extremo hasta el otro. Este ángulo se puede ajustar en función de la aplicación que se le quiera dar.
- *Altitud de vuelo*: Hay que considerar que a mayor altura, bajo las mismas condiciones, menor precisión en los datos y menor densidad de puntos.
- *Espaciamiento de la línea de vuelo*: También se determina en función de la aplicación, y de las características del terreno sobrevolado.
- *Espaciamiento nominal entre puntos*: Es la distancia entre los puntos de impacto del LiDAR; a mayor número de puntos, mayor definición de las superficies.
- *Banda*: es la distancia del área de cubrimiento del sistema LiDAR, y depende del ángulo y de la altura de vuelo. En el caso de sensores móviles en tierra, no se habla de banda sino de área de cubrimiento.
- *Solape*: la suma de áreas redundantes que es cubierta entre líneas de vuelo o bandas, dentro del ámbito de estudio. En esas zonas hay más cantidad de puntos.

2.3.2. Principales componentes del LiDAR:

- *ALS Escáner Láser Aerotransportado*: Emite pulsos de luz infrarroja que servirán para determinar la distancia entre el sensor y el terreno.
- *GPS Diferencial*: Mediante el uso de un receptor en el avión y uno o varios en estaciones de control terrestres (en puntos de coordenadas conocidas), se obtiene la posición y altura del avión.
- *INS Sistema Inercial de Navegación*: Nos informa de los giros y de la trayectoria del avión.

- *Cámara de video digital* (opcional): Permite obtener una imagen de la zona de estudio, que servirá para la mejor interpretación de los resultados. Esta puede montarse en algunos sistemas junto al ALS.
- *Medio aéreo*: Puede ser un avión o un helicóptero. Cuando se quiere primar la productividad y el área es grande se utiliza el avión, y cuando se quiere mayor densidad de puntos se usa el helicóptero, debido a que este puede volar más lento y bajo.

Las medidas obtenidas por los tres componentes principales, ALS, GPS e INS, se toman con una misma etiqueta de tiempos acorde con el GPS. De esta forma después se pueden relacionar fácilmente en el cálculo posterior.

El sistema LiDAR obtiene también la siguiente información. Por cada pulso emitido puede captar 2 o más ecos. Esto nos permite recoger información a diferentes alturas. Por ejemplo, si estamos sobrevolando una zona arbolada, el primer eco puede responder a la copa de los árboles y el último a la superficie terrestre. La intensidad reflejada, puede ser muy útil para la clasificación posterior. [1]

2.4. Clasificación

2.4.1. Por tipo de láser:

- *LiDAR de pulsos*: El proceso para la medición de la distancia entre el sensor y el terreno se lleva cabo mediante la medición del tiempo que tarda un pulso desde que es emitido hasta que es recibido. El emisor funciona emitiendo pulsos de luz.
- *LiDAR de medición de fase*: El emisor emite un haz de láser continuo (en inglés: continuous wave, CW). Cuando recibe la señal reflejada mide la diferencia de fase entre la señal emitida y reflejada.

2.4.2. Por tipo de escaneado:

- *Líneas*: Dispone de un espejo rotatorio en un solo sentido que va desviando el haz láser. Produce líneas paralelas en el terreno como patrón de escaneado. El inconveniente principal de este sistema es que al girar el espejo en una sola dirección no siempre tenemos mediciones.
- *Zigzag*: En este caso el espejo es rotatorio en dos sentidos (ida y vuelta). Produce líneas en zigzag como patrón de escaneado. Tiene la ventaja de que siempre está midiendo pero al tener que cambiar de sentido de giro la

aceleración del espejo varía según su posición. Esto hace que en las zonas cercanas al límite de escaneo lateral (donde varía el sentido de rotación del espejo), la densidad de puntos escaneados sea mayor que en el nadir (intersección entre la vertical del observador y la esfera celeste).

- *De fibra óptica*: Desde la fibra central de un cable de fibra óptica y con la ayuda de unos pequeños espejos, el haz láser es desviado a las fibras laterales montadas alrededor del eje. Este sistema produce una huella en forma de una especie de circunferencias solapadas. Como los espejos son pequeños, la velocidad de toma de datos aumenta respecto a los otros sistemas pero el ángulo de escaneo (FOV) es menor.
- *Elíptico (Palmer)*: En este caso el haz láser es desviado por dos espejos que producen un patrón de escaneo elíptico. Como ventajas del método podemos comentar que el terreno es a veces escaneado desde diferentes perspectivas aunque el tener dos espejos incrementa la dificultad al tener dos medidores angulares.

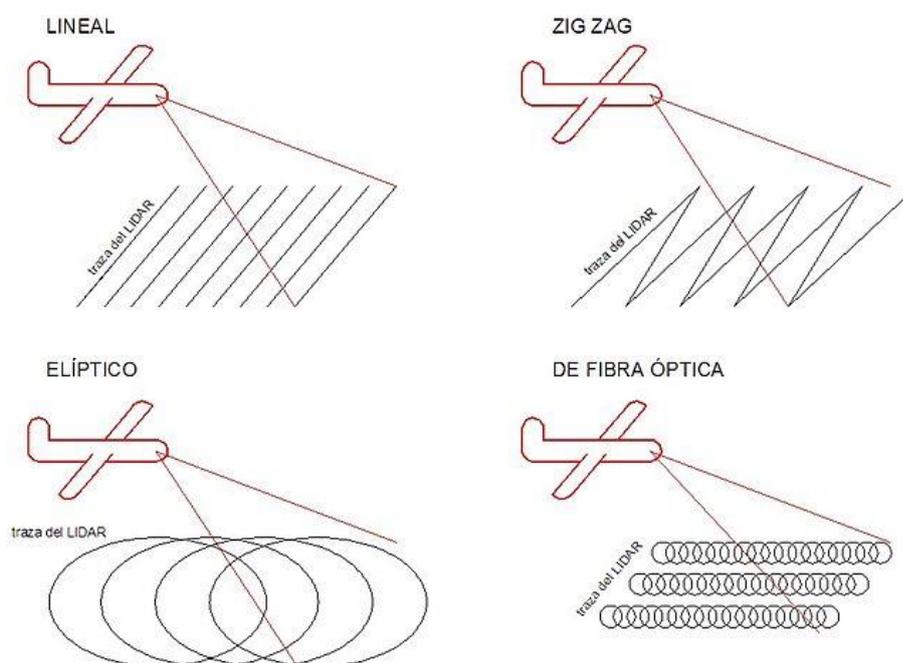


Figura 2: Tipos de escaneados LiDAR.

2.5. Ancho de pulso y frecuencia de repetición

Las características clave de los láseres pulsados son el ancho del pulso y la frecuencia de repetición. El ancho afecta a la resolución y a la precisión de la distancia. El vuelo basado en LiDAR necesita pulsos cortos del láser. Previamente no había necesidad de tiempos menores de 1 y 2 nanosegundos porque eso era el límite del ancho de banda del receptor; y como tal, no se obtenía ventajas con láseres con menos de 2ns de ancho de pulso. Además, había problemas con los picos de potencia óptica procedente de pulsos cortos.

Un ancho de 20ns corresponde a aproximadamente 300cm de resolución. Sin embargo, se puede tener mucho mejor alcance con suficientes fotones en un solo pulso o haciendo un promedio de muchos pulsos de baja energía. Usando esto se puede lograr precisión en \approx cm con un ancho de pulso en torno a nanosegundos. Hoy en día, hay un gran esfuerzo por llegar a \approx 1ns y reducir centímetros de la escala de resolución. Esto es bueno para determinar, ciertos tipos de objetivos militares.

La ventaja clave de una mayor frecuencia de repetición es que permite que el promedio de la señal mejore la relación señal-ruido del sistema. Tasas de kHz se necesitan para el promedio de una señal efectiva, sin embargo, tasas de MHz son demasiado altas y los pulsos pueden confundirse.

2.6. Aplicaciones

La tecnología LiDAR tiene infinidad de aplicaciones en geomática, ingeniería, urbanística, ciencias forestales y ambientales, agricultura, arqueología, geología, sismología, aplicaciones militares (detección y alcance de objetivos), estudios atmosféricos (aerosoles, nubes,...), imágenes 3D, misiones espaciales entre otros.

2.6.1. Imagen 3D LiDAR

El Análisis de imágenes consiste en la extracción de información a través de sensores y que se representa gráficamente en dos o tres dimensiones.

Actualmente los modernos radares láseres 3D emplean una novedosa tecnología receptora, usan el G-APD (fotodiodo de avalancha modo Geiger) que trabaja en el espectro visible, utiliza bajos pulsos de energía y altas tasas de repetición. Estos detectores pueden operar a una frecuencia de hasta \approx 10KHz y a menos de 20 Hz. Tales mejoras en los láseres 3D incluyen pulsos cortos y alta

sensibilidad de un sólo fotón (single-photon), alto ancho de banda, precisión por debajo de nanosegundos, y escalabilidad de gran tamaño de las matrices.

Por regla general los pulsos cortos son más exactos. Pulsos de 25 picosegundos pueden ser usados siempre que tengan suficiente energía para llegar y rebotar en el suelo.

Las mediciones en la distancia del tiempo de vuelo con un LiDAR de detección directa (incoherente) aéreo transportado utilizan láseres de pulsos cortos Q-conmutado pasivo a una máxima frecuencia típica de hasta $\approx 20\text{kHz}$. Cuanta mayor altitud, mayor potencia necesita el láser. Esto ha incrementado la necesidad de láseres de mayor potencia trabajando por debajo de nanosegundos a frecuencias en kHz.

Por lo tanto, para la aplicación 3D LiDAR se necesita:

- Altos pulsos de energía y bajas tasas de repetición de láseres bombeados.
- Láseres en continua (CW) con modulación de fase.
- Láseres en súper continua

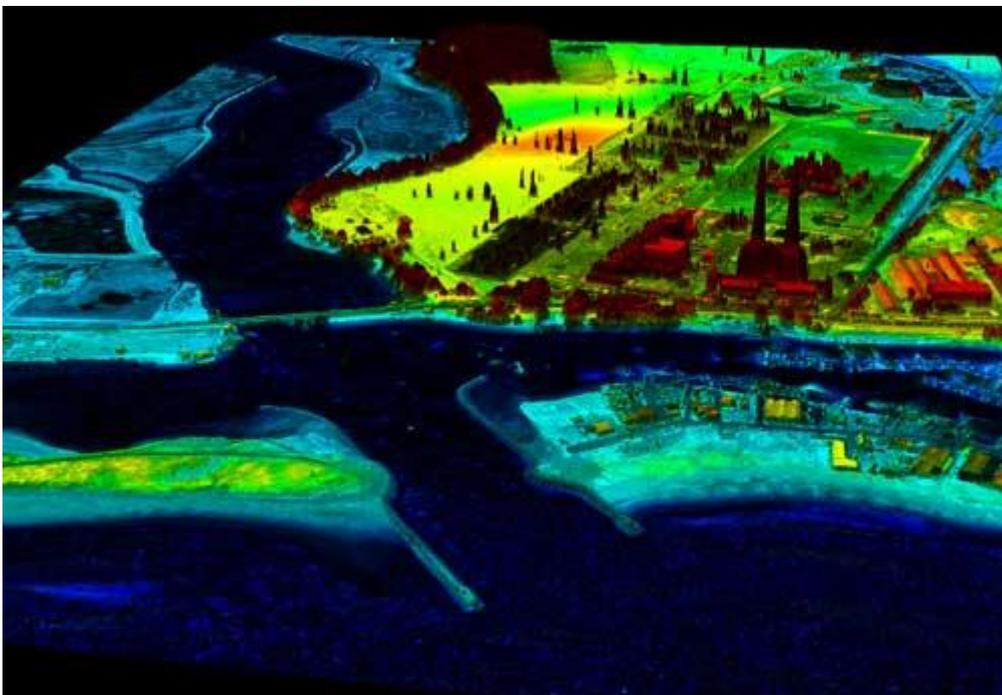


Figura 3: Imagen LiDAR en 3D

2.6.2. SLR (Satellite Laser Ranging)

Hay dos tipos de satélites: LEO por debajo de 250km y HAO&LRO que actualmente operan hasta una altitud de 20.000km. Los satélites de gran altitud son mejores para geodesia (representación de la superficie de la tierra) porque son menos afectados por las resistencias atmosféricas (polvo, aerosoles, etc).

Para esta aplicación LiDAR interesan pulsos cortos del orden de picosegundos para tener más precisión en la medición de distancias. Trabajan a $\approx 100\mu\text{J}$ en color verde (497 y 529nm) y usan SPAD (diodo de avalancha de un solo fotón) o G-APD. Actualmente se quiere trabajar a 1064nm pero se tiene una mejor ventana atmosférica y un menor ruido solar en el NIR (región espectral del infrarrojo cercano), además estos detectores tienen menor cálculo eficiente y alta tasa de fallos. A 1064nm los pulsos no atraviesan fácilmente las gotas de agua así que hay necesidad de desarrollar más tecnología.

Estos láseres SLR necesitan buena precisión del haz de luz, estabilidad y pequeña divergencia.

La NASA fue pionera en hacer láser SLRs en 1964. La original Q-switching (que se explica en el apartado 3.9.2) partió a muy baja frecuencia, 0.25Hz. En la mitad de los años 80, los láseres de la NASA se fueron actualizando a doble frecuencia y convirtiéndose a mode-locking (apartado 3.9.1).

A finales de los 90, la NASA inició un nuevo programa para la nueva generación de láseres SLR (NGSLR). El concepto es totalmente automatizado, no tripulado, seguro para el ojo, trabaja 24h al día y se reducen los costos de mantenimiento.

La fuente láser LiDAR SLR necesita:

- Bajos pulsos de energía.
- Alta frecuencia de repetición.
- Alta relación señal-ruido.

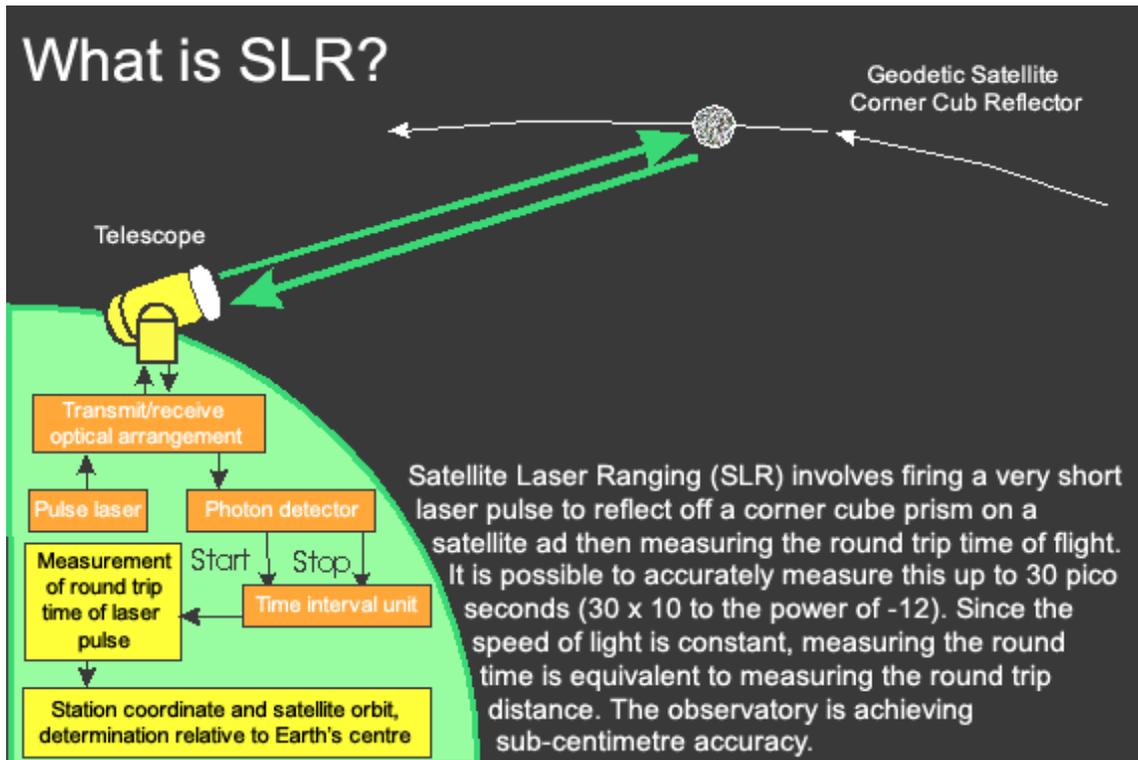


Figura 4: Funcionamiento Satellite Laser Ranging

El conteo de fotones (técnica de conteo de un solo fotón con G-APD) de los sistemas SLR sólo detecta una pequeña fracción de los pulsos retornados. Si la frecuencia de pulsos se incrementa, se adquieren más pulsos retornados. La alta repetición hace el satélite más visible contra el ruido solar. Como ejemplo de alto rango de repetición de sistemas SLR, la estación GRAZ SLR en Austria fue una de las primeras en implementar diodos láser de bombeo en estado sólido con las siguientes propiedades:

- Energía de pulsos: $400\mu\text{J}$
- Frecuencia de repetición: 2 kHz
- Ancho de banda/pulso: 10ps

Posteriormente la energía de pulsos se incrementa a $\approx 1 - 2 \text{ mJ}$.

Como el láser de fibra no puede generar suficiente energía de pulsos, este tipo de láseres no son una elección apropiada para esta aplicación. La frecuencia de repetición se ajusta mínimamente de 1.9 a $\approx 2 \text{ kHz}$ para evitar colisiones entre fotones reflejados y enviados y prevenir que el detector sea expuesto a una retro dispersión del láser. Esta capacidad para hacer pequeños cambios en la frecuencia de repetición directamente en el vuelo es una gran ventaja.

El original NGSLR de la NASA era seguro para los ojos y reunía las siguientes propiedades:

- Ancho pulso: > 300 picosegundos
- Energía pulso < 60 μ Julios

Ahora los láseres NGSLR no son seguros para el ojo. El requisito es, al menos, 1mJ y \approx 2 kHz con un ancho de pulso por debajo de 100 picosegundos. Sin embargo, se desea bajar la potencia de 2.5mJ a 100 μ J para que los satélites de altitud sean seguros para el ojo.

Otras aplicaciones en picosegundos

Otros láseres en picosegundos interesan para aplicaciones de rastreo y contramedida. Requieren altos pulsos de energía IR. Como por ejemplo:

- Frecuencia de pulsos: < 20 kHz (10 kHz es bueno)
- Energía de pulso: > 7.5mJ @ 1 KHz a 1064nm
- Ancho de pulso: < 500ps (idealmente < 100ps, \approx 25ps es bueno)
- Longitud de onda: 1 μ m

2.6.3. Batimetría

La batimetría es el estudio de las profundidades submarinas y los sistemas aéreos tripulados LiDAR son una técnica común para estas aplicaciones. La batimetría necesita el espectro verde para esta aplicación, porque el verde transmite bien por el agua. El azul es actualmente el mejor rango espectral para transmitir a través del agua, pero el verde tiene una energía de pulsos mayor. Sin embargo hay necesidad en desarrollar láseres azules pulsados para los nuevos RGB (red, green, blue) LiDAR.

Originalmente los sistemas láser aéreo tripulados para batimetría utilizaban láseres de 6ns de ancho de pulso, pero ahora se trabaja para reducirlo a 2ns. La U.S. Army Corp of Engineers conocido como Asignación de Zonas Costeras e Imágenes LiDAR (CZMIL) requiere láseres con pulsos menores de 2ns ya que la tendencia actual en batimetría es hacia la medición de aguas poco profundas. Mientras que los pulsos cortos son necesarios para aguas superficiales, para aguas profundas se necesita alta potencia o alta energía de pulsos de unos pocos mJ a 532nm. La utilización de láseres para batimetría por debajo de ns necesita ser investigado y además, comprobar la propagación del ancho de pulso a través del agua. Sin embargo, mediante la utilización de detectores procedente de otras aplicaciones como SLR y

3D LiDAR que se utilizan en la actualidad, la próxima generación de sistemas de batimetría usarán láseres por debajo de nanosegundos.

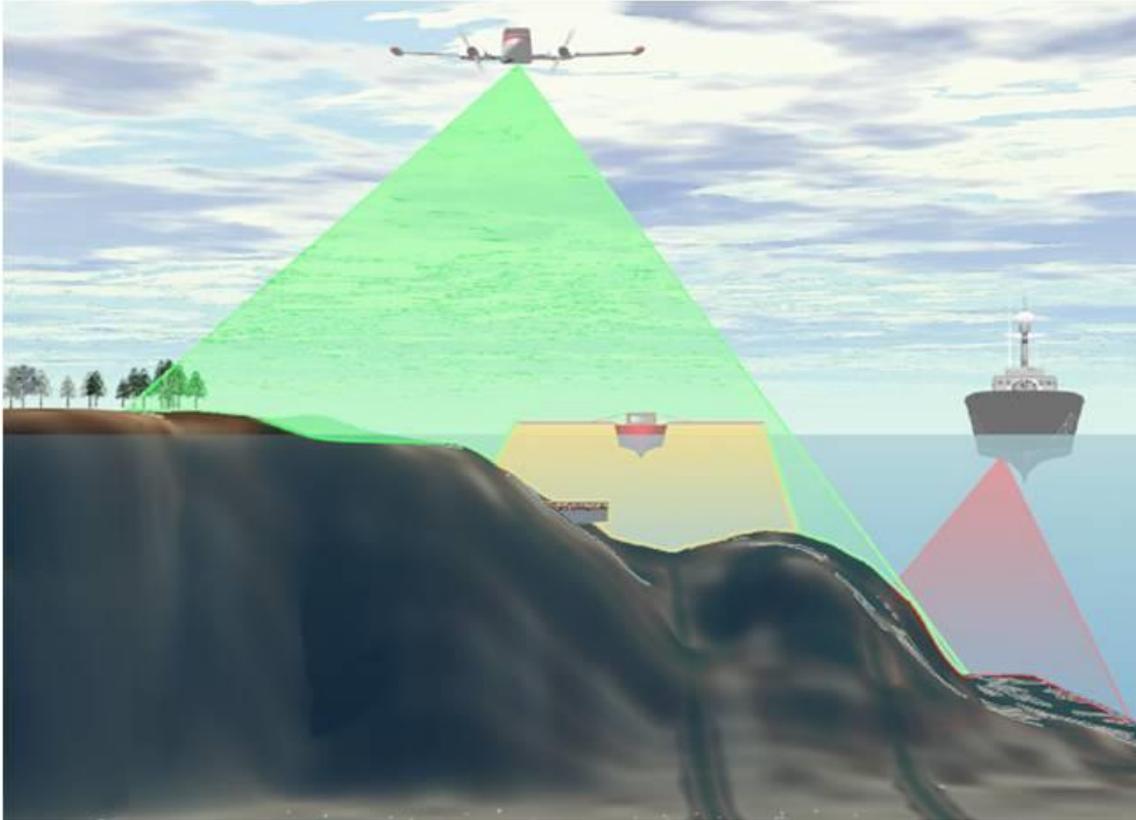


Figura 5: Sonar y lidar se complementan entre sí al tomar cartas náuticas; sonar puede trazar un mapa de las aguas profundas en alta mar, mientras que la combinación de topografía (infrarrojo) y batimetría (azul-verde) lo hace en las aguas poco profundas como costas y playas.

2.6.4. LiDAR viento

En sensores de viento, LiDAR supera a los sistemas Radar. Actualmente, los láseres de estado sólido con ancho de pulso en ns, se usan para sensores de viento. Un láser de fibra dopado con Erblio se usa para lograr pulsos de energía de 2mJ a $\approx 1\text{KHz}$ de frecuencia con una longitud de onda de $1,6\mu\text{m}$ para algunos sistemas de sensores de viento disponibles comercialmente.

Hay dos técnicas tradicionales para LiDAR viento:

- LiDAR Doppler coherente (LiDAR coherente)
- LiDAR Doppler incoherente (detección directa).

Con respecto a LiDAR coherente hay efectos atmosféricos a 532nm o 1 μ m. La retro dispersión no es coherente a estas longitudes de onda, por lo tanto, se mueve a longitudes de onda más largas. LiDAR coherente se desarrolla en la longitud de onda SWIR (infrarrojo reflejado). En este sistema, debido a que hay detectores de varios fotones en estas longitudes de onda SWIR, se pueden usar técnicas heterodinas. El empleo de estas técnicas en LiDAR viento coherente, requiere conocer la frecuencia “previsible” y como los pulsos son mezclados con un oscilador local.

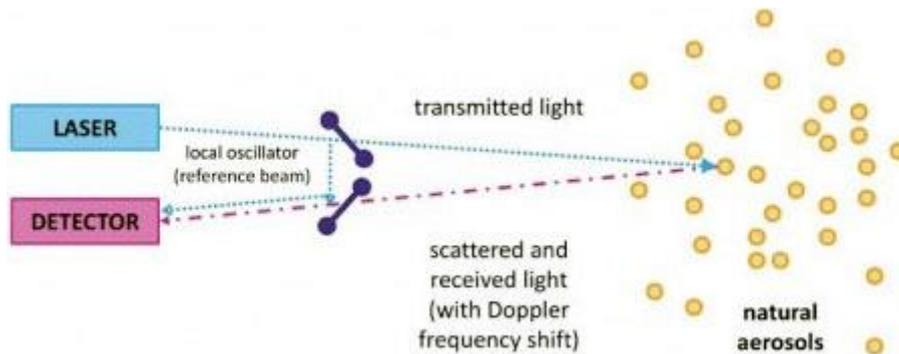


Figura 6: Funcionamiento de un sistema LiDAR viento.

La otra técnica es margen de detección (detección directa) la cual está en el espectro visible con detectores G-APD. La detección directa permite sistemas de medición de viento de largo alcance de entre 10 y 12km de distancia. Los láseres en continua tienen problemas de resolución por eso se necesita desarrollar sistemas coherentes pulsados y transformar el rendimiento de los pulsos procedentes de fuentes láseres. Esta aplicación requiere una fuente láser con un ancho de banda estrecho (NL) y un modo longitudinal simple (SLM).

Una aplicación comercial de LiDAR viento es para la energía eólica. Hay dos variantes sobre LiDAR viento para la energía eólica:

- En la superficie del parque eólico – necesitan 4 o 5 estaciones LiDAR para el parque entero.
- LiDAR montado en cada molino de viento.

El LiDAR montado en cada molino de viento reduce el coste. Es una técnica parecida a detección directa, pero no basada en el efecto Doppler. En esta técnica no importa el ancho de banda, sino láseres de pulsos cortos por debajo de nanosegundos. Estos sistemas actualmente usan láseres de 30ps y 2MHz, pero hay interés en incrementar la frecuencia (a 10MHz incluso a 80MHz). Actualmente están usando longitud de onda visible para una mejor sensibilidad en detectores APD.[2]

2.6.5. LiDAR de alta resolución espectral (HSRL) y LiDAR micro pulsos (MPL)

HSRL mide el lento movimiento de las partículas de aerosol para medir la profundidad óptica y la sección transversal de la retro-dispersión.[2]

La NASA sólo usaba láseres LiDAR de gran energía de pulso porque baja energía de pulso y alta frecuencia en el uso de los láseres era algo que no estaba bien aceptado. Para HSRL, el ancho de pulso en ns es adecuado, pero se quiere operar a 4KHz, y no más bajo que 2 kHz. Durante el tiempo total de conteo de fotones usado, se quiere operar a la más alta frecuencia posible sin restringir el rango dinámico, que es limitado por:

- A más de 4kHz se obtiene superposición. Por ejemplo, si se trabaja a 10 kHz, se encuentra el límite a ≈ 15 km debido a la confusión del pulso.
- Saturación del detector APD con la actual tecnología.

HSRL es indicado como estado del arte en patentes de micro pulso LiDAR (MPL). MPL se emplea típicamente en continua, vigilancia automática de nubes y perfiles de aerosol en la atmósfera. Hoy en día, el MPL está más extendido que HSRL y hay más unidades desplegadas por todo el mundo debido a la capacidad para usar baja potencia y láseres de bajo coste. Por ejemplo, actualmente algunas están yendo a China para medir la calidad del aire. HSRL tiene una ventaja sobre el micro pulso LiDAR (MPL) y es que genera medidas calibradas. Y es que HSRL trabaja a partir del fenómeno de la dispersión de Rayleigh que favorece la calibración.

HSRL con LIDAR incoherente requiere menor frecuencia que con LiDAR coherente. Tanto HSRL como MPL utilizan filtros. Típicamente los MPL usan láseres en verde y receptores en el espectro visible lo cual implica pocos cientos de pm del filtro paso banda. HSRL actualmente usa dos filtros:

- Filtro de yodo de ancho de banda ≈ 1.8 GHz
- Filtro paso banda de luz solar de ancho de banda ≈ 8 GHz

En HSRL hay interés en reducir la longitud de onda, pero un importante componente de la señal retornada es la dispersión molecular con un gran ancho de banda debido al movimiento browniano (movimiento aleatorio de las partículas microscópicas). Por lo tanto, se necesitan más fotones (láseres SLM de mayor potencia a 266nm y 355nm) que reduzcan el coste de láseres modo multilongitudinal de 532nm que sean adecuados para MPL.

2.6.6. Topografía

En topografía, la medición de distancias con láser para aplicaciones de mapas a gran escala, está revolucionando la toma de datos digitales relativos a la elevación de terrenos.

Un sistema LiDAR emite pulsos de luz que se reflejan en el terreno y en otros objetos de cierta altura. Los fotones de los pulsos reflejados son transformados en impulsos eléctricos e interpretados por un registrador de datos de alta velocidad. Puesto que la fórmula para la velocidad de la luz es conocida, los intervalos de tiempo entre la emisión y la recepción se pueden calcular fácilmente. Estos intervalos son transformados en distancia a partir de la información posicional obtenida de los receptores GPS del avión/terreno y de la unidad de medición inercial de abordaje (IMU), la cual registra, constantemente, la altitud de la aeronave.

Los sistemas LiDAR registran datos de posición (x, y) y de elevación (z) en intervalos predefinidos. Los datos resultantes dan lugar a una red de puntos muy densa, típicamente a intervalos de entre 1 y 3 metros. Los sistemas más sofisticados proporcionan datos no solo del primer retorno sino también de los siguientes, que proporcionan alturas tanto del terreno como de su vegetación. Las alturas de la vegetación pueden proporcionar la base de partida para el análisis de aplicaciones de diferentes tipos de vegetación o de separación de altura.

Una ventaja significativa de esta tecnología, con respecto a otras, es que los datos pueden ser adquiridos en condiciones atmosféricas en las que la fotografía aérea convencional no puede hacerlo. Por ejemplo, la toma de datos puede hacerse desde un avión en vuelo nocturno o en condiciones de visibilidad reducida, como las que se dan con tiempo brumoso o nublado.

Los productos estándar fotogramétricos derivados de los datos LiDAR incluyen modelos de contorno y elevación para ortofotos. Para la obtención de contornos precisos se requiere un post procesamiento de los datos iniciales. Puesto que los datos LiDAR son obtenidos sobre los objetos elevados (por ejemplo edificios), se usan sofisticados algoritmos para eliminar los puntos relativos a estos objetos. Debido a la gran densidad de puntos se requieren muy pocas líneas, si acaso, para representar con precisión el terreno. No obstante, la presencia del sistema LiDAR y el uso de software de post procesamiento y procedimientos de validación deberán ser incorporados en el proceso para asegurarse que los contornos finales sean representativos del terreno. El usuario final también deberá considerar que los contornos derivados de LiDAR tendrán una apariencia diferente a aquellos

compilados mediante técnicas fotogramétricas convencionales. Debido a la densidad de puntos obtenida, los contornos derivados de LiDAR, aunque altamente precisos, tenderán a tener una apariencia más quebrada.

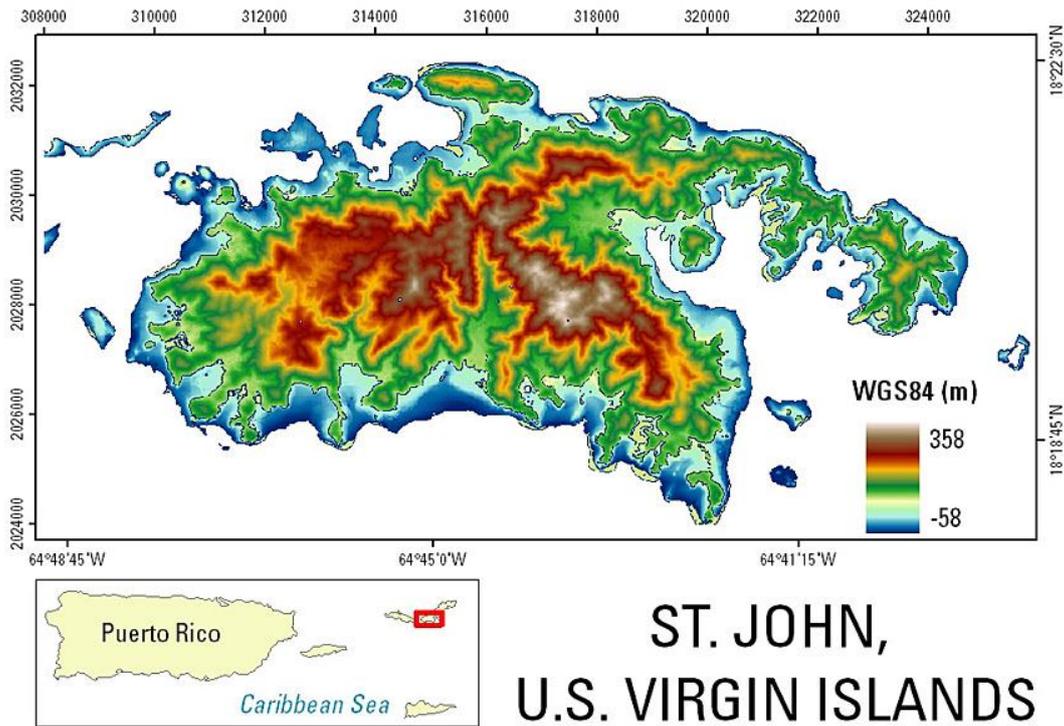


Figura 7: Mosaico de primera superficie y topografía sumergida

El post procesamiento y la verificación en 3D también son recomendables cuando se hace uso de datos LiDAR para la generación de ortofotos digitales. Aunque los requerimientos de precisión vertical para la generación de una ortofoto son menos estrictos que para la generación de contornos, los datos deberán ser verificados para detectar errores de bulto. No se requiere necesariamente que los puntos en edificios sean eliminados. De hecho, los edificios modelados con datos LiDAR serán rectificadas en su verdadera posición (ortofoto verdadera) y las distorsiones radiales eliminadas causadas por inclinación de los edificios. Esta mejoría es de alguna manera afectada por el hecho de que los bordes de edificios pueden tender a verse redondeados; dependiendo esto de la localización de los puntos relativos al borde del edificio.

Con el post procesamiento se pueden obtener los siguientes datos:

- Extracción de cota suelo
- Extracción de edificios
- Extracción de árboles y masas forestales
- Herramientas de depuración del terreno
- Creación de vectores tridimensionales
- Herramienta de cuadratura de edificios
- Herramienta de edición.
- Recorte de imágenes

La precisión de los datos obtenidos mediante la técnica LiDAR dependen de:

- La frecuencia del pulso.
- La altura de vuelo.
- El diámetro del rayo láser (dependiente del sistema)
- La calidad de los datos GPS / IMU y los procedimientos de post procesamiento.

Se puede llegar a precisiones de 1 metro en las coordenadas de posición y unos 15 cm en la coordenada de altura, si las condiciones en las que se efectúan las medidas son óptimas. Sin embargo, para cualquier aplicación a gran escala y que requiera una elevada precisión, los datos obtenidos se tendrán que comparar con otras técnicas. Usualmente se superponen los puntos obtenidos (con sus tres coordenadas dimensionales) sobre imágenes digitales. Para lograrlo se usan estaciones fotogramétricas digitales.

Formatos de archivo

La mayor parte de sistemas y aplicaciones LiDAR trabajan con un mismo formato, el formato LAS, cuya especificación ha sido desarrollada por la American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), y que se ha convertido en un estándar para trabajar con datos LiDAR.

LAS es un formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional. El formato LAS es un archivo binario que mantiene toda la información procedente del sistema LiDAR y conserva la misma según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura.

2.6.7. Detección de velocidades

Es la tecnología que emplean las pistolas láser de la policía para determinar la velocidad de los vehículos que circulan en el tráfico rodado. Se diferencia del radar en que en lugar de usar ondas de radio se usa un haz de luz láser pulsante en la banda del infrarrojo cuya frecuencia de pulsación es de 33MHz y cuya longitud de onda es de 904nm.

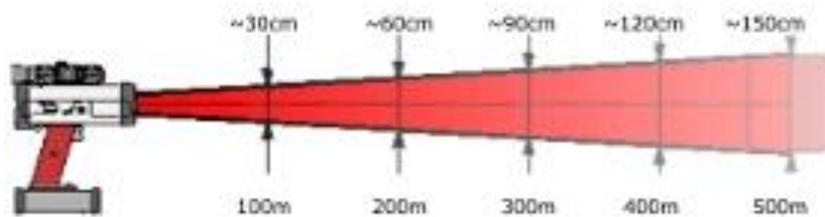


Figura 8 - Haz láser.

Las ventajas del LiDAR frente al radar son varias:

- Es mucho más rápido. En circunstancias normales puede obtener la velocidad del vehículo en sólo 3 décimas de segundo.
- Como emite un haz de luz láser, el haz no diverge tanto y es mucho más estrecho que el del radar, que se dispersa y rebota en el entorno. El haz láser forma un cono muy estrecho. A unos 500 metros tiene una anchura aproximada de 2,5 metros de diámetro, con lo que se puede apuntar la pistola a un vehículo concreto y determinar su velocidad aunque haya más coches circulando a su alrededor. Puede, por lo tanto, emplearse en tráfico intenso apuntándose a los vehículos que se escojan. Además, debido a esta manera de funcionar y su rapidez, la detección mediante detectores que se encuentren instalados en los vehículos iluminados por el haz es bastante ineficaz, ya que cuando el detector alerta de la presencia del láser es demasiado tarde, porque la pistola ya ha registrado su velocidad.
- Es más fácil de manejar, transportar y mantener.
- Es más económico que un radar.
- Puede funcionar, al igual que el radar, por la noche, en lluvia, desde puentes, en vehículos estacionados, en modo automático o manual, etc.

- La única limitación del láser LiDAR es que siempre tiene que estar estático. El radar se puede emplear en movimiento, pero el láser LiDAR no se puede mover mientras realiza la medición.



Figura 9: Láser detección de velocidades

2.6.8. Gestión forestal

En la lucha contra incendios, la disponibilidad de un modelo preciso del tipo de combustible presente en cada punto del terreno es esencial para poder predecir el comportamiento del fuego con exactitud y poder así tomar decisiones sobre las técnicas de ataque a emplear o sobre los recursos necesarios para combatir el fuego.

Gracias al LiDAR, es posible general un mapa preciso de modelos de combustible basándose en la información vertical captada por las mediciones del LiDAR. Además, es posible mejorar aún más la precisión combinando los datos captados por el LiDAR con los datos obtenidos por otras vías, como pueden ser imágenes multispectrales.

Teniendo en cuenta los valores de altura proporcionados por el LiDAR y la distribución vertical de los combustibles, captada por la posición relativa en diferentes intervalos de altura de grupos de mediciones dentro de la nube de puntos, es posible determinar tanto la cantidad de biomasa presente como el tipo de esta.

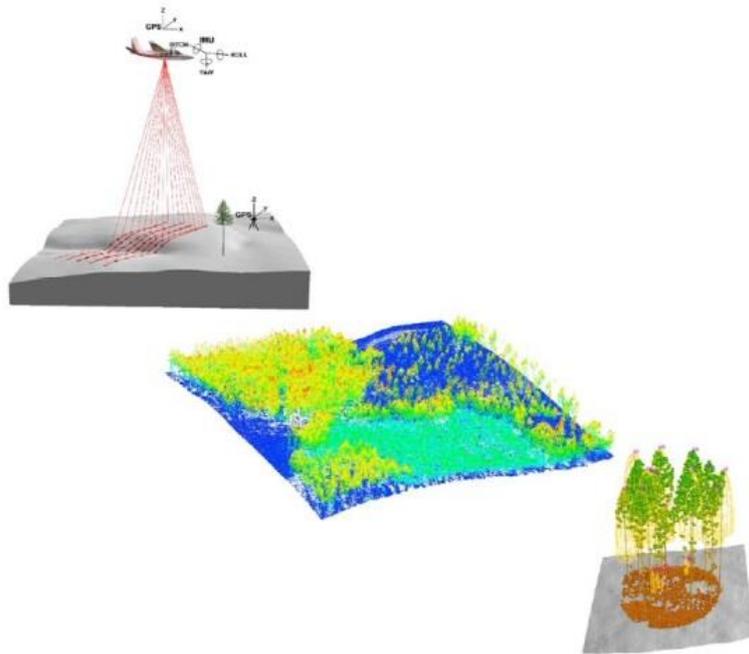


Figura 10: Gestión forestal en detalle.

2.6.9. Otras aplicaciones

En física atmosférica, a través del uso de instrumentos LiDAR es posible medir densidades de ciertos constituyentes de la atmósfera (aerosoles, nubes, potasio, sodio, oxígeno y nitrógeno molecular, etc.). Con la tecnología más avanzada es posible calcular perfiles de temperatura o medir la estructura de vientos.

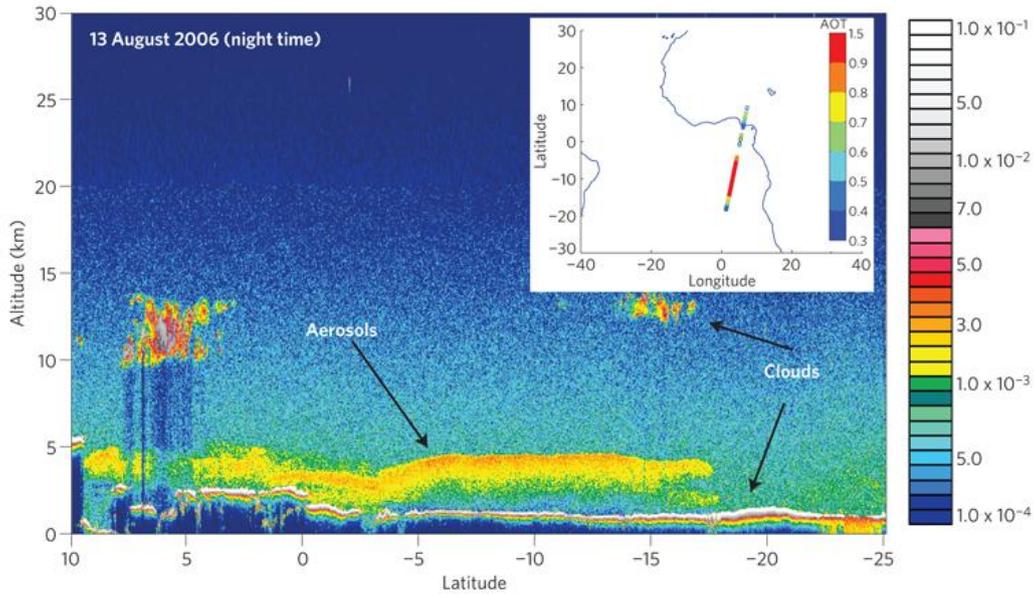


Figura 11: Perfil vertical proporcionado por LiDAR nubes de aerosol y observaciones del satélite Pathfinder infrarrojo (CALIPSO).

La Figura 11 muestra una línea gruesa de bruma procedente de los incendios (aerosoles) sobre una capa delgada de nubes. Esta imagen fue capturada en el océano atlántico al sureste, fuera del sur de África. Los investigadores encontraron que el efecto de calentamiento de los aerosoles incrementó sustancialmente con una cierta fracción de nubes adyacentes. *Universidad de Washington y Centro de Investigación de Langley de la NASA.

Capítulo 3

Láser de fibra

3.1. Introducción

En un láser el concepto básico es la amplificación de la luz a partir de la emisión estimulada de radiación. Para obtener amplificación de la luz de un medio dado es necesario establecer una inversión de poblaciones entre un par elegido de niveles de energía y promover la emisión estimulada a expensas de la emisión espontánea. En la práctica, es necesario contar con algunos medios de realimentación óptica de modo que el haz estimulado pasa de ida y vuelta varias veces. La ganancia del sistema debe ser positiva. Restringiendo el modo láser entre dos espejos, uno totalmente reflejante y otro parcialmente reflejante.

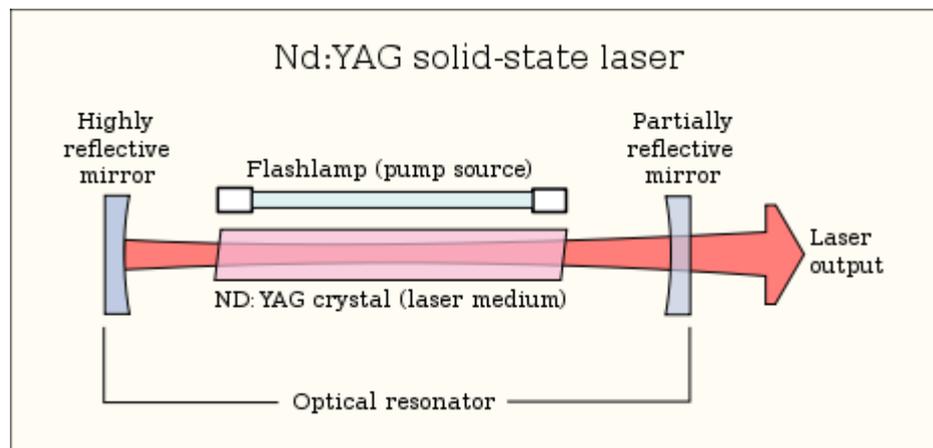


Figura 12: Diagrama esquemático de un láser tipo, mostrando las tres partes importantes.

3.2. Tipos de láseres

Existen muchísimos tipos de láseres diferentes. Estos se pueden clasificar por su longitud de onda de emisión, desde las microondas hasta los rayos X; por su potencia, desde milivatios hasta petavatios; por su régimen de emisión, pulsados o continuos; por las características de su medio activo, sólidos, líquidos o gaseosos; o por otras características; y cada uno de estos tipos tiene unas utilidades muy diversas.

A continuación mostramos una tabla según el tipo de característica:

Láser	Medio Activo	Rango de frecuencia de emisión	Régimen de emisión	Potencia de pico máxima (aprox.)	Utilidades
Helio-Neón	Gas	Rojo	Continuo	10 mW	-Metrología -Lectores de códigos de barras.
Ion de Ar	Gas	Verde-Azul	Continuo	10 W	-Bombeo -Espectáculos
CO ₂	Gas	Infrarrojo	Continuo o pulsado	1 kW	-Corte -Soldadura -Cirugía
Excímero	Gas	Ultravioleta	Pulsado	1 mW	-Microprocesado -Cirugía
Químicos	Gas	Infrarrojo	Continuo	1 mW	-Escudos antimisiles
Colorante	Líquido o sólido	IR-Visible-UV	Continuo o pulsado	1 W	-Espectroscopía
Rubí	sólido	Rojo	Pulsado	1 kW	-Investigación
Neodimio: YAG	sólido	Infrarrojo	Continuo o pulsado	1 GW	-Bombeo -Procesado de materiales -Cirugía
Titanio: Zafiro	sólido	Infrarrojo	Continuo o pulsado	1 PW	-Investigación -Pulsos ultracortos
Semiconductor	sólido	Infrarrojo-Visible	Continuo	1 mW - 1 kW	-Comunicaciones -Cd, DVD -Punteros -Bombeo
Fibra	sólido	Infrarrojo-Visible	Continuo o pulsado	1 W - 1 kW	-Procesado de materiales -Comunicaciones -Espectroscopía
Electrones libres	**	Microondas - Rayos X	Pulsado	100 kW	-Investigación

Tabla 1: Láser según el tipo de característica.

3.3. Láser de fibra

Un amplificador de fibra dopada con tierras raras se puede convertir en un láser situándolo dentro de la cavidad diseñada para proporcionar realimentación óptica. Tales láseres son llamados láseres de fibra. En este tipo de láseres hay fibras ópticas que actúan como medios de ganancia, tales como fibras dopadas de erbio, iterbio entre otras, aunque algunos láseres con un medio de ganancia semiconductor y un resonador de fibra han sido llamados láseres de fibra.

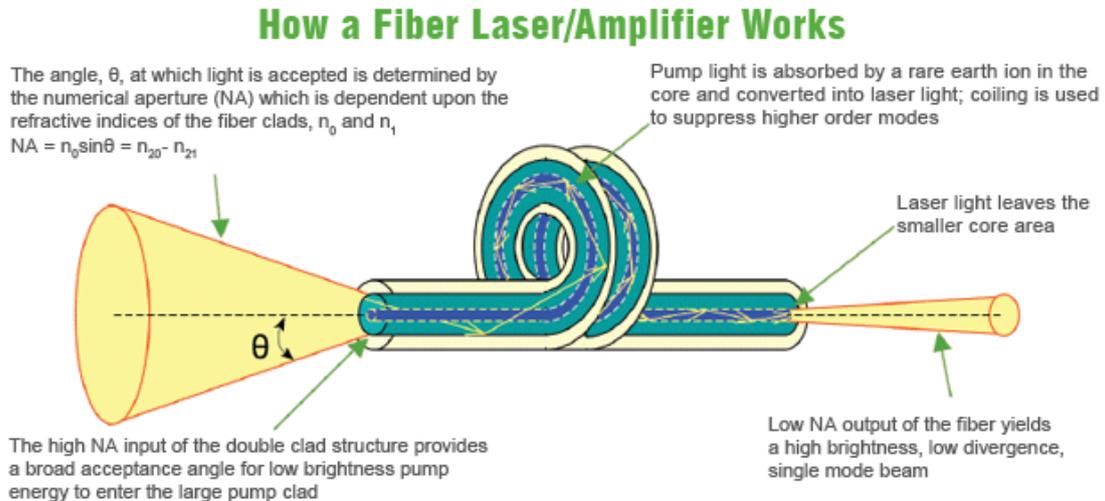


Figura 13: Funcionamiento de un láser en fibra.

3.4. Ganancia y amplificación espontánea en fibras activas

A continuación se explica brevemente la configuración de bandas eléctricas y los fenómenos de ganancia y amplificación de emisión espontánea (ASE) que aparecen al bombear un segmento de fibra dopada con erbio (FDE), y que son necesarios para generar emisión estimulada.

Cuando en una FDE se inyecta una señal óptica a una determinada longitud de onda, los iones de tierras raras que dopan la fibra absorben dicha señal de bombeo provocando una excitación de los mismos. Esta excitación produce una inversión de población a un nivel de energía superior, es decir que los electrones pasan de un estado de relajación o estado fundamental a un estado excitado de mayor energía. Finalmente el número de electrones en el estado excitado será mayor que en el estado fundamental. Dicho proceso se le denomina absorción estimulada.

Una vez alcanzado el estado excitado los electrones vuelven al estado fundamental. Los iones excitados cuando impactan con una señal de entrada presentan una probabilidad (dependiendo de la longitud de onda del fotón de

entrada) de emitir por emisión estimulada su energía en forma de luz y retornar al nivel de energía inferior más estable. Estos fotones por emisión estimulada presentan las mismas características que los fotones de la señal de entrada (misma longitud de onda, misma fase).

Sin embargo, en el proceso de amplificación se genera ruido debido, esencialmente, al efecto de la desexcitación espontánea de los iones. Como los iones tienen un tiempo de vida finito en el estado excitado ($\tau=10\text{ms}$ para el caso de los iones de Erblio), algunos de los iones retornan de manera espontánea al estado fundamental y de este modo emiten un fotón. Este fotón no tiene coherencia con respecto a la señal de entrada, de manera contraria a los fotones generados por emisión estimulada. Por esta razón, los fotones generados espontáneamente, que a su vez son amplificados por la FDE a través del proceso de emisión estimulada y se denomina como emisión espontánea amplificada (ASE), forma un ruido que se suma a la señal amplificada. El ancho de banda del ASE abarca toda la banda espectral de amplificación.

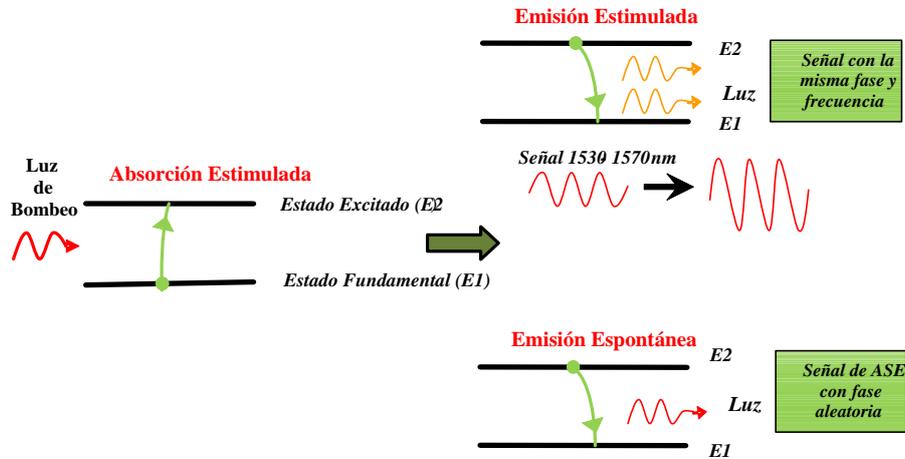


Figura 14: Esquema de emisión estimulada y emisión espontánea.

Para FDE el rango de longitudes de onda en la que se produce emisión ASE está centrado alrededor de 1550nm, y tiene una anchura aproximada de 40nm.

El ASE se genera tanto en el sentido de la señal de bombeo, se denomina 'ASE Forward', como en el sentido contrario al bombeo, se denomina 'ASE Backward'.

En la siguiente figura se representa un sistema básico, destacando como se distribuye el ASE generado en la FDE.

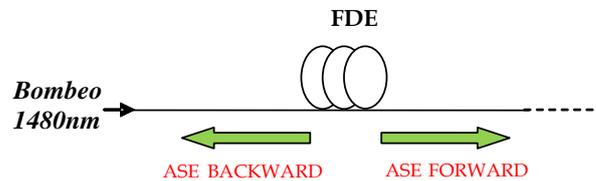


Figura 15: Dibujo de las señales ASE.

A través del ASE generado en la FDE, se emplea una etapa de filtrado óptica para seleccionar la banda espectral donde se quiere alcanzar la oscilación del láser. La característica principal del Erblio es la alta ganancia que se consigue, hasta 50dB en régimen de baja señal de entrada, con potencias de bombeo moderadas, de varias decenas de mW. Otra propiedad importante es que el espectro de amplificación se encuentra típicamente entorno al intervalo que va desde 1530nm y 1600nm, correspondiente a la tercera ventana de transmisión. Dicho intervalo tiene especial interés en comunicaciones ópticas por la baja atenuación que presentan las fibras de sílice a estas longitudes de onda.

En resumen, las características más importantes de los EDFAs son:

- Frecuencia de operación en la banda C (aproximadamente de 1529 nm a 1565 nm).
- Alta ganancia.
- Baja sensibilidad al estado de polarización de la luz de entrada.
- Longitud de onda de bombeo 980 nm o 1480nm.

Haciendo hincapié en la característica de la ganancia, se ha de decir que ésta depende de la longitud de la fibra activa, de la potencia de bombeo y de la concentración de los iones de erbio.

3.5. Ventajas y aplicaciones del láser de fibra

Las ventajas de los láseres de fibra con respecto a otros tipos incluyen:

- *La luz ya está acoplada en una fibra flexible:* El hecho de que la luz ya está en una fibra permite que sea entregado fácilmente a un elemento de enfoque móvil.
- *Alta potencia de salida:* los láseres de fibra pueden tener regiones activas de varios kilómetros de largo, por lo que pueden proporcionar ganancia óptica muy alta.
- *De alta calidad óptica:* Las propiedades de guía de ondas de la fibra reducen o eliminan la distorsión térmica de la trayectoria óptica.
- *Tamaño compacto:* Los láseres de fibra son compactos en comparación con los láseres de gas de potencia similar, debido a que la fibra puede ser doblada y enrollada para ahorrar espacio.
- *Fiabilidad:* Los láseres de fibra presentan una alta estabilidad de vibración, mayor vida útil y está libre de mantenimiento.
- Alta potencia de pico y pulsos en nanosegundos permiten el marcado y grabado eficaz.
- La energía adicional y una mejor calidad del haz proporcionan bordes de corte limpios y velocidades de corte más rápidas.
- Bajo coste de obtención propia.

Aplicaciones de los láseres de fibra incluyen el procesamiento de materiales (marcado, grabado, corte), las telecomunicaciones, la espectroscopia, la medicina y las armas de energía dirigida.

3.6. Fibra de doble revestimiento

La fibra de doble revestimiento es una tecnología importante en el área de la fibra óptica como parte activa, en particular para los láseres de fibra de alta potencia y los amplificadores.

Fibra de doble revestimiento (DCF) es una clase de fibra óptica con una estructura que consta de tres capas de material óptico en lugar de las dos habituales. La capa más interna se llama núcleo. Está rodeado por un interior de revestimiento, que está a su vez rodeada por un revestimiento exterior. Las tres capas están hechas de materiales con diferentes índices de refracción.

Un láser de fibra o amplificador basado en una fibra dopada monomodo puede generar una salida limitada de difracción. Por otro lado el uso de fibras multimodo conduce a una mala calidad del haz.

Este problema se ha resuelto con la invención de las fibras de doble revestimiento que permiten el revestimiento de bombeo de dispositivos de fibra. La luz láser se propaga por el núcleo, que está rodeado por un revestimiento interior. Sólo el núcleo se dopa con tierras raras. La luz de bombeo se limita al revestimiento interior por un revestimiento exterior con un menor índice de refracción, y también se propaga por el núcleo, donde se absorbe por los iones activos del láser. El revestimiento interior tiene un área significativamente más grande (comparada con el núcleo) y una apertura numérica mucho más alta, de modo que puede soportar un gran número de modos de propagación, lo que permite ser eficiente en la salida, por ejemplo para diodos láser de alta potencia.

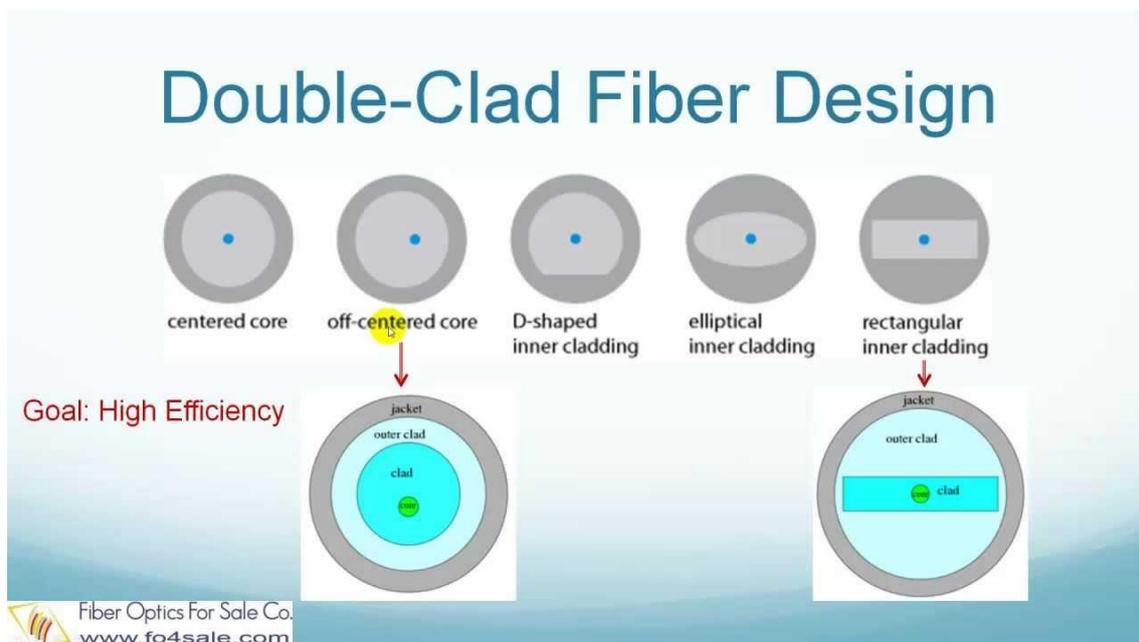


Figura 16: Fibra de doble revestimiento.

3.7. Láser de fibra de Múltiples longitudes de onda

Hoy en día, los láseres de múltiples longitudes de onda son de gran interés para las telecomunicaciones y sensores de multiplexación. Estos láseres tienen un gran potencial en pruebas de fibra óptica y mediciones de los componentes WDM. Los requisitos para este tipo de fuentes ópticas son: elevado número de canales, moderada potencia de salida ($\approx 100\mu\text{W}$ por canal) con buena señal relación ruido y espectro plano, funcionamiento SLM (single longitudinal mode), capacidad de ajuste y colocación exacta de la frecuencia.

Llegar a todos estos requisitos al mismo tiempo es una tarea difícil, y muchos enfoques diferentes se han propuesto usando tecnología de fibra dopada con erbio con el fin de obtener oscilación del láser de múltiples longitudes de onda.

Los láseres de fibra ofrecen grandes posibilidades como fuentes de múltiples longitudes de onda. Su facilidad de fabricación ha dado muchos diseños ingeniosos. El principal reto en la producción de una salida multilínea con un láser de fibra dopado con erbio (EDFL) es el hecho de que el ion de erbio se satura homogéneamente a temperatura ambiente, evitando el funcionamiento estable de múltiples longitudes de onda.

El funcionamiento SLM de láseres de fibra es deseable para muchas aplicaciones donde la coherencia es necesaria. Sin embargo, estos láseres funcionan a múltiples longitudes a causa de una gran ganancia de ancho de banda ($> 30\text{ nm}$) y un pequeño espaciado modo longitudinal (100 MHz). El ancho espectral de la salida láser puede exceder en 10 nm bajo el funcionamiento en CW.

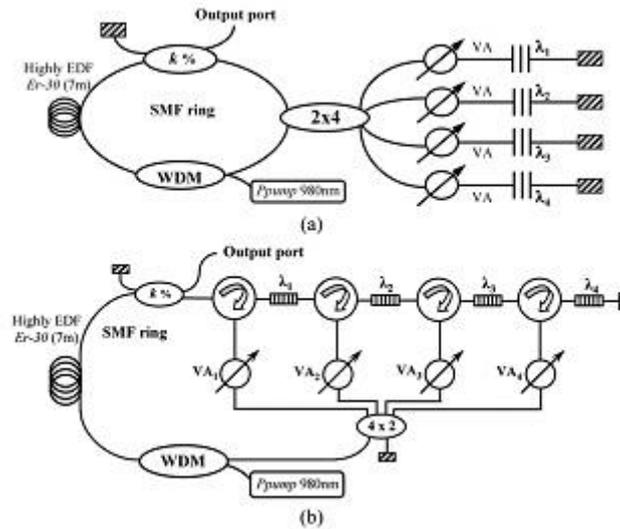


Figura 17: (a) Configuración experimental para la topología paralela con acopladores. (b) Configuración experimental para la nueva topología con circuladores.

3.8. El láser pulsado

Un láser pulsado es un láser que emite luz en forma de pulsos (flashes), al contrario que los láseres que emiten luz de manera continua. Los láseres pulsados pueden emitir pulsos de muy corta duración, hasta unos pocos femtosegundos, a un ritmo de miles de pulsos por segundo, y por tanto permiten estudiar fenómenos ultra-rápidos en la naturaleza, como el movimiento de los electrones en una molécula.

3.8.1. Cómo se generan los pulsos ultracortos

Las ondas en forma de pulsos se producen superponiendo muchas ondas continuas con frecuencias distintas. Todo el que haya afinado una guitarra alguna vez sabrá que si toca dos cuerdas ligeramente desafinadas oírás una pulsación y que la frecuencia de esa pulsación es tanto mayor cuanto más desafinadas entre sí están las cuerdas. Con los láseres pasa lo mismo (lo cual no es de extrañar si se tiene en cuenta que el funcionamiento de un láser tiene cosas en común con el mecanismo de una guitarra).

Si la cavidad resonante del láser contiene ondas de muchas frecuencias distintas (lo cual es posible con ciertos medios activos de banda ancha) entonces es posible, en principio, sumar las diferentes ondas para producir una salida de luz pulsada. Lo único que se necesita es que la relación de fase entre las ondas de distinta frecuencia sea fija, es decir, que la posición relativa de las crestas y los valles de las

diferentes ondas sea siempre la misma. En los láseres de banda ancha de emisión continua esa relación entre las fases es en principio aleatoria, pero existen técnicas llamadas mode-locking precisamente para fijarla y generar una salida pulsada.

Cuanto más frecuencias distintas se sumen, más cortos serán los pulsos. De hecho la duración de los pulsos es inversamente proporcional al rango de frecuencias contenido en la cavidad. Por tanto, el secreto para la generación de pulsos ultracortos es contar con dos ingredientes: un medio activo que emita luz láser en un rango amplio de frecuencias y una técnica para fijar las fases relativas entre las diferentes ondas (mode-locking).

3.9. Técnicas de pulsado

3.9.1. *Mode - locking*

Mode - locking (modo de bloqueo) es una técnica en la óptica por la que un láser se puede hacer para producir pulsos de luz de muy corta duración, del orden de picosegundos (10^{-12} s) o femtosegundos (10^{-15} s).

La base de la técnica es fija para inducir una fase de relación entre los modos longitudinales del láser de la cavidad resonante. El láser entonces se dice que es de enganche de fase o de modo bloqueado. La interferencia entre estos modos hace que se produzca la luz láser como un tren de impulsos. Dependiendo de las propiedades del láser, estos pulsos pueden ser de muy breve duración, tan cortos como unos pocos femtosegundos.

3.9.2. *Q - Switching*

Q – Switching (Q – conmutación) a veces conocido como formación de pulso gigante, es una técnica mediante la cual un láser se puede hacer para producir un haz de salida de pulsos. La técnica permite la producción de impulsos de luz con picos de energía extremadamente altos (gigavatios), mucho mayor de lo que sería producido por el mismo láser si estuviera operando en modo continuo (de salida constante). En comparación con mode-locking, Q-switching conduce a tasas de repetición de impulsos mucho más bajas, energías de pulso mucho más altas y duraciones de pulso más largas. Las dos técnicas se aplican a veces juntas.

3.9.3. SESAM

Un semiconductor espejo absorbente saturable (SESAM o simplemente SAM: espejo absorbente saturable) es una estructura con un espejo al que se incorpora un material absorbente saturable, todos realizados en tecnología semiconductor. Tales dispositivos se utilizan sobre todo para la generación de pulsos ultracortos por bloqueo de modo pasivo de diversos tipos de láseres.

Un SESAM contiene un espejo de Bragg semiconductor y una sola capa cuántica absorbente. Los materiales del reflector de Bragg tienen una gran energía del gap, de modo que no se produce absorción en esa región. Los SESAM, también se llaman reflectores de Bragg saturables (SBR). Para obtener una gran modulación, se requiere por ejemplo, la técnica Q-switching modo pasivo.

Capítulo 4

Montajes para su aplicación

4.1. Sistema LiDAR de imágenes 3D de alta resolución formado por un láser de fibra, pulsado, de nanosegundos, monomodo y con alta potencia de pico

El sistema LiDAR ha sido probado para ser una herramienta eficaz para el rastreo de imágenes 3D, sensores de viento, absorción diferencial [4].

4.1.1. Introducción

Una fuente láser con excelente calidad es el requisito clave en los sistemas LiDAR. Tres fuentes láser se utilizan para sistemas LiDAR de imágenes 3D. Por ejemplo, el diodo láser comercial, es limitado por el ancho de pulso y el pico de potencia y se usa como una fuente láser para distancias cortas y baja precisión [5]. Por otra parte, el láser de estado sólido produce salida de alta energía y estrecho ancho de banda y se ha convertido en una importante fuente láser para aplicaciones LiDAR. Las fuentes láser de fibra tienen varias propiedades atractivas para su uso en sistemas LiDAR, incluyen buena calidad del haz, estrecho ancho de banda, versatilidad que permite la optimización independiente de la duración del pulso, frecuencia de repetición y forma de onda. Los láseres pulsados de fibra bombeados mediante diodos láser han obtenido mucha atención por sus varias ventajas, incluyendo buena calidad del haz, alta eficiencia, ligereza, bajo consumo de potencia y reducida generación de calor [9,10]. En sistemas LiDAR de imágenes 3D de alta resolución, la frecuencia de las fuentes láser deciden la velocidad de imagen, y la distancia de precisión detectable que depende de la potencia pico y del ancho del pulso.

Se informó de una fibra codopada con Erblio-Yterbio (EYDF) y un sistema amplificador de potencia de oscilador principal (MOPA) para aplicaciones LiDAR coherente con una etapa amplificadora de potencia y obtuvieron pulsos de 0.29 mJ y 100 ns con una frecuencia de 4 kHz [11].

Se introdujo un transmisor láser de fibra pulsado para LiDAR de imágenes 3D basadas en el espacio con una frecuencia de 100 kHz y un láser amplificado con una potencia de salida de 2.3W, que generó un ancho de pulso de 10 ns [10].

Se desarrolló un láser MOPA de fibra pulsado de una sola frecuencia, seguro para el ojo, para un sistema LiDAR viento de efecto Doppler con una frecuencia de 10 kHz y una duración del pulso de 500 ns [12].

También presentaron otro láser de fibra con configuración MOPA [13-17]. Los resultados muestran que el ancho de pulso y frecuencia no están optimizados para sistemas LiDAR de imágenes 3D de alta resolución. En [27], se presenta una fuente láser de fibra, monomodo basada en un MOPA para la generación de pulsos cortos seguros para el ojo con alta potencia de pico. Se obtienen pulsos de 1.2 ns, una potencia de pico de 7.6 kW y una frecuencia de 50 kHz. Este láser se usó como transmisor en un sistema LiDAR de imágenes 3D de alta resolución para lograr la función de imágenes en 3D y obtener resultados de laboratorio de digitalización de imágenes de los objetos espaciales. El láser proporciona una precisión en la distancia de aproximadamente 7.5 cm. Experimentos de largas distancias se están llevando a cabo actualmente.

4.1.2. Configuración experimental

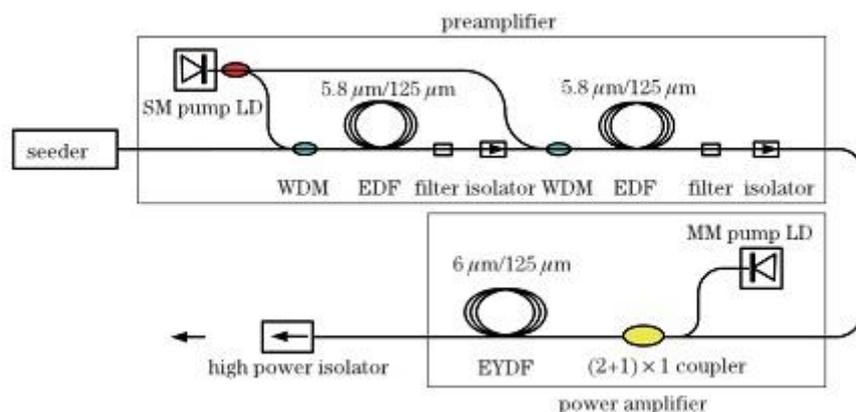


Figura 18: Configuración experimental de un sistema láser de fibra MOPA.

La Figura 18 muestra la configuración experimental de sistema MOPA de fibra. La fuente láser, es un láser semiconductor de realimentación distribuida, es directamente modulado para generar pulsos con una duración de 1.2 ns. Los pulsos pasan a través de tres etapas amplificadoras formadas por dos preamplificadores y un amplificador de potencia. Los preamplificadores están basados en una fibra dopada con erbio de un solo modo. Una fibra dopada con erbio 5.8/125 μm monomodo de 10

metros de largo con una apertura numérica de 0.23 y un pico de absorción de 980 nm de más de 3.0 dB/m se utilizan para cada etapa.

Los preamplificadores son bombeados por un diodo láser de onda continua que entrega una potencia 255mW y una longitud de onda de 976 nm. Un acoplador de fibra 40:60 divide el haz monomodo en dos.

El filtro paso banda de 1.6 nm de ancho de banda se utiliza para eliminar el ASE generado por el amplificador de fibra dopado con Erblio (EDFAs).

Un aislador se inserta entre dos amplificadores para mejorar el ruido. La fibra de doble revestimiento dopada con Erblio monomodo con un diámetro del núcleo de 6 μm y un diámetro exterior de la primera capa de 125 μm se usa en la tercera etapa del amplificador de potencia. El pico de absorción de la capa de revestimiento es 0.83 dB/m a 915 nm. El amplificador de potencia tiene una longitud óptima de 2.5 m. El diodo láser multimodo opera a una longitud de onda de 976 nm y la fibra de doble revestimiento es bombeada por un diodo láser a través de un combinador de fibra. El aislador de alta potencia se empalma en el lado de la salida del amplificador de fibra para disminuir la reflexión en el extremo de la fibra.

La fuente pulsada tiene una potencia de salida media de aproximadamente 4.2 kW, una frecuencia de 50 kHz y un ancho de pulso de 1.2 ns, con su correspondiente pico de potencia de 70 mW y un pulso de energía de 84 pJ. Los preamplificadores pueden llegar a una potencia de salida media de 46 mW, con su correspondiente pico de 0.76 kW, lo que conduce a calcular que el pulso amplificado tiene una ganancia mayor que 40dB.

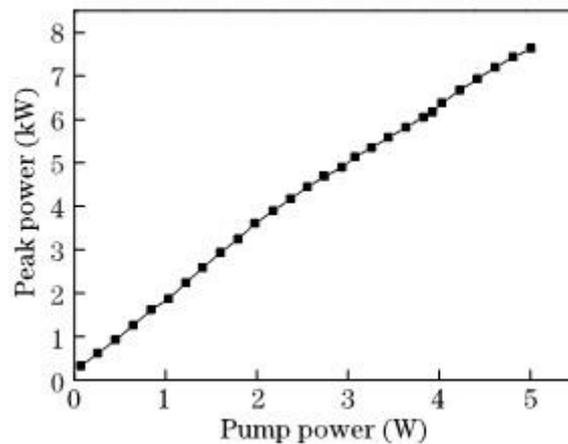


Figura 19: Salida potencia de pico versus potencia de bombeo con una frecuencia de 50 kHz y un ancho del pulso de 1.2 ns.

La Figura 19 muestra la dependencia de la potencia de pico de salida del amplificador principal sobre las potencias de bombeo. La potencia de salida media se midió usando un medidor de potencia. La frecuencia y el ancho de banda fueron anotados usando un fotodetector de 10 GHz y un osciloscopio de 6 GHz respectivamente. La potencia de pico y energía del pulso se calcularon a partir de la potencia media de salida de 458 mW a una potencia de bombeo de 5W con un ancho de pulso de 1.2 ns y una frecuencia de 50 kHz correspondiente al pulso de energía de 9.16 μ J. La salida del pulso láser es monomodo (TEM_{00}), el cual es un factor importante para la precisión en la distancia de sistemas LiDAR de imagen 3D de alta resolución.

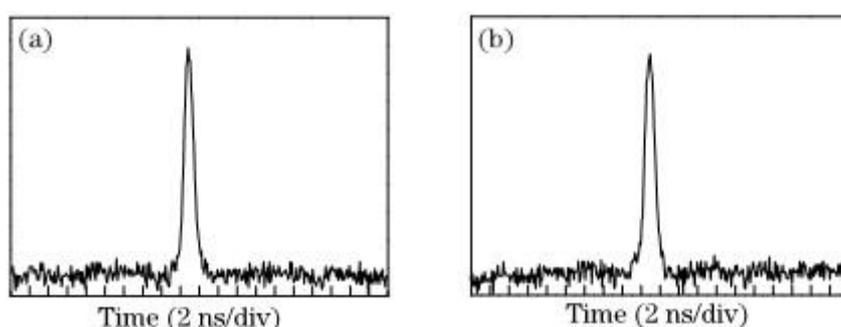


Figura 20: Salida de la forma temporal del pulso a 50 kHz de frecuencia de la (a) fuente láser y (b) amplificador de potencia.

La Figura 20 muestra la forma temporal de la salida de la fuente láser y el amplificador de potencia a 50 kHz de frecuencia.

Efectos no lineales limitan el incremento en el pico de potencia de los sistemas amplificadores en fibra. Así, el incremento del área de modo y la disminución en la longitud de onda de la fibra dopada son métodos efectivos para reducir los efectos no lineales. Sin embargo, el incremento del área de modo de la fibra podría incrementar el número de modos a la salida del láser.

Por otra parte, las altas concentraciones dopadas en la fibra se usan para contrarrestar la disminución del pico de potencia asociado con un menor valor de ganancia de potencia de saturación en un amplificador más corto. Una fibra de doble revestimiento codopada con Er:Yb de 2.5 m de longitud con un pico de absorción de la capa revestida de 0.83 dB/m a 915 nm se usa en el amplificador de potencia para lograr limpiar los altos picos de potencia de salida de los pulsos.

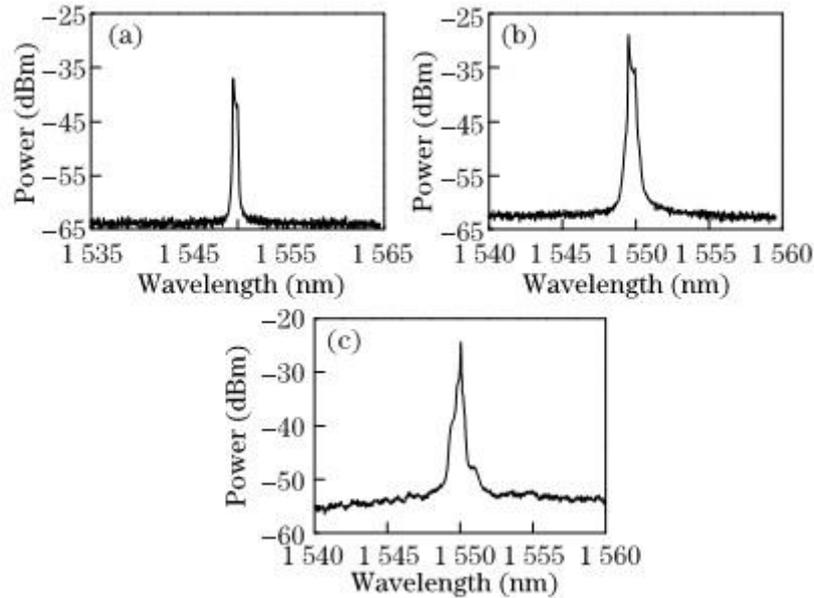


Figura 21: Respuesta espectral de (a) fuente láser, (b) preamplificador, y (c) amplificador de potencia.

La Figura 21 muestra la respuesta espectral de la fuente láser, preamplificador, salida del amplificador de potencia a 50 kHz de frecuencia y 1.2 ns de ancho de pulso. La relación señal-ruido (SNR) del espectro de salida fue mayor que 20 dB a una frecuencia de 50 kHz. Por otra parte, los pulsos espectrales amplificados no presentan ninguna deformación de impulsos y los pulsos de salida se mantuvieron limpios.

El láser de fibra, de nanosegundos, monomodo y de alta potencia de pico se usó como transmisor láser para un sistema LiDAR de imágenes 3D y juega una papel vital en la mejora del rendimiento del sistema LiDAR. El sistema LiDAR con láser pulsado, modo detección incoherente usa un láser pulsado de fibra como fuente láser, detecta objetos mediante el uso del APD y adopta un espejo escáner rotativo óptico-mecánico de objeto espacial para obtener resultados de imágenes 3D.

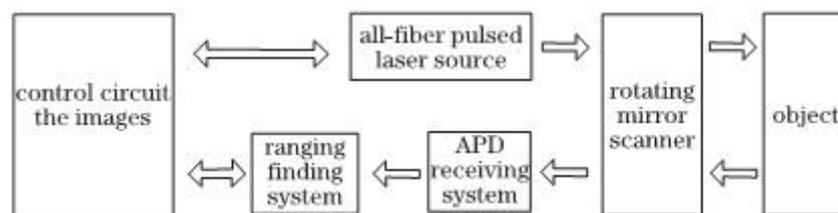


Figura 22: Configuración experimental del sistema Lidar de imagen 3D.

La Figura 22 muestra la configuración experimental del sistema LiDAR de imágenes 3D.

4.1.3. Resultados experimentales

La resolución del sistema LiDAR de imágenes 3D de alta resolución depende del pico de potencia de la fuente láser. El aumento del pico de potencia del láser puede mejorar el eco del pico de potencia del detector APD cuando la resolución se incrementa, mientras que la disminución en el ancho del pulso puede mejorar la potencia del láser. Sin embargo, el ancho del pulso es limitado por el correspondiente ancho de banda del APD. Un ancho de pulso menor que 1 ns disminuye la eficiencia del APD y afecta el rango de precisión detectable del sistema LiDAR. La frecuencia de la fuente láser se relaciona con la velocidad de formación de imágenes. La velocidad de formación de imágenes y resolución de cada imagen deciden la mínima frecuencia. Un pixel se obtiene por promedio de un conjunto de 10 pulsos de la salida láser para mejorar la precisión y lograr la detección de la débil señal de baja potencia.

En base a la fuente láser de fibra, el sistema LiDAR de imágenes 3D de alta resolución logró su función de imágenes en 3D y produjo resultados de análisis de imagen de objetos espaciales a la distancia detectable de 5 m. El experimento de precisión en el alcance se llevó a cabo en el laboratorio y los resultados mostraron la distancia de precisión alcanzable de $\approx 7.5\text{cm}$.

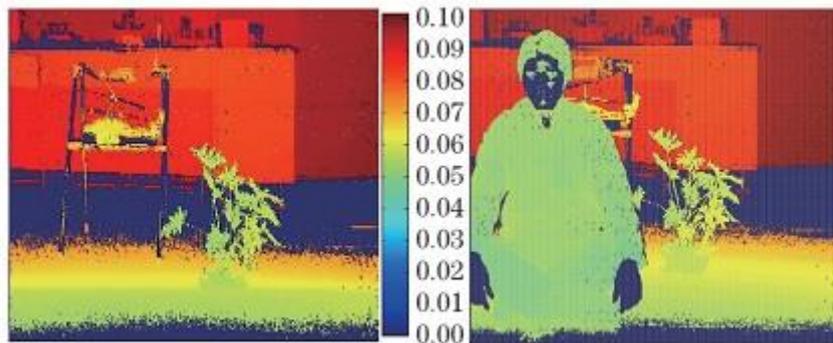


Figura 23: Laboratorio de exploración de resultados de las imágenes cromáticas del objeto espacial a 5m.

La Figura 23 muestra las imágenes cromáticas 2D que se trazan a partir de los datos escaneados, en el que los diferentes colores corresponden a las diferentes distancias.

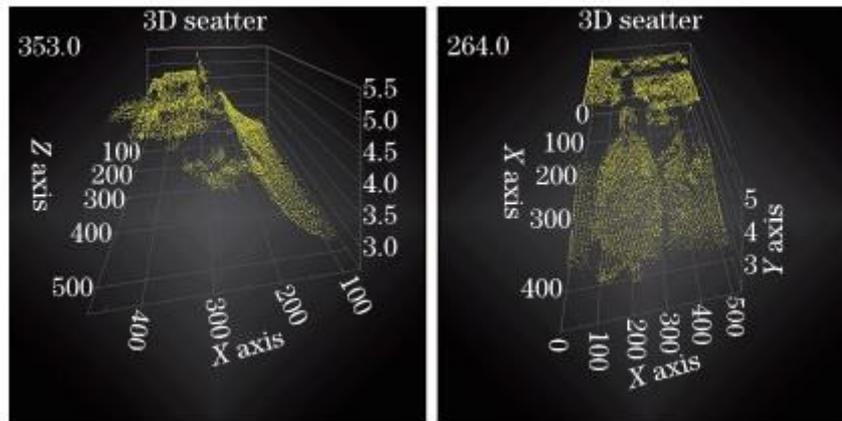


Figura 24: Laboratorio de exploración de resultados de imágenes 3D del objeto espacial a 5m.

La Figura 24 muestra los resultados de imágenes 3D, información de la distancia, información de la intensidad de alta calidad, el cual se obtiene sincrónicamente.

Los resultados de imágenes 3D de objetos estáticos, tales como seres humanos, ordenadores, plantas, y esquinas de la pared, muestran que las imágenes 3D son similares a la forma real de estos objetos. Los objetos lisos producen un fuerte reflejo en el espejo que puede ser difícil de detectar.

El pulso de salida láser monomodo efectivamente redujo el ángulo de salida de la radiación láser del transmisor. Los resultados muestran que el pulso de la fuente láser con 1.2 ns de ancho de pulso y 7.6 kw de potencia pico a una frecuencia de 50 kHz pueden satisfacer los requisitos de los sistemas LiDAR de imágenes 3D de alta resolución.

4.2. Perfiles atmosféricos de vapor de agua usando un sistema LiDAR de láser de fibra.

Un sistema LiDAR de láser de fibra eficiente, ligero y compacto se ha desarrollado para medir perfiles de vapor de agua en la atmósfera de la Tierra y de Marte.

La línea del láser se compone de una fibra de bombeo de Tm:Germanio mediante dos diodos de 792 nm. El láser de fibra transmite a aproximadamente 0.5mJ en Q-conmutado a 5Hz y se puede ajustar a las líneas próximas a 1.94 μ m con ancho de banda de \approx 20pm. Un telescopio receptor ligero se construyó de resina de fibra de carbono con una lente de Fresnel de 30 cm y un avanzado detector APD de HgCdTe. Este sistema ha hecho mediciones atmosféricas preliminares.

4.2.1. Introducción

El vapor de agua es el gas activo más radiativo en la atmósfera, captura y transporta energía dentro de la atmósfera. Esto influye en los patrones climáticos y en última instancia, el clima. La concentración de vapor de agua es altamente variable tanto en el tiempo como en el espacio. Principalmente reside en la capa límite, por tanto la toma de medidas se dificulta. Sin embargo, para predecir el futuro climático con precisión significativa, una multitud de medidas de vapor de agua en tiempo real necesitan ser tomadas como función de la altitud. Estos datos sirven como entrada para modelos atmosféricos para predecir los resultados del tiempo con precisión que puede resultar en graves consecuencias económicas si no son correctos.

Las estaciones meteorológicas deberían incluir un LiDAR de vapor de agua, que debería determinar continuamente la concentración vertical de vapor de agua en la atmósfera en la proximidad de la estación. LiDAR no solo puede dar la concentración de vapor de agua sino también medir los perfiles de aerosol, alturas de la capa límite y nubes. Estos datos son evaluados por modelos meteorológicos de entrada. El LiDAR emplearía la técnica de absorción diferencial (DIAL) [18]. Hay un exceso de longitudes de absorción de vapor de agua que se podrían emplear. Sin embargo, es prudente emplear longitudes de onda en la región del espectro segura para el ojo para evitar interferencias con los aviones.

Esta misma tecnología se podría emplear en Marte para determinar perfiles atmosféricos de vapor de agua. Aunque la concentración de vapor de agua es muy baja, todavía hay suficiente vapor para formar nieblas, neblina en el suelo, heladas y nubes, el intercambio de vapor de agua entra la capa hielo del polo norte y la atmósfera hace que la capa aumente o disminuya con las estaciones. Existe un interés

a largo plazo sobre si hay vida o no en Marte hoy en día en cualquier forma. La vida como la conocemos en el planeta requiere agua. En consecuencia, hay un gran interés en determinar la concentración y extensión de agua presente hoy en día en la superficie y la atmosfera de Marte. La técnica DIAL se podría utilizar para medir los procesos que intercambian la distribución de vapor de agua y así indicar donde existen fuentes y sumideros de vapor de agua. Esto conduciría a lugares donde se podría encontrar vida en Marte.

Sensores por detección remota de vapor de agua en la atmósfera terrestre y en Marte se pueden lograr mediante el empleo de la técnica DIAL. Esto requiere un láser que es ajustable en torno a un pico de absorción de vapor de agua característico. El láser DIAL transmite un par de pulsos láser. El primer pulso se ajusta al pico característico de absorción y el segundo se ajusta a una longitud de onda lejana procedente de la absorción de vapor de agua. Algunas partículas de aerosol en la atmósfera transmiten de nuevo al receptor DIAL. Mediciones en condiciones atmosféricas áridas o mediciones sobre alcances cortos se benefician probando las características de vapor de agua.

Tales características de absorción son encontradas en la proximidad de $1.9 \mu\text{m}$. El espectro de absorción es estrecho, por lo que el ancho de banda espectral de la fuente debe ser mucho más estrecho que las características de absorción del vapor de agua. Para obtener mejores resultados, el par de pulsos láser deberían estar temporalmente próximos con el fin de sondear el mismo volumen de la atmósfera. Para alcances cortos, solo se requiere una pequeña cantidad de energía láser. Por otro lado, para un buen rango determinado de mediciones, la longitud del pulso Q-switched debe ser corto, menor de 100ns.

Tanto aplicaciones en Marte como en la Tierra requieren un sistema láser que sea robusto, fiable, ligero, eficiente y con larga vida útil. Un láser de fibra con tales características, ajustable a un estrecho ancho de línea podría cumplir las diferentes condiciones exigidas para estas aplicaciones. Este láser necesitaría un estrecho ancho de línea, ser rápidamente ajustable al fuerte pico de absorción del vapor de agua, tener alta frecuencia de repetición, ser altamente eficiente y especialmente tener poco peso para la aplicación en Marte y además, ser resistente para el despliegue independiente. Los láseres de fibra han avanzado hasta el punto que son candidatos potenciales para su uso en sistemas LiDAR que se pueden implementar fácilmente y con bajo costo para aplicaciones de perfiles atmosféricos.

Este [28], se describe un láser de fibra de Tm:Germanio, ajustable a $1.9\mu\text{m}$, acoplado a un receptor LiDAR de poco peso para que pueda cumplir los requisitos anteriores para un sistema DIAL de vapor de agua. Para demostrar la aplicabilidad de Tm:Germanio para detección remota, este material se fabricó con un láser de fibra de doble revestimiento y un diodo de bombeo [19]. La selección de Tm:Germanio se debe a su fiabilidad, eficiencia y puesta a punto.

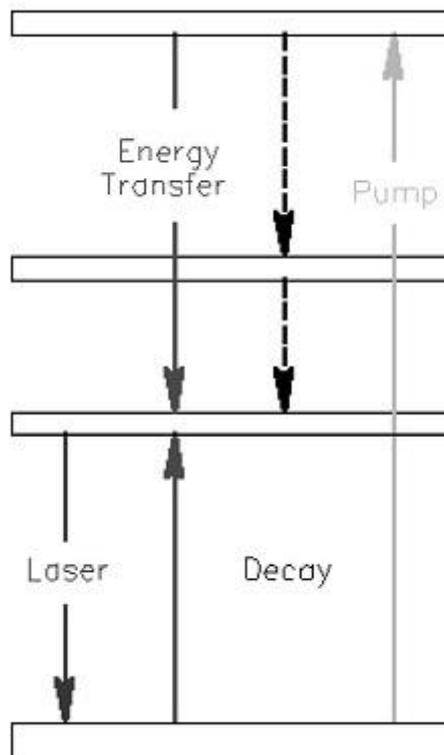


Figura 25: Diagrama de energía de Tulio.

4.2.2. Configuración experimental

Un foto y un diagrama esquemático del láser de fibra de Tm:Germanio se muestra en la Figura 26. La fibra se dopa con un 4% de Tulio y tiene un diámetro del núcleo de $35\mu\text{m}$. La longitud de la fibra es 35cm y se bombea con dos diodos de $0.792\mu\text{m}$ que se centran en el revestimiento interior de la fibra con un par de lentes.

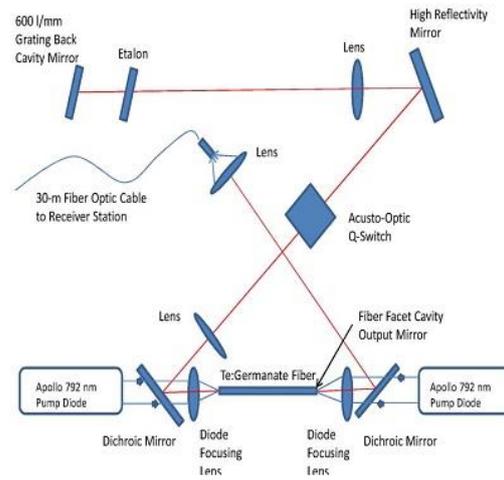
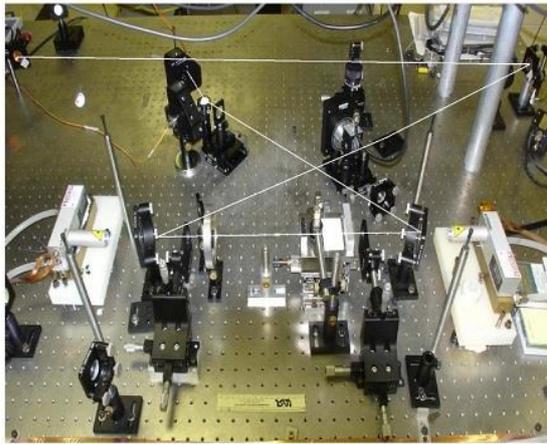


Figura 26: Foto y esquema del transmisor láser de fibra de Tm:Germanio.

Los espejos dicróicos permiten la radiación láser infrarroja. El resonador láser está formado por la cara de la fibra parcial y las redes de difracción altamente reflectantes. La cavidad es larga para permitir expandir el haz y por lo tanto se estrecha la línea espectral del láser. Un Q-switch acusto-óptico permite al resonador ser pulsado, resultando típicamente pulsos de 5Hz de 110 ns de longitud. La señal de salida es entonces focalizada en una fibra multimodo de salto de índice de 30 metros con un núcleo de $50\mu\text{m}$ y una AN de 0.22. La fibra permite la radiación láser pulsada para ser dirigida fuera del laboratorio y dentro de la atmosfera de pruebas.

La longitud de onda ajustable se logra girando la red de difracción de la función de vapor de agua y a continuación girando el etanol de modo que este próximo al pico de reflexión de la red de difracción. La longitud de onda y el ancho de banda podrían ser controlados conjuntamente por el interferómetro. Hay numerosas líneas de vapor de agua con suficientes picos de absorción en la región de $1.9\mu\text{m}$ como se muestra en la Figura 27 [20]. De esta manera, la longitud de onda DIAL se eligió para estar en la línea $1.9430\mu\text{m}$.

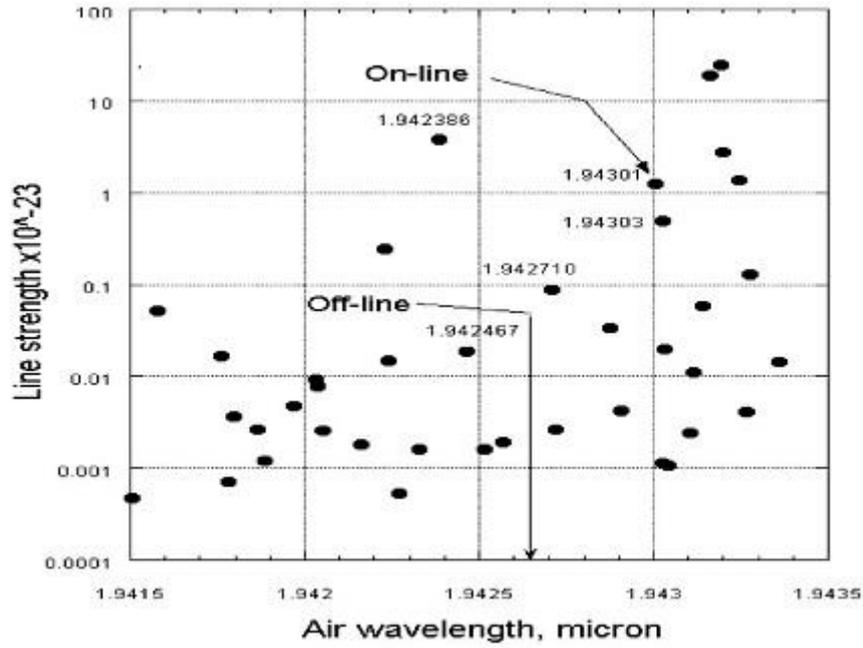


Figura 27: Longitudes de onda "on-line" y "off-line".

4.2.3. Resultados experimentales

La Figura 28 muestra la salida láser de 5 Hz Q-conmutado como función de la corriente de bombeo de absorción para la longitud de onda DIAL en la línea (1.94301 μm) y fuera de la línea de absorción (1.94265 μm). Como era de esperar se tiene más absorción en la primera línea.

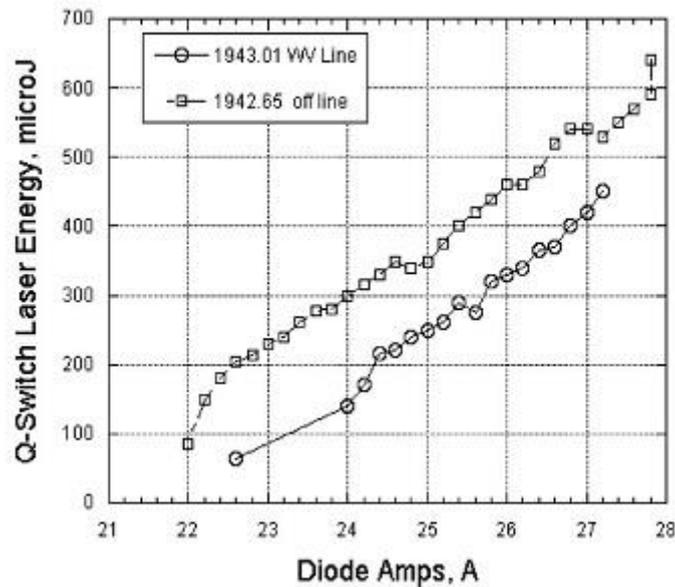


Figura 28: Salida del láser pulsado versus corriente del diodo.

Este láser presenta una frecuencia del pulso de 5Hz, pero mayores velocidades son ventajosas para la reducción de ruido y para el promedio de la señal LiDAR atmosférica.

La Figura 29 muestra la energía de bombeo del diodo y la energía de la salida láser a 1.94 μ m en función de la frecuencia del pulso. Como se ve en la figura, la energía láser disminuye a medida que la frecuencia del pulso aumenta. Sin embargo, la energía óptica del diodo de bombeo permanece constante, esto refleja que la fibra es cada vez menos eficaz debido al calentamiento. Modificaciones futuras deberán incorporar una placa de metal refrigerado que mantendrá fría la fibra sólo con el ambiente.

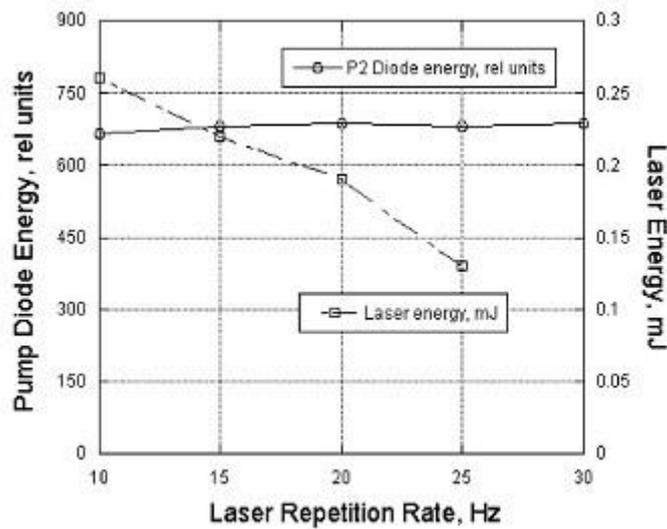


Figura 29: Energía óptica del diodo y energía de salida del láser versus frecuencia del pulso.

La Figura 30 muestra el efecto del incremento de energía del diodo de bombeo sobre la energía Q-switched y la longitud del pulso. Cuando la potencia de bombeo incrementa, la energía de la señal del láser incrementa, pero la longitud del pulso disminuye. La energía del pulso nominal fue 0.3 mJ con una longitud de 140 ns.

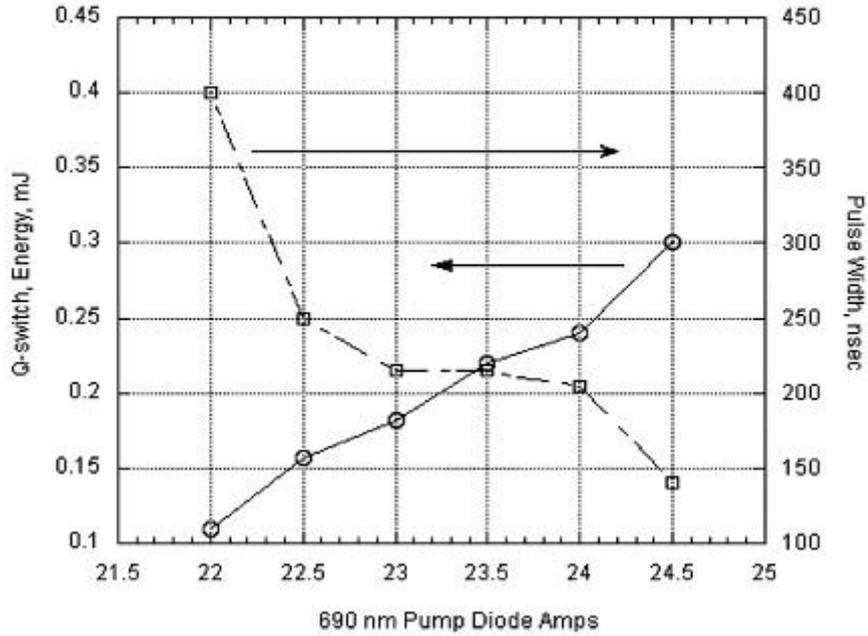


Figura 30: Energía de la salida láser Q-conmutada y longitud del pulso versus corriente del diodo en amperios.

Una característica útil del sistema láser de fibra es la capacidad para obtener dos pulsos Q-switched durante un pulso del diodo. Esto se demuestra en la Figura 31.

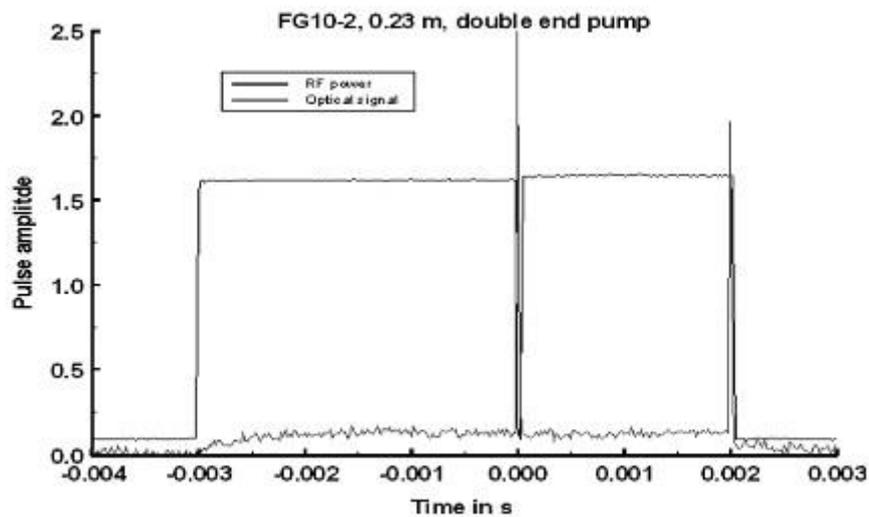


Figura 31: Demostración de dos pulsos Q-conmutados procedentes de un sólo pulso del diodo.

La Figura 32 demuestra la salida láser en modo normal a $1.94 \mu\text{m}$ en función de la energía de bombeo del diodo en mJ. Presenta una pendiente de eficiencia de 0.28. El diodo eléctrico tiene una eficiencia óptica de 0.5 y junto con una pendiente de eficiencia del láser de 0.28, resulta una pendiente total eficiente de 0.14 para el láser en modo normal.

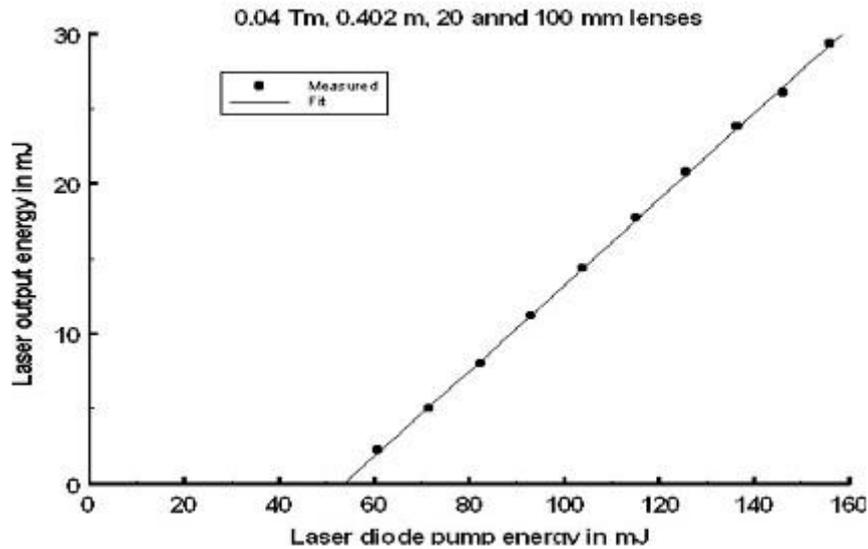


Figura 32: Energía de la salida láser en modo normal versus energía de entrada del diodo demostrando una eficiencia de la rampa de 0.28 y una eficiencia cuántica de 1.75.

La eficiencia de la pendiente es algo más baja para el láser Q-conmutado. La eficiencia podría mejorar la reducción de las pérdidas del resonador y mejorar el acoplamiento del diodo láser a la fibra.

4.2.4. Sistema receptor lidar

El sistema receptor LiDAR se compone de una lente Fresnel de plástico de 30 cm de diámetro trabajando a 2 μm y dando como resultado una transmisión del 85%.

En la Figura 33 se muestra el sistema receptor, donde la lente se pega al cono de fibra de carbono epoxy, proporcionando una estructura rígida al telescopio. El sistema también se compone de un fotodetector APD de HgCdTe que se ajusta al punto focal de la lente Fresnel, que da como resultado un campo de visión de 1.6 merad. El filtro de 1.94048 se desplaza en frente del detector cuando se necesita bloquear la entrada solar. Para bajar la temperatura del detector a 239K, este sistema lleva incorporado un refrigerador termoeléctrico. El voltaje se ajusta para proporcionar al detector una ganancia de 50 a un máximo voltaje de 18 v a una temperatura de 239K.

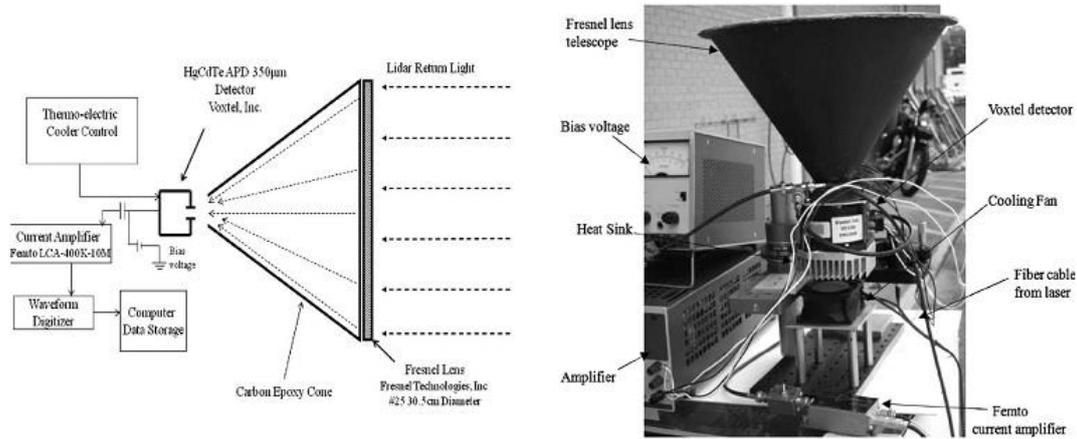


Figura 33: Diagrama esquemático y foto del sistema receptor LiDAR.

La salida del detector se acopla a un amplificador de corriente, a continuación a un digitalizador de longitud de onda de 12 bits que promedian los retornos LiDAR y almacenan los resultados en un ordenador portátil.

La gran ligereza y forma compacta lo hacen apropiado para desplazarse por lugares remotos. Este receptor se ha usado para hacer medidas atmosféricas LiDAR preliminares.

Los 30 m de cable de fibra se sacan del laboratorio y se unen al haz de expansión del telescopio que se compone de una longitud de lente focal de 25.4 mm dando lugar a un haz de ≈ 1.5 mm de diámetro. Cuando se ajusta correctamente, la divergencia del haz es de ≈ 1.0 mrad, algo menos que el campo de visión del telescopio.

La energía láser transmitida es baja, aproximadamente $50 \mu\text{J}$. La frecuencia del pulso es de 5Hz, y la señal retorno LiDAR se promedia para 100 disparos.

La Figura 34 muestra el pulso láser que sale de la fibra y el correspondiente rango atmosférico al cuadrado del retorno LiDAR de la longitud de onda “off-line”.

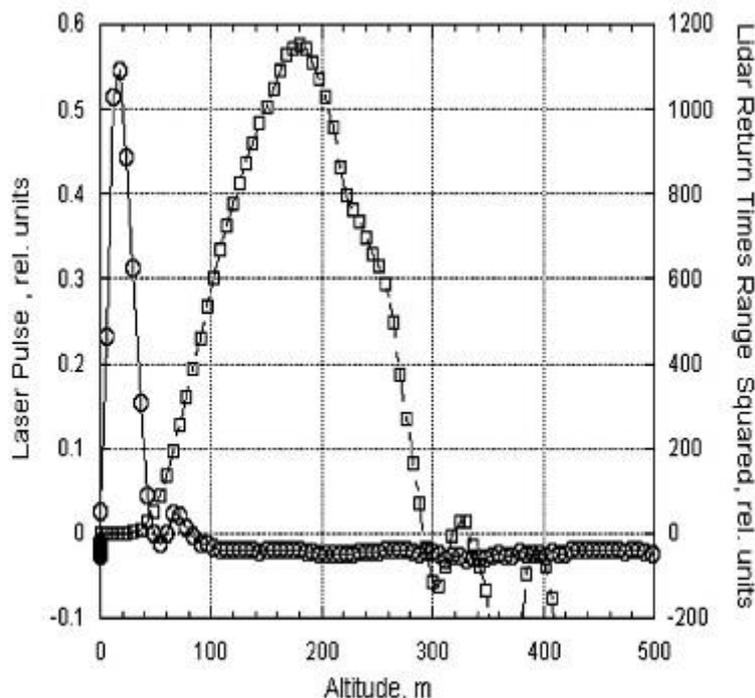


Figura 34: Gráfico del retorno LiDAR atmosférico y el correspondiente pulso láser entrando en la atmósfera.

El pulso láser sale del haz expandido del telescopio y entra en la atmósfera. El correspondiente retorno LiDAR se ve después del pulso láser y continúa aumentando a medida que el pulso láser entra en el campo de visión del telescopio. A 180 m, el haz láser está completamente en el campo de visión del telescopio, y a partir de entonces el receptor registra la dispersión atmosférica hasta 300m donde la señal retorno iguala al ruido del sistema. Al incrementar la energía láser sustancialmente puede registrarse mayor altitud de retorno.

4.2.5. Conclusión

Se ha desarrollado un nuevo sistema LiDAR de vapor de agua para aplicar en la atmósfera terrestre y en Marte.

El sistema se compone de un transmisor ligero, compacto y eficiente que utiliza un láser de fibra de Tulio:Germanio con tecnología Q-switched que lo convierte en pulsado a $1.9 \mu\text{m}$ de longitud espectral que produce pulsos de 0.5 mJ de energía a 5 Hz de frecuencia. El láser se bombea mediante dos diodos de 792 nm y se ajusta mediante redes de difracción consiguiendo una eficiencia del láser del 14%.

El receptor de este sistema es una lente Fresnel de plástico de 30 cm de diámetro construido de fibra de carbono epoxy que lo hace muy ligero. El receptor se

compone además de un detector HgCdTe que trabaja detectando el retorno de la dispersión atmosférica. Usando la técnica de retorno DIAL.

Este sistema LiDAR podría utilizarse en múltiples lugares de la Tierra para medir con precisión el perfil de vapor de agua y mejorar predicciones atmosféricas. Además de utilizarse en Marte para determinar pozos de vapor de agua que deriven en posibles pistas de si hay vida en Marte.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

1.1. Conclusiones

El presente proyecto Fin de Carrera se ha comenzado con el estudio del conjunto LiDAR, sus aplicaciones, usos, ventajas y componentes de este sistema. A continuación, se ha seguido con el estudio del láser de fibra, su funcionamiento básico, sus propiedades y características.

Este proyecto se ha dividido en tres partes:

La primera parte es una explicación sobre la palabra LiDAR y todo lo que conlleva. Se ha pretendido informar sobre esta tecnología, dando datos e información actual.

La segunda parte es un estudio sobre el principal componente transmisor de la tecnología LiDAR, el láser de fibra, que se ha convertido en los últimos años en el láser más utilizado para esta tecnología por su bajo coste y sencilla fabricación, además de su bajo mantenimiento. Dar a conocer técnicas de pulsado que se usan para aplicaciones LiDAR.

La tercera parte se ha investigado sobre dos artículos, uno muy reciente sobre el láser de fibra en la aplicación LiDAR de imágenes 3D de alta resolución, sus componentes, características, configuraciones y diseño.

Y otro artículo de la NASA® sobre un láser de fibra para una aplicación LiDAR de medición de vapor de agua en la Tierra y en el planeta Marte, como finalidad su uso para predecir la climatología en la Tierra y encontrar zonas con agua en Marte.

1.2. Líneas futuras

Una de las posibles líneas futuras podría ser un estudio para una aplicación LiDAR que encaje en alguna de las titulaciones de la Universidad de Cantabria.

Por ejemplo, estudiar e implementar en el laboratorio del GIF un láser de fibra modulado para una aplicación de LiDAR concreta. Ver su viabilidad, sus prestaciones así como una optimización de su funcionamiento en cuanto a energía del pulso, tamaño y frecuencia.

Bibliografía

1. KILMER, J.; IADEVAIA, A.; YIN, Y. Laser sources for lidar applications. *EnProc. of SPIE Vol. 2012*. p. 837912-1.
2. CARIOU, Jean-Pierre; AUGERE, Béatrice; VALLA, Matthieu. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology. *Comptes Rendus Physique*, 2006, vol. 7, no 2, p. 213-223.
3. QUINTELA, MAngeles, et al. Stabilization of dual-wavelength erbium-doped fiber ring lasers by single-mode operation. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2010, vol. 22, no 6, p. 368-370.
4. J. E. Koroshetz, in Proceedings of OFC OFJ4 (2005).
5. C. Hu, “Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D imaging lidar”, PhD. Thesis (National University of Defense Technology, 2005).
6. J. J. Zayhowski and A. L. Wilson Jr., *Appl. Opt.* 46, 5951 (2007).
7. R. C. Stoneman and A. I. R. Malm, in Proceedings of CLEO 2004 CThZ6 (2004).
8. W. Chen, X. Hou, and J. Bi, in Proceedings of CLEO Pacific Rim (2007).
9. C. Gao, S. Zhu, W. Zhao, Z. Cao, and Z. Yang, *Chin. Opt. Lett.* 7, 611 (2009).
10. Y. Feng, J. Zhou, S. Du, and W. Chen, in Proceedings of CLEO Pacific Rim (2009).
11. V. N. Philippov, C. Codemard, C. Alegria, J. K. Sahu, J. Nilsson, and G. N. Pearson, *Opt. Lett.* 29, 259 (2004).
12. Y. Liu, J. Liu, and W. Chen, *Chin. Opt. Lett.* 9, 090604 (2011).
13. V. N. Philippov, J. K. Sahu, C. Codemard, W. A. Clarkson, J. N. Jang, J. Nilsson, and G. N. Pearson, *Proc. SPIE* 5335, 1 (2004).
14. B. Peng, H. Zhang, M. Gong, and P. Yan, *Laser Phys.* 19, 2019 (2009).
15. G. Sobon, P. Kaczmarek, A. Antonczak, J. Sotor, A. Waz, and K. M. Abramski, *Appl. Phys. B* 105, 721 (2011).

16. M. Savage-Leuchs, E. Eisenberg, A. Liu, J. Henrie, and M. Bowers, Proc. SPIE 6102, 610207 (2006).
17. W. Shi, E. B. Petersen, M. Leigh, J. Zong, Z. Yao, A. Chavez-Pirson, and N. Peyghambarian, Opt. Express 17, 8237 (2009).
18. C. Weitkamp, ed., LIDAR Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere(Springer, 2005).
19. B. M. Walsh, N. P. Barnes, D. J. Reichle, and S. Jiang, "Optical properties of Tm³⁺ ions in alkali germanate glass," J. NonCryst. Solids 352, 5344–5352 (2006).
20. The hitran database, <http://www.hitran.com>.
21. G. M. Williams, M. A. Compton, and A. S. Huntington, "Highspeed photon counting with linear-mode APD receivers," Proc. SPIE 7320, 732012 (2009).
22. M. B. Reine, J. W. Marciniak, K. K. Wong, T. Parodos, J. D. Mullarkey, P. A. Lamarre, S. P. Tobin, K. A. Gustavsen, and G. M. Williams, "HgCdTe MWIR back-illuminated electroninitiated avalanche photodiode arrays," SPIE Optics and Photonics Meeting, San Diego, California, 13–17 August, 2006.
23. http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_laser
24. <http://www.clpu.es/en/science-and-education.html>
25. <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser>
26. <http://www.tecnicyterritorio.com/2012/04/lo-mas-basico-que-deberias-saber-sobre.html>
27. YUN, Jian, et al. High-peak-power, single-mode, nanosecond pulsed, all-fiber laser for high resolution 3D imaging LIDAR system. *Chinese Optics Letters*, 2012, vol. 10, no 12, p. 121402-121402.
28. DE YOUNG, Russell J., et al. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system. *Applied optics*, 2010, vol. 49, no 4, p. 562-567.

