

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial
Mención en Navegación Aérea

Modelado y simulación de arquitecturas
FMCW-LIDAR

Autor: Luis Miguel Prados Palacios

Tutor: Joaquín Granado Romero

**Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial
Mención en Navegación Aérea

Modelado y simulación de arquitecturas FMCW-LIDAR

Autor:

Luis Miguel Prados Palacios

Tutor:

Joaquín Granado Romero

Profesor Titular

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Resumen

En este trabajo se presentan y simulan tres arquitecturas de una nueva tecnología en auge dentro de los sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Dichos sistemas LIDAR emplean la transmisión de un haz de láser hacia un blanco a fin de medir la distancia a la que éste se encuentra.

Hasta el momento, los sistemas LIDAR más extendidos hacen uso de una transmisión de pulsos de luz, llamados LIDAR ToF (*Time of Flight*). Estos LIDAR presentan ciertas debilidades como la limitación en potencia transmitida para cumplir con la normativa vigente o la interferencia con otros sistemas LIDAR ToF.

Habitualmente se ha hecho uso del tiempo entre transmisión y recepción del haz de láser para calcular la distancia al blanco conociendo la velocidad de propagación (velocidad de la luz).

En cambio, en los últimos años ha surgido una nueva tecnología LIDAR que no utiliza el tiempo de propagación, llamada LIDAR FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*), en referencia a un láser de onda continua y una modulación FM de las que hace uso.

Esta tecnología viene a solventar algunos de los problemas del LIDAR ToF. Uno de ellos es la limitación en potencia ya que al tenerse un láser continuo, la potencia emitida puede ser mayor debido a que no se tiene la energía concentrada en un pulso breve.

También solventa el problema de la interferencia gracias a las arquitecturas coherentes donde se emplea una detección coherente. Gracias a esta detección, un LIDAR en cuestión sólo detectará su propia señal al permitir el uso de frecuencias de láser distintas.

En primer lugar, se definen estos sistemas LIDAR y se comparan con tecnologías similares para la medida de distancias utilizadas hasta el momento, por ejemplo, el RADAR (*Radio Detection and Ranging*). Éste último hace uso de una señal con frecuencias de radio, a diferencia del LIDAR, que hace uso de frecuencias de luz (longitudes de onda de 400 a 700 nm). A continuación se presenta el LIDAR FMCW, se explica su principio de funcionamiento y se compara con la mencionada tecnología LIDAR ToF.

Además, se hace un desarrollo matemático detallado de las ecuaciones que rigen cada una de las tres arquitecturas LIDAR FMCW (LIDAR FMCW con detección directa, con detección coherente heterodina y con detección coherente homodina). Posteriormente se implementan mediante el software de simulación óptica Optisystem.

Adicionalmente, se implanta un sistema de co-simulación entre Optisystem y Matlab lanzando desde Matlab un proceso de Windows que ejecuta Optisystem. Posteriormente, se utilizan comandos de Windows predefinidos por Optisystem para modificar los parámetros dentro de éste, lanzar simulaciones, almacenar y procesar resultados.

Haciendo uso de este sistema se realizan simulaciones de las distintas arquitecturas, incluyendo simulaciones iterativas donde se hacen variar ciertos parámetros y se analizan sus resultados, obteniendo valores aproximados de rango de medida y resolución.

Por último, se comentan los pros y contras de cada arquitectura de los cuales se pueden remarcar la gran resolución de las medidas y la robustez de las arquitecturas coherentes ante condiciones no ideales de reflectividad del blanco, pérdidas en la atmósfera, etc. Además, se tiene el mayor rango de medida de las arquitecturas coherentes respecto a la detección directa para condiciones iguales.

Abstract

In this project, three architectures of a new technology in boom within LIDAR (*Light Detection and Ranging*) systems are presented and simulated. These LIDAR systems use the transmission of a laser beam to a target in order to measure the distance to which it is located.

So far, more widespread LIDAR systems make use of a light pulse transmission, called LIDAR ToF (*Time of Flight*). These LIDAR have certain weaknesses such as the power limitation transmitted to comply with current regulations or interference with other LIDAR ToF systems.

The time between laser beam transmission and reception has usually been used to calculate the distance to the target knowing the speed of propagation (speed of light).

In contrast, in recent years a new LIDAR technology has emerged that does not use propagation time, called LIDAR FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*), referring to a continuous wave laser and an FM modulation of which it makes use.

This technology solves some of the problems of the LIDAR ToF. One of them is the limitation in power since having a continuous laser, the emitted power can be greater because you do not have the energy concentrated in a short pulse. It also solves the problem of interference thanks to coherent architectures where consistent detection is employed. Thanks to this detection, a certain LIDAR will only detect its own signal by allowing the use of different laser frequencies.

Firstly, these LIDAR systems are defined and compared with similar technologies for measuring distances used so far, for example RADAR (*Radio Detection and Ranging*). The latter makes use of a signal with radio frequencies, unlike LIDAR, which makes use of light frequencies (wavelengths from 400 to 700 nm).

The LIDAR FMCW is presented below, its operating principle is explained and compared with the aforementioned LIDAR ToF technology. In addition, a detailed mathematical development is made of the equations that govern each of the three architectures LIDAR FMCW (LIDAR FMCW with direct detection, with heterodyne coherent detection and with homodyne coherent detection).

They are then implemented using the Optisystem optical simulation software.

In addition, a co-simulation system is implemented between Optisystem and Matlab launching from Matlab a Windows process that runs Optisystem. Windows commands predefined by Optisystem are then used to modify the parameters within it, launch simulations, store and process results.

Using this system, simulations of the different architectures are performed, including iterative simulations where certain parameters are tuned and their results are analyzed, obtaining approximate values of measurement range and resolution.

Finally, the pros and cons of each architecture are commented of which you can highlight the great resolution of the measurements and the robustness of the coherent architectures under conditions not ideal of reflectivity of the target, losses in the atmosphere, etc. In addition, we have the greatest measurement range of coherent architectures with respect to direct detection for equal conditions.

Índice

| | |
|--|-----------|
| <i>Resumen</i> | I |
| <i>Abstract</i> | III |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 LIDAR | 1 |
| 1.2 RADAR vs LIDAR | 2 |
| 1.3 LIDAR de pulsos ToF (Time of Flight) | 2 |
| 1.4 Funcionamiento del LIDAR FMCW | 2 |
| 1.5 LIDAR de pulsos ToF vs FMCW | 3 |
| 1.6 Herramientas utilizadas: Optisystem y Matlab | 4 |
| 1.7 Objetivos | 5 |
| 2 LIDAR FMCW con detección directa | 7 |
| 2.1 Principio de funcionamiento | 7 |
| 2.2 Implementación en Optisystem | 11 |
| 2.2.1 Elementos comunes | 12 |
| Señal moduladora LFM | 12 |
| Láser y modulación óptica | 13 |
| Canal de transmisión | 14 |
| 2.2.2 Elementos propios de esta arquitectura | 14 |
| Fotodetector PIN | 14 |
| Multiplicador | 15 |
| Filtro de paso bajo | 15 |
| 2.3 Simulación | 15 |
| 2.3.1 Simulaciones iterativas | 18 |
| Barrido de distancia | 18 |
| Bucle anidado distancia-reflectividad | 21 |
| Bucle anidado distancia-pérdida atmosférica | 21 |
| 3 LIDAR FMCW con detección coherente heterodina | 27 |
| 3.1 Principio de funcionamiento | 27 |
| 3.2 Implementación en Optisystem | 28 |
| 3.2.1 Elementos propios de la arquitectura | 28 |
| Receptor balanceado | 28 |
| 3.3 Simulación | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1 | Simulaciones iterativas | 30 |
| | Barrido en distancia | 30 |
| | Bucle anidado distancia-reflectividad | 30 |
| | Bucle anidado distancia-pérdidas atmosféricas | 30 |
| 4 | LIDAR FMCW con detección coherente homodina | 33 |
| 4.1 | Principio de funcionamiento | 33 |
| 4.2 | Implementación en Optisystem | 33 |
| 4.3 | Simulación | 34 |
| 4.3.1 | Simulaciones iterativas | 34 |
| | Barrido de distancia | 34 |
| | Bucle anidado distancia-reflectividad | 34 |
| | Bucle anidado distancia-pérdida atmosférica | 35 |
| 5 | Conclusiones y líneas de trabajo futuras | 37 |
| | <i>Índice de Figuras</i> | 39 |
| | <i>Índice de Tablas</i> | 41 |
| | <i>Índice de Códigos</i> | 43 |
| | <i>Bibliografía</i> | 45 |

1 Introducción

1.1 LIDAR

LIDAR (del inglés, *LIght Detection And Ranging*), es una técnica para determinar la distancia a un objeto, transmitiendo un haz de láser, en ocasiones desde un avión, hacia un objeto y midiendo el tiempo que tarda la luz en regresar al transmisor [1].

Los primeros intentos de medir distancia mediante haces de luz se produjeron en la década de 1930 para estudiar la estructura de la atmósfera. En 1938, los pulsos de luz se utilizaron para determinar la altura de las nubes. Tras la invención del láser en 1960, se utilizaron por primera vez aviones como plataformas para el láser. Aunque no fue hasta 1980, tras la llegada del sistema de posicionamiento global (GPS) y las unidades de medidas inerciales (IMUs) cuando se consiguieron datos precisos gracias a un LIDAR [1].

En un LIDAR típico, un láser apunta hacia abajo desde la parte inferior de un avión e ilumina el suelo a unos 400 mil pulsos por segundo. Normalmente se utilizan láseres con longitudes de onda infrarrojas. El pulso de luz se refleja hacia el receptor en el avión. Los pulsos se reciben tanto por "retorno único", donde la luz es reflejada completamente por una superficie uniforme como el suelo: o por "múltiples retornos", por ejemplo, en un bosque donde se reciben múltiples reflexiones provenientes de ramas, hojas, suelo, etc. La distancia del avión al objeto es igual a la mitad del tiempo entre transmisión y recepción multiplicado por la velocidad de la luz en dicho medio [1].

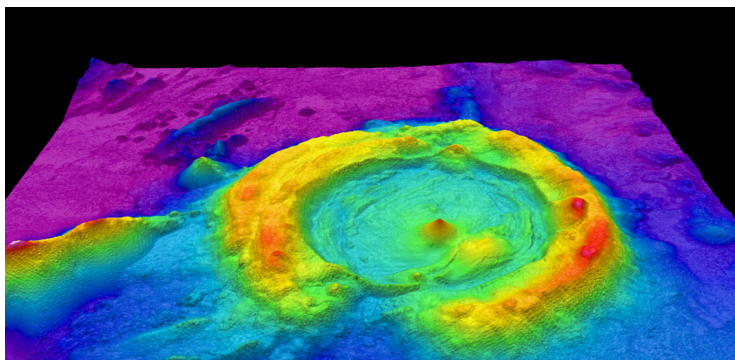


Figura 1.1 Mapa en 3D generado mediante LIDAR [2].

Los LIDAR se han utilizado también en aplicaciones embarcadas en satélites y aplicaciones terrestres. Los sistemas LIDAR espaciales utilizan láseres mucho más potentes dada la mayor distancia que debe viajar la luz [1].

Gracias a su precisión en tareas de mapeado de la superficies, los LIDAR son muy útiles en topografía. También se puede utilizar para estudiar los bosques. Gracias al perfil de las múltiples

reflexiones se pueden determinar los tipos de árbol presentes. También se utilizan para estudiar océanos, con dos láseres emitiendo en distintas longitudes de onda: una de ellas es reflejada por la superficie del mar y otra por el lecho marino [1].

También se utiliza en un mercado en auge como es el de los coches autónomos (para su guiado) y se puede ver implementado en teléfonos móviles de última generación como en el iPhone 12.

En cuanto a electrónica de consumo, su utilización se está viendo incrementada en los últimos años como, por ejemplo, en robots de limpieza. Los robots de limpieza utilizan cada vez más los LIDAR para la navegación y la evitación de obstáculos. Las aspiradoras de algunas marcas pueden incluso identificar el tipo de obstáculo que encuentran y navegar mejor a su alrededor [3].

1.2 RADAR vs LIDAR

Los LIDAR basan su funcionamiento en el principio de funcionamiento del RADAR (del inglés, *Radio Detection And Ranging*), siendo denominado en ocasiones como "*Light RADAR*". Su principal diferencia radica en las características de la señal emitida, ubicada en el espectro de las ondas de radio para el RADAR y habitualmente en los infrarrojos en los LIDAR. Esto proporciona diferencias en su rendimiento como pueden ser [4]:

- La resolución: pudiendo conseguir mayor precisión con los sistemas LIDAR debido a la menor longitud de onda de su señal.
- El rango: los RADAR son capaces de medir distancias mayores a los LIDAR.
- El precio: el mayor desarrollo en la tecnología RADAR permite que su coste sea menor que un sistema LIDAR.
- Las condiciones de uso: el RADAR funciona mejor de noche y en condiciones nubosas. Además, determinadas longitudes de onda dentro del espectro infrarrojo utilizadas en LIDAR pueden encontrar interferencia con la radiación solar.

Por lo tanto, resulta más interesante un sistema LIDAR si se puede sacrificar un poco de rango con el fin de reconocer con mayor precisión los objetos que lo rodean (ésto explica su uso extendido en vehículos autónomos). Por otro lado, el RADAR es más útil si no se tiene interés en detectar con detalle el blanco pero se necesita un rango mayor de medida.

1.3 LIDAR de pulsos ToF (*Time of Flight*)

El funcionamiento de estos sistemas consiste en la emisión de pulsos de luz a una determinada frecuencia (cumpliendo unas especificaciones, por ejemplo, tiempo del pulso menor al doble del tiempo de propagación), de forma que, mediante la medida del tiempo desde la transmisión hasta la recepción se puede hallar la distancia al blanco como la mitad del producto de dicho tiempo por la velocidad de la luz.

1.4 Funcionamiento del LIDAR FMCW

El LIDAR FMCW, donde FMCW hace referencia a la modulación en frecuencia de un láser de onda continua (del inglés, *Frequency Modulated Continuous Wave*), debe su funcionamiento al tiempo de propagación de su señal. Como se ve acotado en la figura 1.2, la señal roja (recibida) tiene un desfase temporal Δt respecto a la señal azul (transmitida); puesto que, la frecuencia varía con el tiempo, la frecuencia de la señal recibida será distinta a la transmitida en cada instante (por ejemplo, una diferencia $\Delta f = f_{B1}$). Esta diferencia de frecuencias depende del desfase temporal entre la señales, y por tanto, de la distancia de medida. En el caso de un blanco móvil se puede

conocer también su velocidad en virtud del efecto Doppler, gracias a la variación de frecuencia Δf_D que produce en la señal reflejada. En los apartados 2.1, 3.1 y 4.1 se hace un desarrollo teórico más detallado que conduce a la expresión de f_{B1} y f_{B2} .

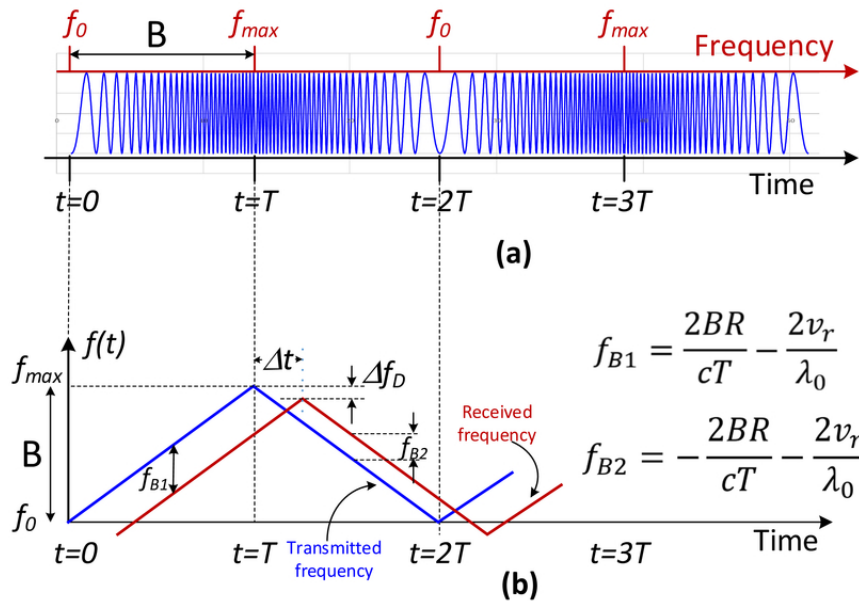


Figura 1.2 Esquema explicativo del funcionamiento del LIDAR FMCW. [5].

1.5 LIDAR de pulsos ToF vs FMCW

Hasta el momento gran parte de las aplicaciones de LIDAR hacían uso de un sistema LIDAR de pulsos por tiempo de vuelo, pero hay una serie de inconvenientes que han hecho surgir una nueva tecnología LIDAR como es la FMCW. Algunos de estos inconvenientes son:

- La interferencia solar: los sistemas LIDAR de pulsos ToF operan en longitudes de onda entre los 850 y 905 nanómetros, donde hay gran parte de radiación solar como se puede ver en la figura 1.3, que interfiere en la señal LIDAR. Por otro lado, los LIDAR FMCW operan en longitudes de onda de 1550 nm, con mucha menor radiación solar [6].

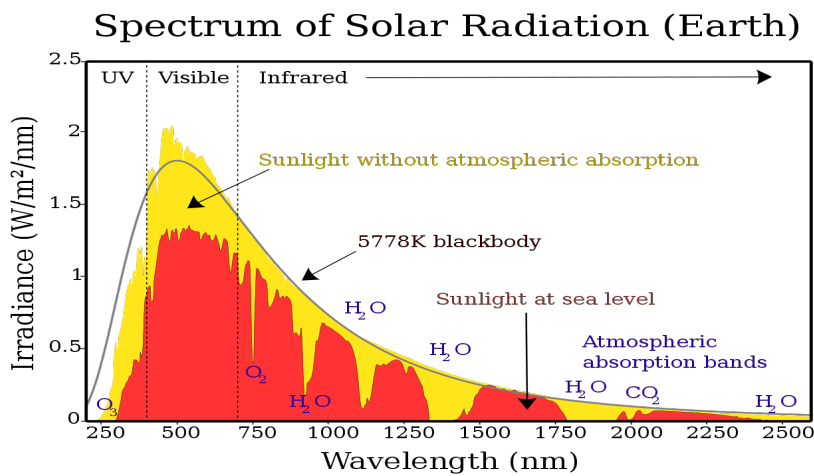


Figura 1.3 Espectro de la radiación solar [7].

- La seguridad ocular: en los LIDAR de pulsos el rango de funcionamiento es proporcional a la potencia del pulso emitido, por ello, debido a las limitaciones en materia de seguridad ocular, se ve limitado el rango de medida de dichos LIDAR. Por otro lado, en longitudes de onda de 1550 nm la seguridad ocular es 40 veces mejor, como se aprecia en la figura 1.4, extraída de la norma UNE-EN 60825 "Seguridad de los productos láser", donde se puede ver la máxima energía por unidad de superficie a la que se puede exponer el ojo humano en función del tiempo de exposición y la longitud de onda de la luz [6, 8].

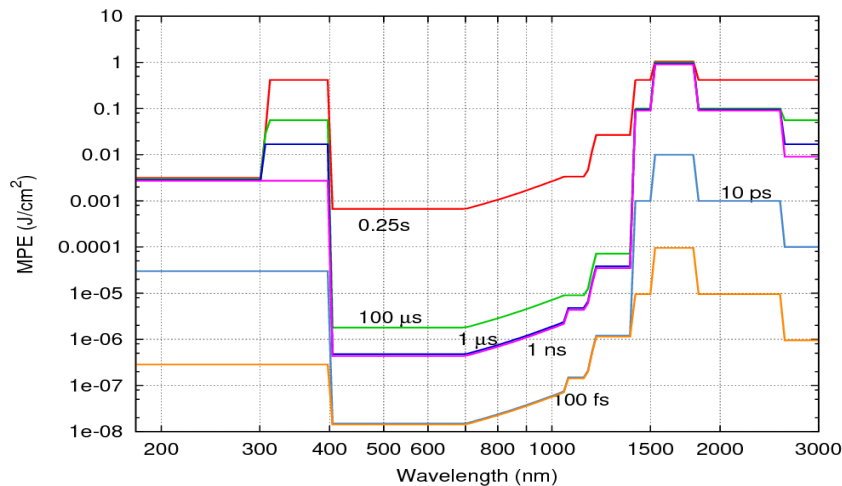


Figura 1.4 Exposición máxima permitida respecto a la longitud de onda [8].

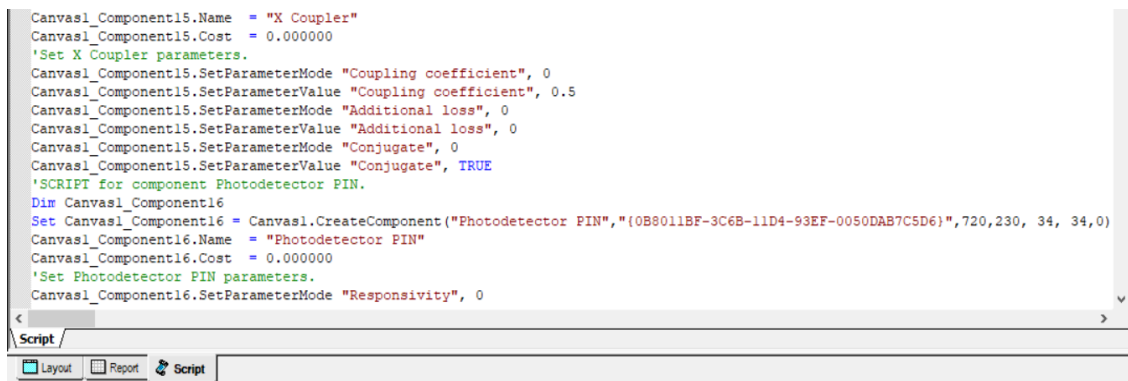
- La interferencia entre sistemas LIDAR: los LIDAR ToF pueden recibir pulsos de sistemas LIDAR cercanos y confundirlos con los suyos propios. Esto último ha sido solventado mediante técnicas de codificación, pero conlleva una pérdida de rango al dividir la potencia de la señal en múltiples pulsos. Por otra parte, algunas arquitecturas de LIDAR FMCW coherente solventan este problema mezclando la señal láser emitida con la recibida, proporcionando de esta manera una protección ante interferencias con otros sistemas [6].
- No es capaz de medir velocidades, a diferencia de algunas arquitecturas de LIDAR FMCW coherentes donde se puede un desplazamiento doppler proporcional a la velocidad del blanco [6].

1.6 Herramientas utilizadas: Optisystem y Matlab

OptiSystem es un paquete de simulación de sistemas de comunicación óptica distribuido por la compañía canadiense Optiwave Corporation. Es útil para el diseño, ensayo y optimización de prácticamente cualquier tipo de enlace óptico en la capa física de un amplio espectro de redes ópticas, desde sistemas de radiodifusión de vídeo analógico hasta cableado intercontinental. Simulador de nivel de sistema basado en el modelado de sistemas de comunicación de fibra óptica, OptiSystem posee un entorno de simulación potente y una definición verdaderamente jerárquica de componentes y sistemas [9].

Optisystem permite co-simulación con otros software como puede ser Matlab en el caso de este trabajo. Para ello, incorpora varios bloques, como por ejemplo el *Matlab Component*, que permite hacer llamada a un *script* de Matlab desde el entorno de Optisystem para, por ejemplo, incluir un modelo personalizado de un componente óptico. También es posible la operación en *modo script* mediante comandos como los que se pueden ver en la figura 1.5; es por esto, que en este trabajo se hace uso del modo *script* de Optisystem desde Matlab a través de la línea de comandos

de Windows de forma que podemos manipular cualquier parámetro de la simulación, lanzar el cálculo del proyecto, extraer resultados, etc; desde el entorno Matlab, lo cual proporciona una gran versatilidad en el procesamiento.



```
Canvas1_Component15.Name = "X Coupler"
Canvas1_Component15.Cost = 0.000000
'Set X Coupler parameters.
Canvas1_Component15.SetParameterMode "Coupling coefficient", 0
Canvas1_Component15.SetParameterMode "Additional loss", 0
Canvas1_Component15.SetParameterMode "Conjugate", 0
Canvas1_Component15.SetParameterMode "Conjugate", TRUE
'SCRIPT for component Photodetector PIN.
Dim Canvas1_Component16
Set Canvas1_Component16 = Canvas1.CreateComponent("Photodetector PIN", "{0B8011BF-3C6B-11D4-93EF-0050DAB7C5D6}", 720, 230, 34, 34, 0)
Canvas1_Component16.Name = "Photodetector PIN"
Canvas1_Component16.Cost = 0.000000
'Set Photodetector PIN parameters.
Canvas1_Component16.SetParameterMode "Responsivity", 0
```

Figura 1.5 Modo *script* de Optisystem.

1.7 Objetivos

Se establecen como objetivos del presente trabajo:

1. Consecución de un sistema de co-simulación entre Matlab y Optisystem.
2. Implementación y medida de distancia con diferentes arquitecturas de LIDAR FMCW en Optisystem.
3. Automatización a través de Matlab de dichas simulaciones.
4. Realización de simulaciones iterativas en las que se modifiquen parámetros de la simulación.
5. Análisis de los resultados, obteniendo valores aproximados de rango de funcionamiento, resolución de medida, etc.
6. Análisis de pros y contras entre las arquitecturas LIDAR bajo estudio.

2 LIDAR FMCW con detección directa

2.1 Principio de funcionamiento

El LIDAR FMCW con detección directa sigue un esquema como el que se muestra en la figura 2.3. En virtud de ello, se observa que los LIDAR FMCW hacen uso de una señal FM (modulada en frecuencia, del inglés *Frequency Modulated*) que modula el láser. En este caso se hace uso de una señal LFM (modulación lineal en frecuencia, en inglés *Linear Frequency Modulated*) considerado en la figura mencionada como un bloque subsistema cuya salida es dividida en dos. Esta señal LFM consta de una frecuencia que varía de forma lineal siguiendo una forma de rampa como se puede ver en la figura 2.1. A continuación se muestra un desarrollo matemático extraído de [10].

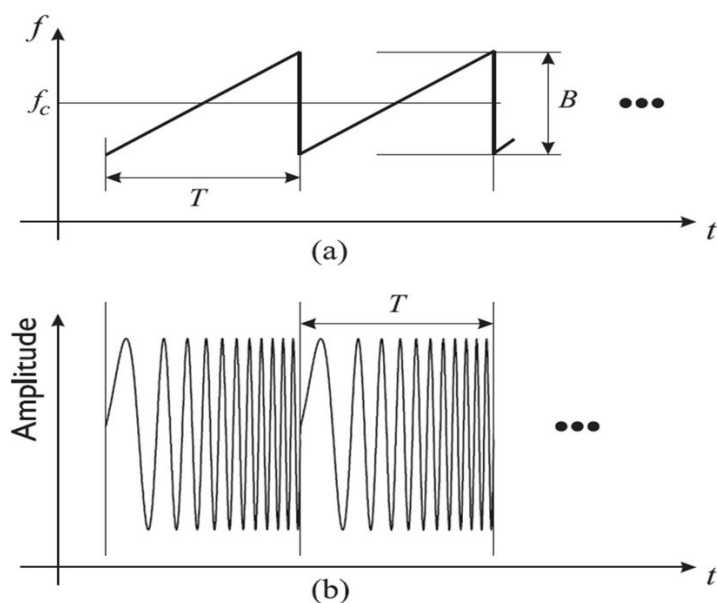


Figura 2.1 Frecuencia de la señal moduladora respecto al tiempo (a) y amplitud de la señal moduladora respecto al tiempo (b) [11].

Para modular el láser se utiliza un modulador Mach-Zehnder cuya función de transferencia es la siguiente:

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} = \cos\left(\varphi_o + \frac{\pi S(t)}{2v_\pi}\right) \quad (2.1)$$

Donde E_{in} y E_{out} son los campos eléctricos de entrada y salida, v_π es el voltaje necesario para llevar la función de transferencia de potencia óptica del mínimo al máximo, φ_o la fase inicial

controlada por el *bias* del modulador y $S(t)$ es la mencionada señal LFM cuya expresión es:

$$S(t) = A_c \cos \left(2\pi f_{start} t + \frac{\pi B}{T_m} t^2 \right) \quad (2.2)$$

Donde A_c es la amplitud de la señal LFM, f_{start} es la frecuencia de inicio, B es el ancho de banda de la modulación y T_m el periodo de la rampa. La expresión de la señal modulada depende del punto de funcionamiento del modulador que, para el caso de receptores no coherentes es el punto de cuadratura.

Se establece el mencionado *bias* en 0.5, de ésta forma se tendría un voltaje en el modulador óptico de $v = \frac{v_\pi}{2} = \frac{1}{2}$ puesto que la señal eléctrica de entrada al modulador está normalizada entre 0 y 1 voltio ($v_\pi = 1$ voltio) y por lo tanto, se opera en el punto de transmisión en cuadratura, como se puede ver en la figura 2.2.

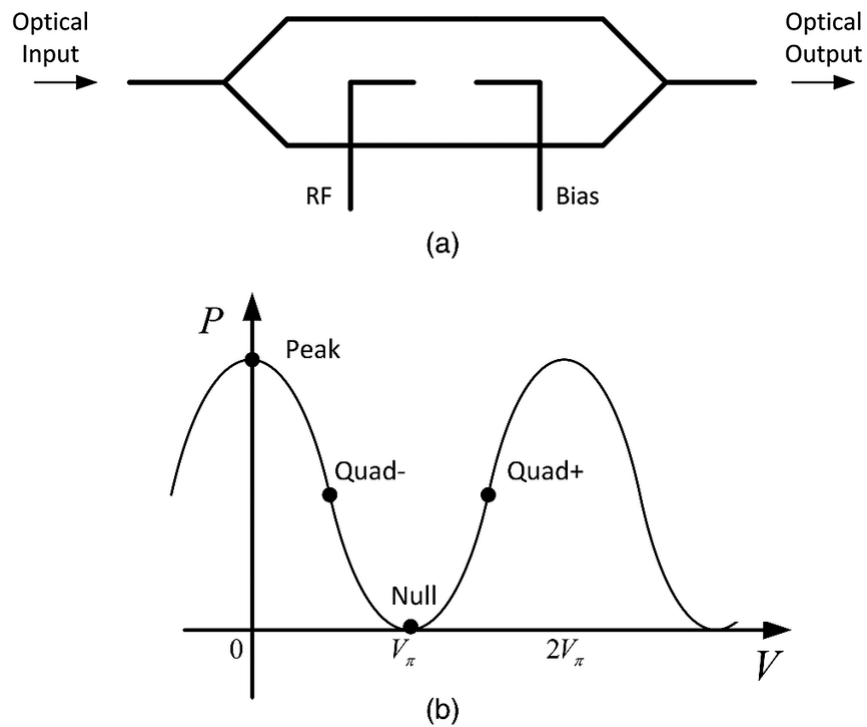


Figura 2.2 Esquema de un modulador óptico Mach-Zehnder (a) y curva de transmisión de un modulador óptico Mach-Zehnder (b) [12].

La expresión de la señal modulada (óptica) y transmitida será [10]:

$$E_{Tx}(t) = \sqrt{\frac{P_t}{2}} \left[1 + \frac{\beta}{2} \cos \left(2\pi f_{start} t + \frac{\pi B}{T_m} t^2 \right) \right] e^{(j\omega_o t + \theta_o(t))} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{\pi A_c}{v_\pi} \quad (2.4)$$

Donde ω_o es la frecuencia angular de la señal óptica transmitida, $\theta_o(t)$ es una componente de la fase transmitida que varía aleatoriamente y β es el índice de modulación que debe ser mucho menor a la unidad para evitar distorsión en la señal. Por otro lado, P_t es la potencia transmitida resultado de la amplificación de la señal a la salida del modulador, como se ilustra en la figura 2.3 ($P_t \neq P_{laser}$).

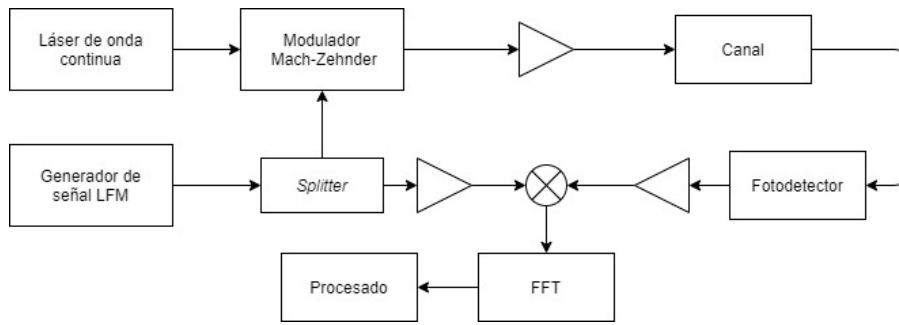


Figura 2.3 Esquema de un sistema LIDAR FMCW con detección directa.

La potencia de la señal reflejada por el blanco P_r se puede estimar de la siguiente manera:

$$P_r = P_t \frac{\rho_t D^2 \tau_{opt} \tau_{atm}^2}{4R^2} \quad (2.5)$$

Donde:

- ρ_t , es la reflectividad del blanco. Se trata de una propiedad del material que cuantifica su capacidad para reflejar energía radiante. Se define como la porción de potencia electromagnética incidente que es capaz de reflejar. En general es función de la longitud de onda (o frecuencia) de la luz, su polarización y el ángulo de incidencia. La dependencia de la reflectividad con longitud de onda se conoce como espectro de reflectividad [13].

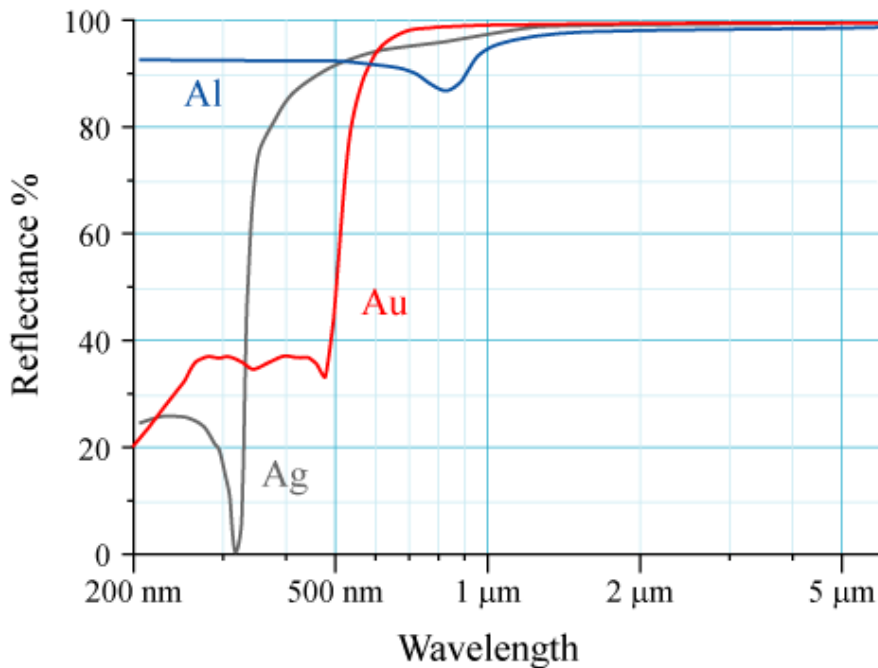


Figura 2.4 Espectro de reflectividad para aluminio, plata y oro con incidencia normal [13].

- τ_{opt} es la pérdida de potencia óptica en la transmisión producida en los medios de transmisión de emisor y receptor que consiste en la reducción de intensidad del haz de luz respecto a la distancia viajada a través de un medio de transmisión. Se utilizan unidades de dB/km. Debido a la alta calidad de los medios de transmisión modernos se suelen tener pequeñas pérdidas

[14]. Puesto que en este trabajo casi toda la propagación se da en la atmósfera, este parámetro se podrá aproximar a la unidad (no hay pérdida).

- τ_{atm} es el factor de pérdida atmosférica. Este parámetro es profundamente complejo y puede conllevar incluso estudios dedicados; en él se encuentran recogidos fenómenos de atenuación como la absorción de potencia por parte del oxígeno, del agua, dispersión Rayleigh, dispersión Mie, etc [15].

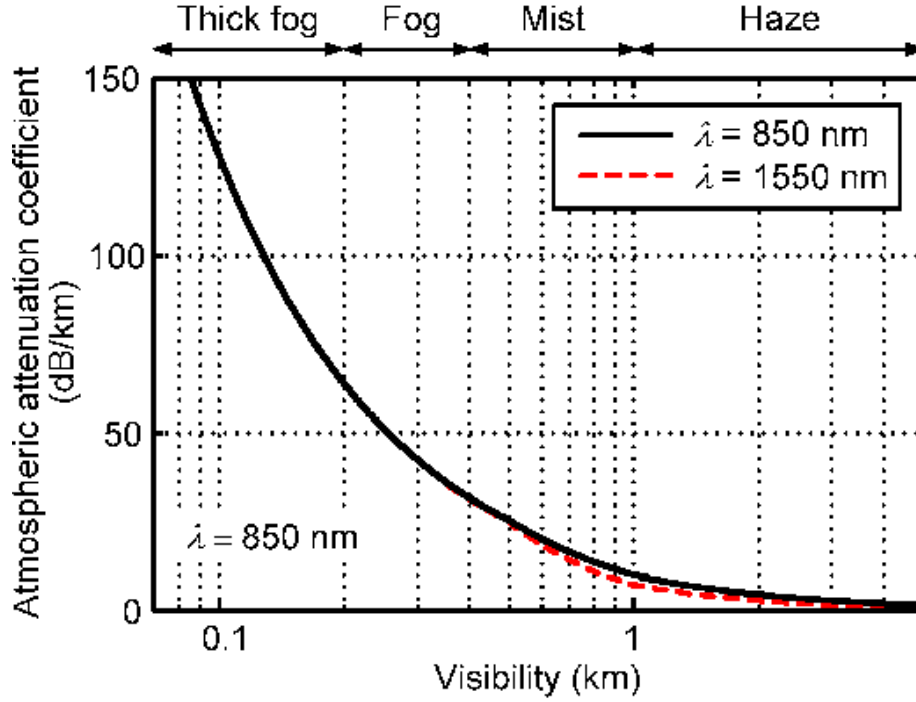


Figura 2.5 Pérdidas atmosféricas en distintas condiciones para señales con longitud de onda de 850 y 1550 nm (utilizada en nuestro LIDAR) [15].

- D es el diámetro de apertura de un receptor circular.
- R es la distancia a medir.

La señal reflejada en un blanco a una distancia R y con una velocidad v vuelve al receptor con un retraso de tiempo τ y un desplazamiento Doppler f_D donde:

$$\tau = \frac{2R}{c} \quad (2.6)$$

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.7)$$

Siendo $c = 3 \times 10^8$ m s⁻¹ la velocidad de la luz en el medio ($v_{aire} \simeq c$). Por lo tanto [10]:

$$E_{ref}(t) = \sqrt{P_r} \left[1 + \frac{\beta}{2} \cos \left(2\pi f_{start}(t - \tau) + \frac{\pi B}{T_m}(t - \tau)^2 \right) \right] e^{j(\omega_o + \omega_d)t + \theta_o(t)} \quad (2.8)$$

En la sección receptora el esquema de detección directa es relativamente simple porque la detección directa se basa en convertir potencia óptica en corriente a través de la responsividad \mathfrak{R} de un fotodetector.

De este modo, la señal óptica reflejada es detectada por un fotodiodo de responsividad \mathfrak{R} , de forma que la corriente de salida del mismo es:

$$i_{ph}(t) = \mathfrak{R}P_r \left(1 + \frac{\beta}{2} \cos \left[2\pi f_{start}(t - \tau) + \frac{\pi B}{T_m}(t - \tau)^2 \right] \right)^2 \quad (2.9)$$

Después se filtra la corriente para obtener la señal en banda base:

$$i_{ph}(t) = I_{dc} + i_{sig}(t) \approx \mathfrak{R}P_r \left[1 + \beta \cos \left(2\pi f_{start}(t - \tau) + \frac{\pi B}{T_m}(t - \tau)^2 \right) \right] \quad (2.10)$$

Donde I_{dc} y $i_{sig}(t)$ son respectivamente las corrientes continua y alterna detectadas ya que el modulador Mach-Zehnder opera en cuadratura. Posteriormente se amplifica esta señal y es multiplicada por la señal moduladora LFM (ecuación 2.2), como se ilustra en la figura 2.3, de forma que tras un filtro de paso bajo obtenemos la señal:

$$S_b(t) = A_{to} \mathfrak{R}P_r \beta \cos \left(2\pi f_{start} \tau - \frac{\pi B}{T} \tau^2 + 2\pi f_r t \right) \quad (2.11)$$

Donde A_{to} es la amplitud de la señal LFM y f_r es la frecuencia dependiente de la distancia de forma que:

$$f_r = \frac{2RB}{Tc} \quad (2.12)$$

Donde R es la distancia a medir, B es el ancho de banda de la modulación FM, T es el periodo de la señal LFM y c es la velocidad de la luz en el aire ($v_{aire} \simeq c$).

Esta componente de frecuencia se puede identificar en el espectro para obtener la distancia al blanco mediante la expresión 2.12. El funcionamiento de este sistema está subordinado a que se pueda distinguir la componente mencionada del fondo de ruido; dicho de otra manera, el rango de distancias que puede medir el sistema es proporcional al SNR (relación señal a ruido, del inglés *Signal to Noise Ratio*).

2.2 Implementación en Optisystem

En primer lugar se configuran aquellos parámetros que afectan de forma global al modelo. Éste es el caso de la ventana de tiempo (*Time Window*) que toma un valor de 1×10^{-4} s de forma que tendremos "10 pulsos rampa" (figura 2.6) en nuestra simulación.

Tabla 2.1 Parámetros del layout.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---------------------|------------|--------|
| Tasa binaria | 1280000 | Bit/s |
| Ventana de tiempo | 0.0001 | s |
| Tasa de muestreo | 5242880000 | Hz |
| Longitud de palabra | 128 | bits |
| Muestras por bit | 4096 | |

Pese a que en este trabajo se traten tres arquitecturas distintas, éstas comparten ciertos elementos cuya configuración es idéntica. Por ello, se procede a describir estos elementos transversales.

2.2.1 Elementos comunes

Señal moduladora LFM

La señal moduladora LFM (figura 2.1) es idéntica para todas las arquitecturas. Para su generación se hace uso de los siguientes componentes:

- *User Defined Bit Sequence Generator*: los parámetros a configurar dentro de este componente son el contenido de la secuencia de bits que será una secuencia de "unos" y por otro lado, el valor del *Bit Rate* a 1×10^5 bits/s de forma que tendremos un periodo T_m de 10 μ s
- *Saw-up Pulse Generator* (Generador de pulsos rampa): en este bloque debemos configurar el ancho de la rampa a 1 bit, el *bias* a 0 (no se tiene offset, es decir, en el punto "más bajo" de la rampa se tiene una amplitud nula) y la amplitud a 1, de forma que la señal a la salida de este bloque se puede ver en la figura 2.6.

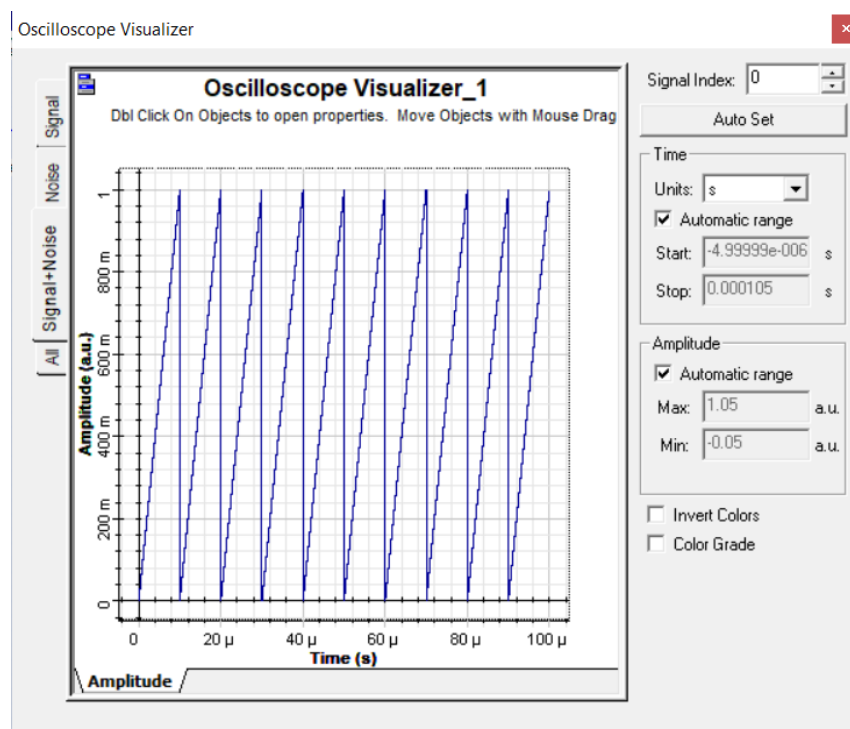


Figura 2.6 Señal a la salida del bloque *Saw-Up Pulse Generator*.

- *Electrical Frequency Modulator* (Modulador FM eléctrico): en este bloque configuramos la frecuencia de la portadora $f_c = 300$ MHz, el ancho de banda de la modulación $B = 300$ MHz, de este modo, la frecuencia de la señal modulada varía linealmente entre 300 MHz y 600 MHz como se puede ver en la figura 2.7.

Por otro lado, se establece el *bias* en 0.5 como se comentó previamente, la amplitud en 0.13 de forma que se mantiene el funcionamiento cercano al punto de cuadratura y a través de la ecuación 2.4 se tiene un índice de modulación pequeño como se quería.

- Ganancia eléctrica: se hace uso de una ganancia ideal de forma que, al mezclar la señal reflejada con la señal LFM, se eleve el nivel de potencia de la señal resultante.

A continuación, en la figura 2.7 se ilustra la señal LFM resultante en el dominio de la frecuencia.

Tabla 2.2 Configuración del modulador FM eléctrico.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|------------------------------|-------|--------|
| Frecuencia de portadora | 300 | MHz |
| Amplitud | 0.13 | |
| Bias | 0.5 | |
| Fase | 0 | grados |
| Ancho de banda de modulación | 300 | MHz |

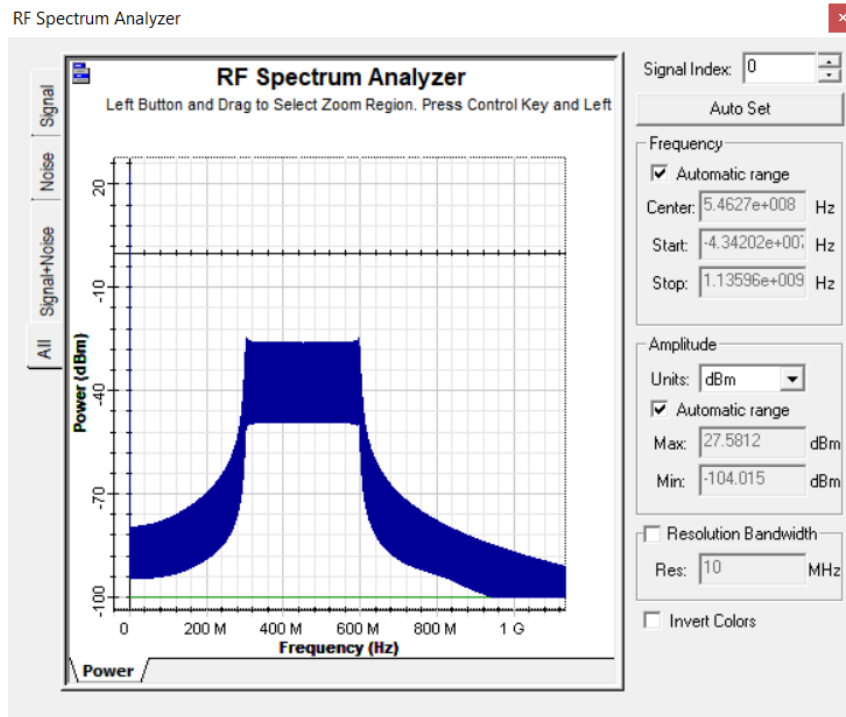


Figura 2.7 Espectro de la señal a la salida del modulador FM.

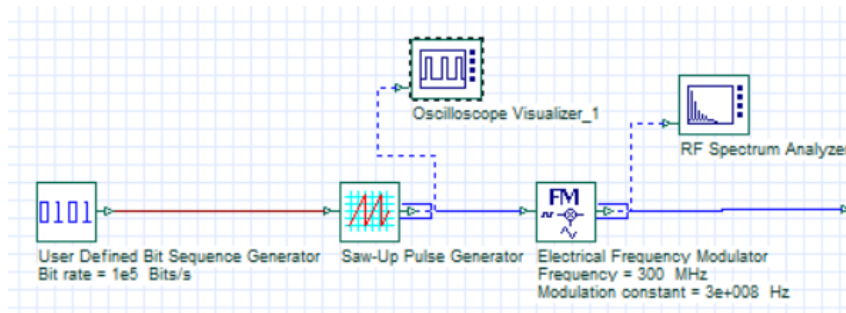


Figura 2.8 Subsistema generador de la señal LFM.

Láser y modulación óptica

- Láser: se hace uso de un láser de onda continua (CW), cuyos parámetros son anchura espectral $\Delta\lambda = 50$ kHz, longitud de onda $\lambda = 1550$ nm y potencia $P_{laser} = 7$ mW.
- Modulador Mach-Zehnder: por defecto. El valor de v_{π} es igual a 1 voltio.

- Amplificador óptico: se hace uso de un *Optical Amplifier* (según la nomenclatura de Optisystem) en un modo en el que el amplificador "selecciona" la ganancia necesaria de forma que a la salida del mismo se tenga un valor de potencia determinado, en este caso $P_i = 20$ dBm y una figura de ruido de 4 dB.

En virtud de la norma UNE-EN 60825, a este sistema le corresponde una clasificación de láser clase 3B (debido a que se tiene una potencia transmitida de 100 mW en 1550 nm de longitud de onda). Pese a corresponder a una clase de láser con un peligro elevado, esta clasificación es totalmente justificable puesto que se ha contemplado una posible aplicación aeroespacial.

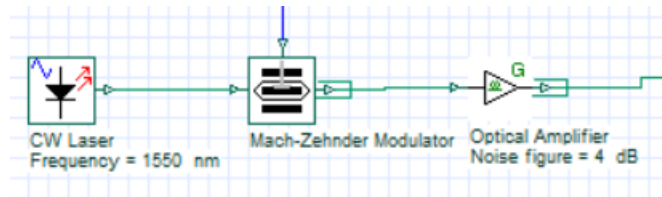


Figura 2.9 Láser y modulación óptica.

Canal de transmisión

Se simulan los efectos producidos en la propagación de la señal provocando en ésta un retraso temporal y una pérdida de potencia. Se lleva a cabo mediante los siguientes componentes:

- Atenuador óptico: provoca una determinada atenuación de potencia. Su valor es proporcional a la distancia al blanco, de forma que será un parámetro del problema. Se puede calcular mediante la expresión 2.5 y posteriormente expresarse en decibelios para introducirlo en el software.
- Retraso temporal: se provoca un retraso temporal en la señal de entrada de un valor $\tau = 2R/c$. Análogamente es un parámetro del problema.
- Circulador óptico: es un dispositivo que sólo permite a una señal salir por el puerto siguiente al puerto de entrada. Es decir, en un circulador de 3 puertos, la señal que entra por el puerto 1 sólo puede salir por el puerto 2, y la que entra por éste sólo puede salir por el puerto 3, como se ilustra en la figura 2.10 [16].

Se utiliza este componente para separar la señal que se transmite de la que se recibe. En este caso, puesto que es un dispositivo simulado y no hay una señal física que separar, no se utiliza.

- Amplificador óptico: se ha añadido un amplificador óptico en la recepción con un valor de ganancia de 13 dB y una figura de ruido de 4 dB.

2.2.2 Elementos propios de esta arquitectura

Fotodetector PIN

Se hace uso de un fotodetector PIN con una responsividad $\mathfrak{R} = 1$ A/W y un ruido térmico con una densidad de potencia de 3.2×10^{-23} W/Hz que ha sido estimada mediante la ecuación 2.13 [17].

$$\text{var}(i_L) = \left(\frac{4KT}{R_L} \right) \Delta f \quad (2.13)$$

Donde se ha supuesto una temperatura $T = 290$ K, ancho de banda $\Delta f = 600$ MHz y una carga de $R_L = 50 \Omega$.

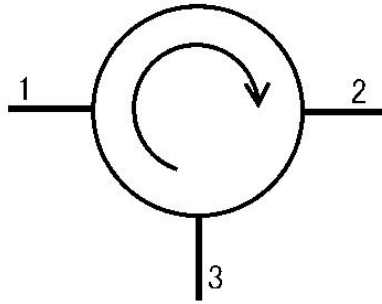


Figura 2.10 Esquema de un circulator [16].

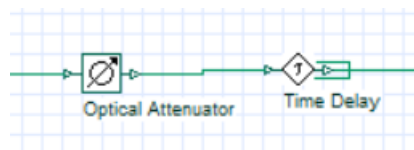


Figura 2.11 Canal de propagación simulado.

Multiplicador

Se hace uso de este bloque para mezclar en el dominio eléctrico la señal recibida y la señal LFM.

Filtro de paso bajo

Se utiliza para seleccionar las frecuencias inferiores a 250 MHz de forma que se reduce el tiempo de cálculo, sobre todo en cálculos iterativos, al reducir el tamaño en memoria de la señal.

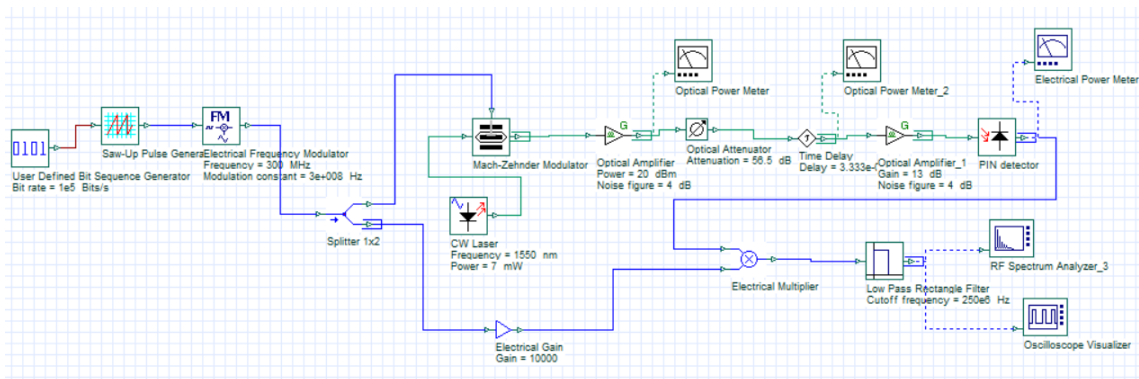


Figura 2.12 LIDAR FMCW con detección directa en Optisystem.

2.3 Simulación

Para ilustrar el funcionamiento de este LIDAR se lanza una simulación en Optisystem para una distancia teórica de 100 m. Para ello se hace uso del código 2.1 que sigue el algoritmo de la figura 2.13, para simulaciones no iterativas; donde se hace llamada a la función *directo* (código 2.2) desarrollada para este trabajo, proporcionándole como entradas los valores de distancia teórica, ancho de banda de la modulación B , ganancia del amplificador eléctrico, reflectividad y pérdidas atmosféricas. El resto de parámetros están definidos en el código 2.2 o en el modelo Optisystem, ya que no se ha contemplado variar sus valores, como sí se ha hecho con los mencionados.

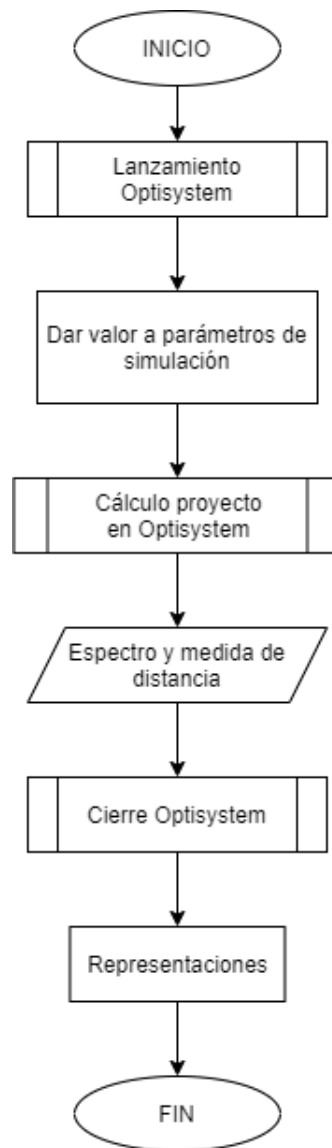


Figura 2.13 Diagrama de flujo del *script 2.1*.

Las funciones *startApp* y *closeApp* han sido desarrolladas para este trabajo y se encargan de abrir/cerrar un servidor que ejecute Optisystem, abra en él el proyecto que se desee y permita la transferencia de parámetros/resultados.

Códigos 2.1 Script de lanzamiento de la simulación de un LIDAR FMCW detección directa.

```

1  %Lanzar Optisystem
2
3  directory = strcat(pwd, '\directo.osd');
4  [optsys, Document]=startApp(directory);
5
6  %Parámetros
7
8  r=100;
9  reflectividad=1;
10 ganancia=1e4;
  
```

```

11 b=300000000;
12 taua=1;
13 config(1)=r;
14 config(2)=reflectividad;
15 config(3)=ganancia;
16 config(4)=b;
17 config(5)=taua;
18
19 %Cálculo
20 distancia=directo(config,Document);
21
22 %Cerrar optisystem
23 closeApp(optsys)

```

En el código 2.2 que sigue el algoritmo ilustrado en la figura 2.14 se hace uso de los parámetros de entrada y de los parámetros fijos para calcular, de acuerdo con las ecuaciones 2.5 y 2.6, la pérdida en decibelios y el retraso producidos en la propagación de la señal, para posteriormente, asignarle esos valores a los componentes correspondientes del modelo.

Por último se obtiene la señal de la ecuación 2.11, se calcula su espectro, se busca la componente máxima y mediante la ecuación 2.12, se obtiene la distancia buscada.

Códigos 2.2 Script cálculo y procesado LIDAR FMCW detección directa.

```

1  function [dist]=directo(config,Document)
2
3  %Argumentos de entrada
4  tauo=1;
5  d=0.15;
6  r=config(1);
7  rho=config(2);
8  ganancia=config(3);
9  b=config(4);
10 taua=config(5);
11
12 %
13 Canvas = Document.GetLayoutMgr.GetCurrentLayout.GetCurrentCanvas;
14
15 %Cálculo pérdida y retraso en la propagación
16 perd=(rho*d^2*tauo*taua^2)/(4*r^2);
17 perd=10*log10(perd);%atenuación en dB
18 perd=abs(perd);
19 delay=2*r/3e8; %retraso en segundos
20
21 %Componentes del modelo
22
23 Component1 = Canvas.GetComponentByName('Optical Attenuator');
24 Component2 = Canvas.GetComponentByName('Time Delay');
25 Component3 = Canvas.GetComponentByName('Electrical Frequency Modulator')
    ;

```

```

26 Component4 = Canvas.GetComponentByName('User Defined Bit Sequence
    Generator');
27 Component5 = Canvas.GetComponentByName('Electrical Gain');
28 Visualizer1 = Canvas.GetComponentByName('RF Spectrum Analyzer_3');
29 Visualizer2 = Canvas.GetComponentByName('Oscilloscope Visualizer');
30
31 Component1.SetParameterValue( 'Attenuation', perd );
32 Component2.SetParameterValue('Delay', delay );
33 Component5.SetParameterValue('Gain', ganancia );
34 Component3.SetParameterValue('Modulation constant',b);
35 fs1=Component4.GetParameterValue('Bit rate');
36 t=1/fs1; %periodo de la rampa
37
38 %Calculo
39 Document.CalculateProject( true , true);
40
41 %Procesado
42 graph1= Visualizer2.GetGraph( 'Signal + Noise Amplitude' ) ;
43 x_tiempo=cell2mat(graph1.GetXData(1));
44 y_tiempo=cell2mat(graph1.GetYData(1));
45 Fs = 1/mean(diff(x_tiempo)); % frecuencia de muestreo. Se ha comprobado
    que es constante
46 s2 = decimate(y_tiempo,2,'fir');
47 %s4 = decimate(s2,4,'fir');
48 Fend = 250e6;
49 f = [1:1e3:Fend];
50 [Px] = pwelch(s2, [], [], f, Fs/2);
51 es=10*log10(Px);
52 plot(f,10*log10(Px))%espectro
53 [m,k]=max(es(300:end));%Se busca la componente en fr
54 freq=f(k+299)%fr
55 dist=freq*10e-6*3e8/(2*b);%Cálculo de distancia
56 sentence2=sprintf('Hay una distancia al blanco de %.4f metros',dist);
57 disp(sentence2)
58 end

```

A continuación, se muestran los resultados de la simulación.

En este caso, se obtiene un valor de pérdida de 62.5 dB y un retraso de 6.66×10^{-7} s en la propagación.

En la figura 2.15, se ve claramente la componente buscada. Para esta simulación, se sitúa en $f_r = 20000001$ Hz de forma que, en virtud de la ecuación 2.12, se obtiene una distancia medida de $R = 100.0000$ m.

2.3.1 Simulaciones iterativas

Barrido de distancia

A continuación, se va a realizar una simulación iterativa haciendo un barrido en distancia. Para estas simulaciones se va a seguir un algoritmo como el ilustrado en la figura 2.17.

Puesto que, posteriormente, se van a representar errores de medida, se realizan varias simulaciones para una misma combinación de parámetros, de forma que se pueda manifestar el carácter aleatorio

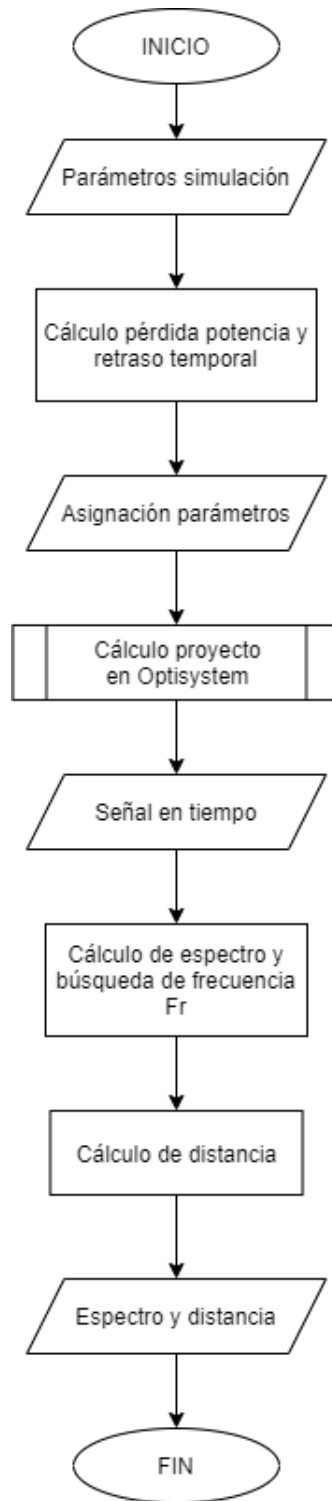


Figura 2.14 Diagrama de flujo del *script* 2.2.

del ruido térmico. Por lo tanto, se contemplan 2 bucles en el *script* aunque sólo se haga variar un parámetro.

En primer lugar, se ha realizado un barrido de tres distancias de 50 a 150 metros con incrementos de 50 metros y se han representado los espectros resultantes a fin de analizar su variación respecto a la distancia a medir $R_{teorica}$.

Los resultados se muestran en la figura 2.16, donde se puede apreciar, como cabría esperar viendo

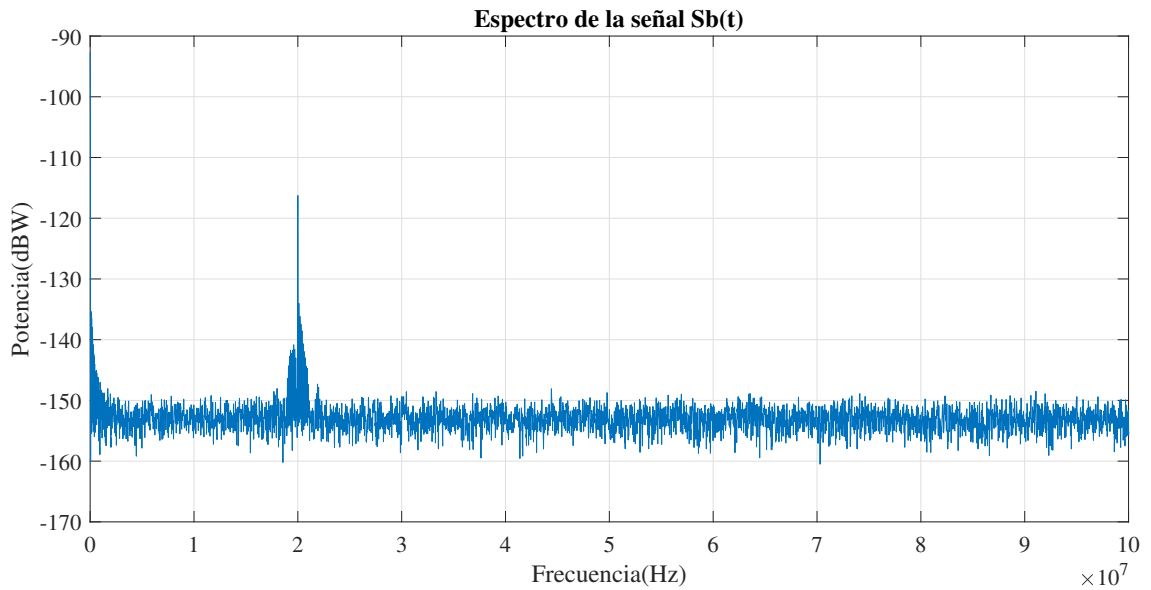


Figura 2.15 Espectro de la señal de medida.

la expresión 2.12, que la frecuencia f_r se desplaza a la derecha (a frecuencias mayores) conforme se aumenta la distancia a medir (mayor retraso temporal). También se puede remarcar el otro efecto que induce la propagación de la señal, que es la pérdida de potencia, por lo que se aprecia que cuanto mayor sea la distancia a medir, la potencia de la señal es menor.

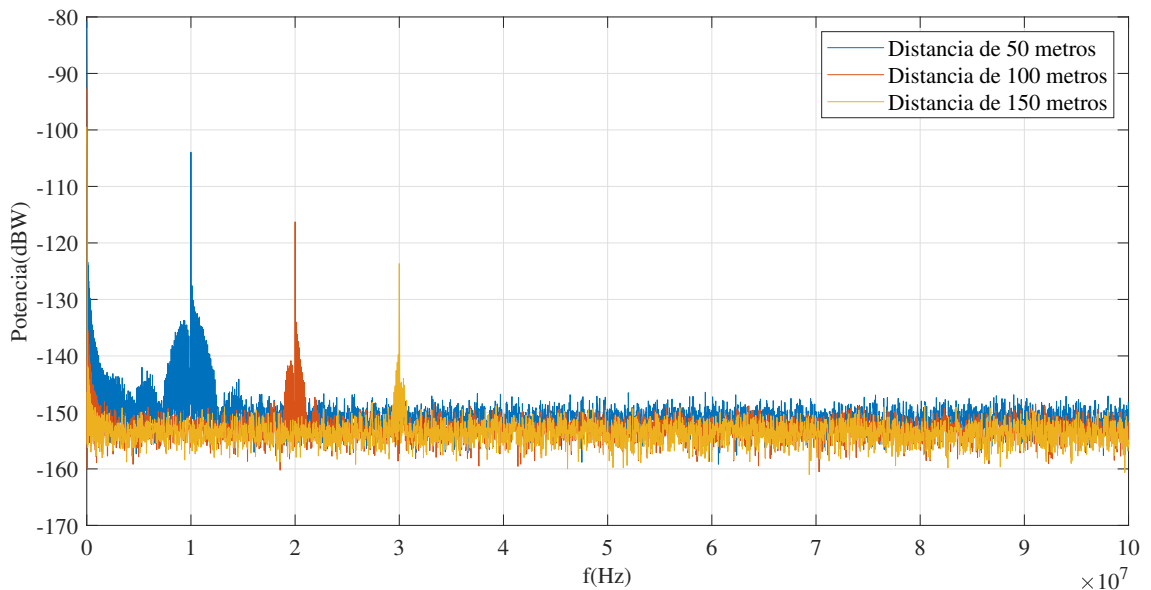


Figura 2.16 Espectro para tres distancias distintas.

A continuación, se realiza una simulación iterativa en la que se barren distancias de 20 a 620 metros con incrementos de 20 metros y 20 simulaciones por configuración. Para esta simulación tomamos unos parámetros de propagación ideales que se ilustran en la tabla 2.3.

Donde hay que remarcar que los valores de τ_{atm} y τ_{opt} pese a ser la unidad no suponen una pérdida del 100% como se podría intuir sino del 0%, ya que como se ve en la expresión 2.5, supondría multiplicar la potencia transmitida por la unidad.

Tras realizar la simulación, se representa la distancia teórica frente a la medida por el sistema

Tabla 2.3 Parámetros de la propagación.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|------------------------------------|-------|-------------|
| Pérdidas atmosféricas τ_{atm} | 1 | Tanto por 1 |
| Pérdidas ópticas τ_{opt} | 1 | Tanto por 1 |
| Reflectividad ρ | 1 | Tanto por 1 |
| Apertura receptor D | 15 | cm |

LIDAR (figura 2.18); y por otro lado, la raíz del error medio cuadrático RMSE (del inglés, *Root Mean Square Error*) para cada distancia medida (figura 2.19).

A partir de la figura 2.18 podemos concluir que en las mencionadas condiciones ideales, nuestro sistema tiene un rango de medida de $R \approx 510$ m puesto que, a partir de esa distancia, el error se dispara. Hasta esa distancia se tiene una resolución del orden de $10\mu\text{m}$.

Por otro lado, en la figura 2.19 se puede observar que, a partir de los mencionados 510 m, el error se dispara y, en términos generales, disminuye conforme se aumenta la distancia de medida. Esto se debe a que el algoritmo busca la componente máxima del espectro, de forma que, una vez que la señal pierde tanta potencia al propagarse que queda "escondida" tras el ruido, se detecta como máxima otra componente espectral, en este caso la que correspondería a una distancia de aproximadamente 1200 m.

Por ello, cuando se aumenta la distancia a medir, disminuye el error ya que la distancia medida difiere menos de la distancia real.

Bucle anidado distancia-reflectividad

Como se ha mencionado anteriormente, las condiciones de propagación del barrido de distancia realizado son ideales. A fin de acercar la simulación a la realidad se va a realizar el análisis anterior para distintos valores de reflectividad del blanco y poder ver los efectos.

Para ello se ha seguido el algoritmo expuesto en la figura 2.21, recorriendo varios valores de reflectividad para cada distancia. En este caso, se han simulado distancias de 250 a 550 con incrementos de 25 metros, para reflectividades de 10%, 50% y 80%. Se realizan 10 simulaciones por cada pareja distancia-reflectividad.

En la figura 2.20 se muestra el error RMSE para el barrido en distancia con blancos de distintas reflectividades. Se puede ver que, la reflectividad puede llegar a mermar mucho el rango de medida del sistema; por ejemplo, en el caso de reflectividad del 10% en el que pasamos de tener un rango de $R \approx 510$ m (caso del apartado anterior) a uno de $R \approx 250$ m. Por otro lado, para una reflectividad del 50% no se tiene una pérdida de rendimiento tan grande.

Bucle anidado distancia-pérdida atmosférica

Por último, se va a analizar el comportamiento del barrido en distancia suponiendo pérdidas atmosféricas ya que, como se mencionó en la introducción, el tiempo atmosférico toma un importante papel en el funcionamiento del LIDAR. También se puede ver su importancia en la expresión 2.5 puesto que es un término al cuadrado.

En este caso se ha hecho un barrido de distancia desde 200 a 600 metros con incrementos de 100 metros y pérdidas atmosféricas de 50%, 25% y 10%. Así mismo se realizan 25 simulaciones por pareja. Se ha utilizado un *script* con el algoritmo mostrado en la figura 2.21, cambiando reflectividad por pérdida atmosférica.

En la figura 2.22 se puede ver el error RMSE para el barrido en distancia con distintas pérdidas atmosféricas. Se aprecia que este factor tiene mayor peso en el rango del sistema puesto que en el apartado anterior se vio que con una reflectividad de 50% el rango caía a 425 metros y con unas pérdidas atmosféricas del 50% el rango cae a 300 metros. Así mismo, en las distancias en las que

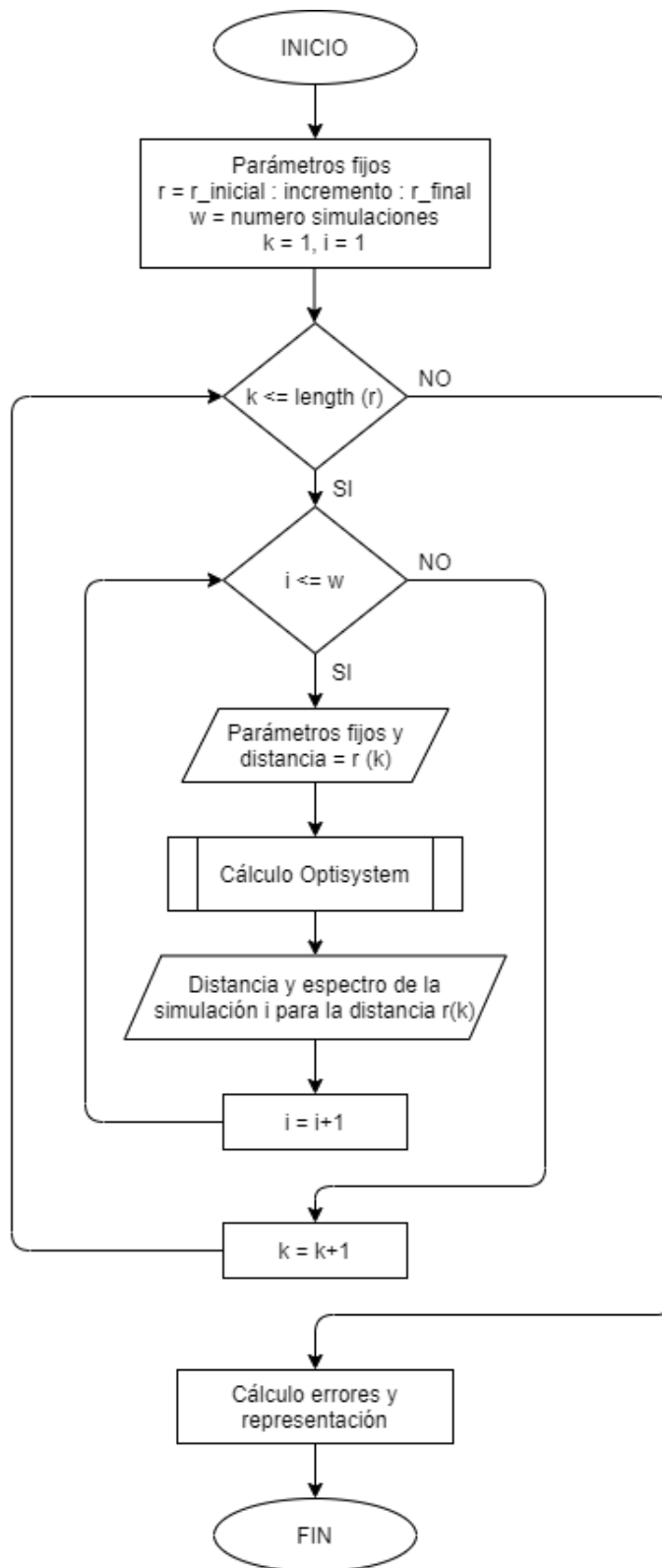


Figura 2.17 Diagrama de flujo de las simulaciones iterativas.

se tiene una medida correcta (error pequeño), se tiene menor resolución (mayor error) para valores mayores de pérdida atmosférica τ_{atm} .

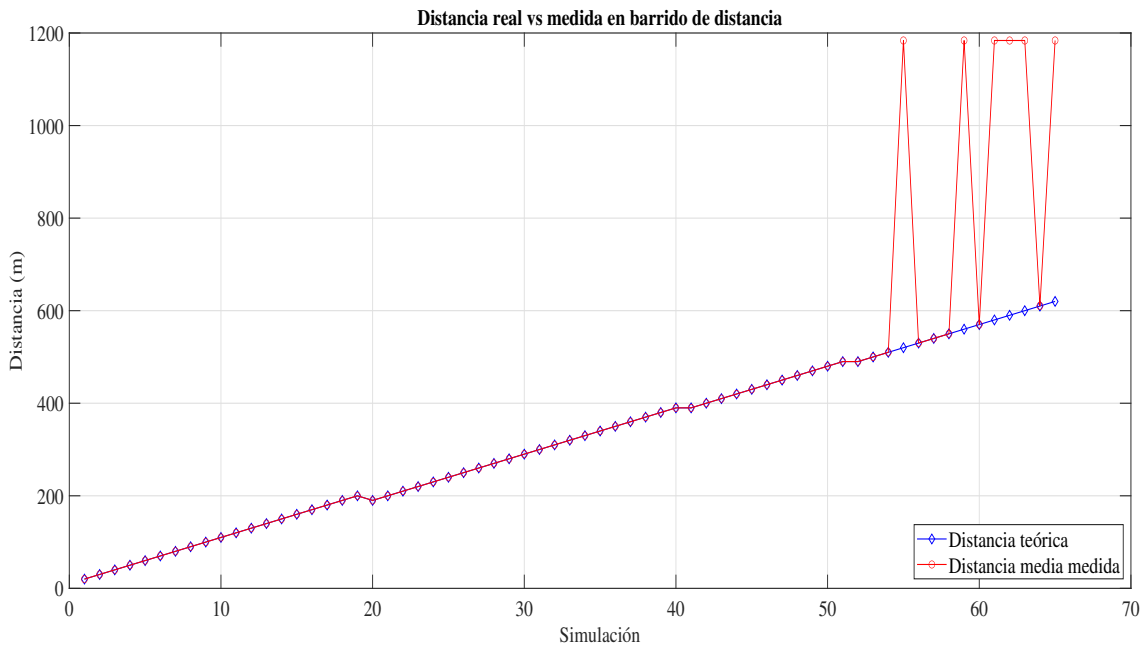


Figura 2.18 Distancia teórica frente a distancia medida.

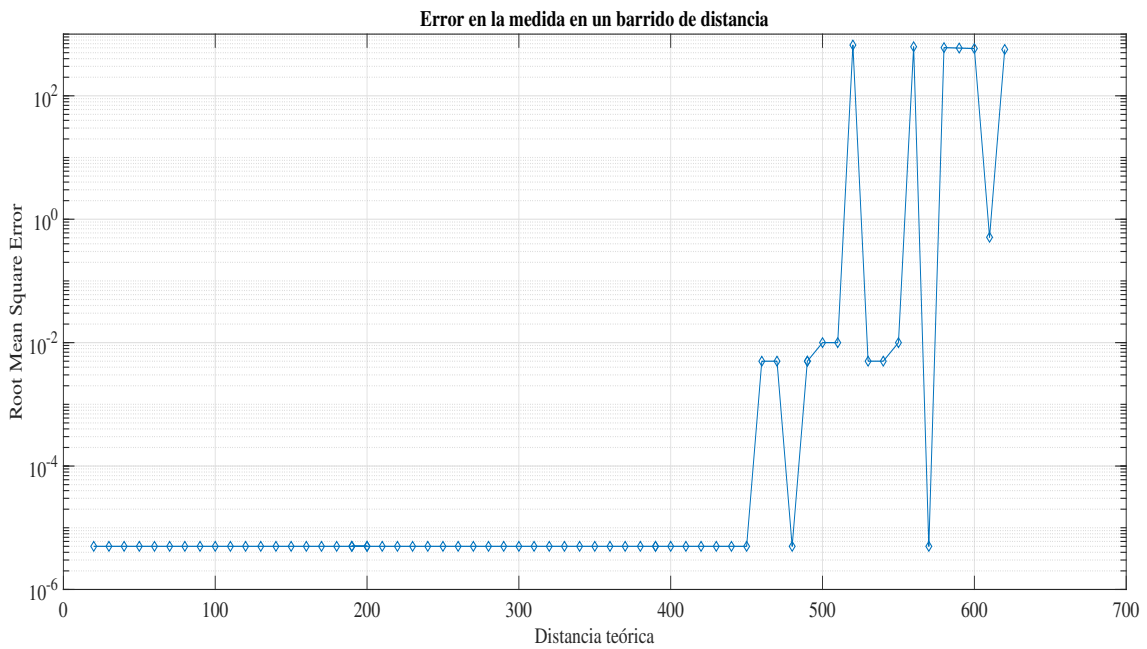


Figura 2.19 Error RMSE para cada distancia medida.

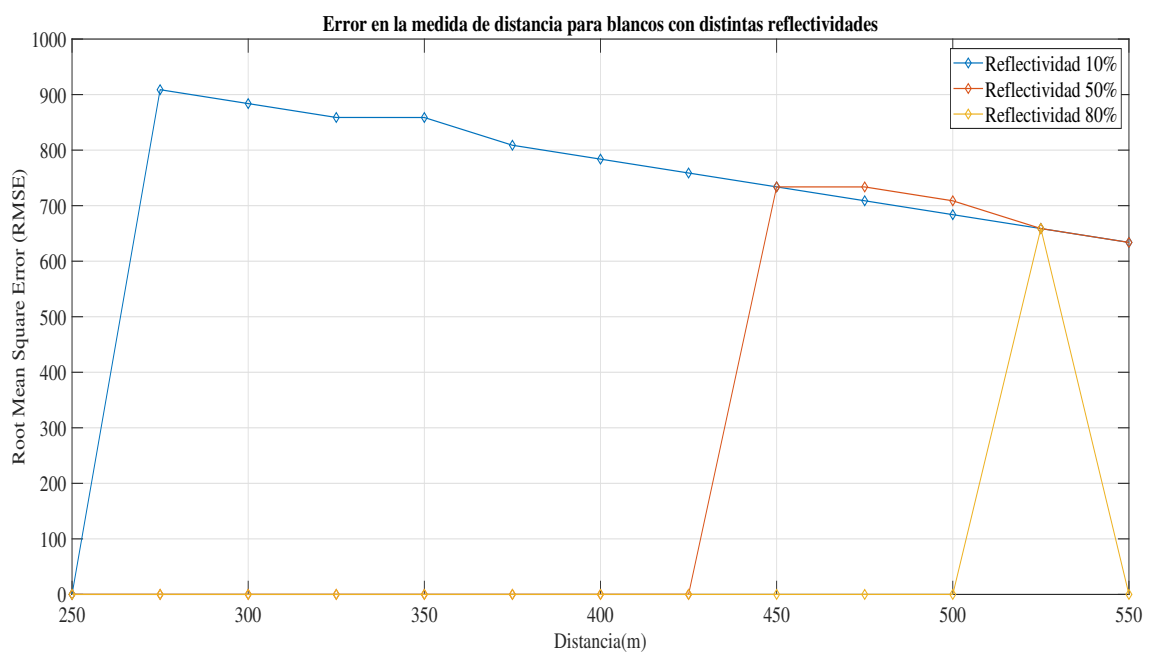


Figura 2.20 Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades.

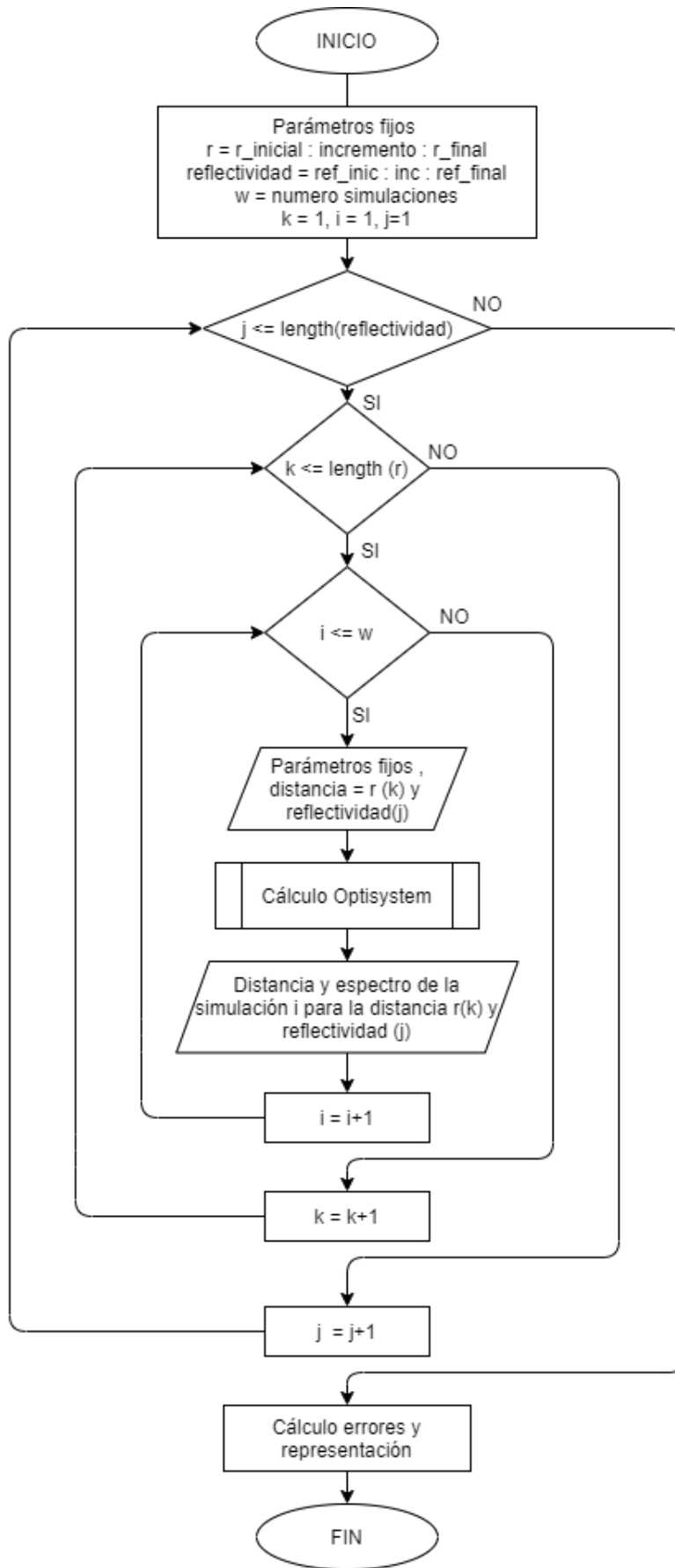


Figura 2.21 Diagrama de flujo de simulación con dos bucles anidados.

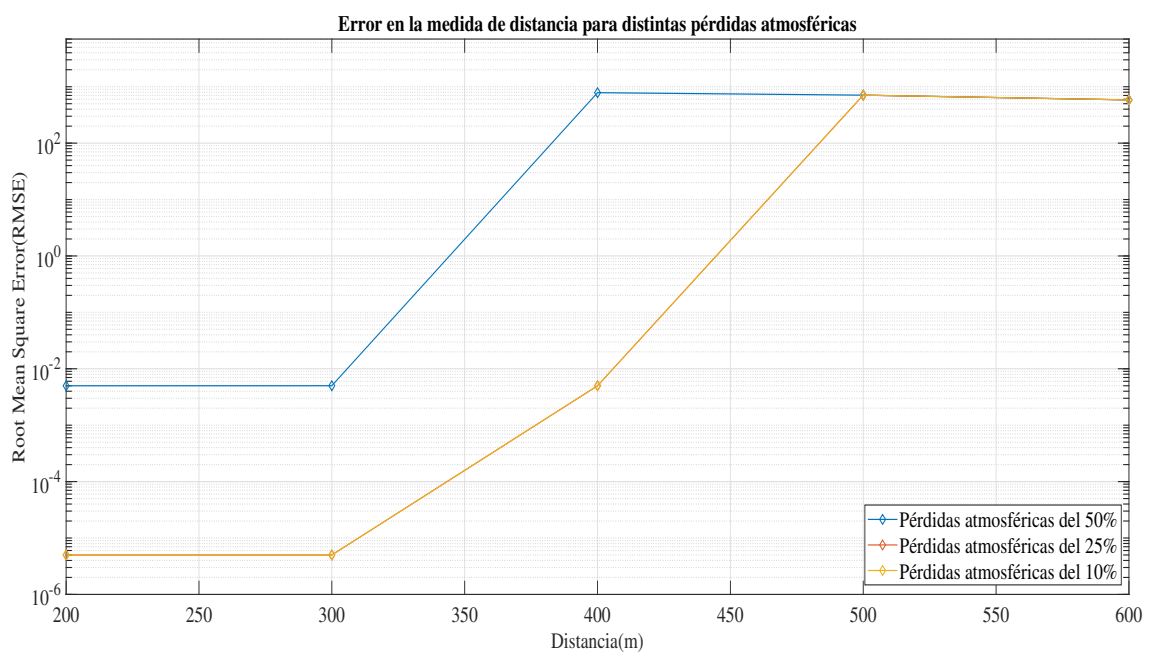


Figura 2.22 Error en la medida de distancia para distintas pérdidas atmosféricas.

3 LIDAR FMCW con detección coherente heterodina

3.1 Principio de funcionamiento

El LIDAR FMCW con detección coherente heterodina sigue un esquema como el mostrado en la figura 3.1. En este LIDAR se hace uso de una detección coherente de forma que la detección de la señal óptica se realiza a través de un receptor balanceado [18], es decir, dos fotodetectores balanceados que cooperan con un acoplador óptico de 3 dB. Esto ha sido denominado como un único bloque llamado receptor balanceado en el esquema previamente mencionado. Desarrollo matemático extraído de [10].

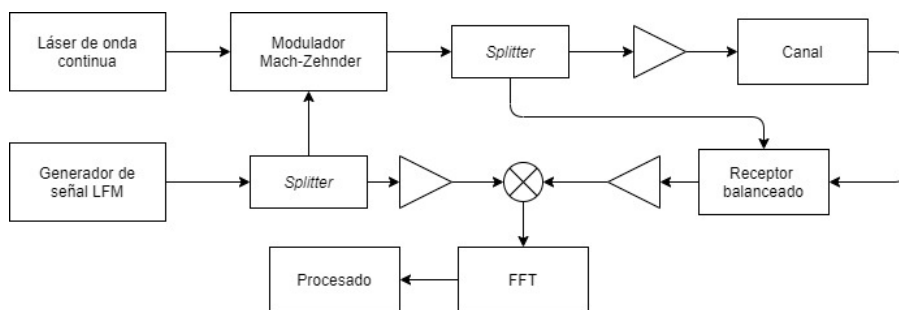


Figura 3.1 Esquema de una arquitectura LIDAR FMCW con detección coherente heterodina.

La señal óptica generada por el láser se divide en dos partes: una de ellas es modulada por la señal LFM (de iguales características que en el capítulo 2) a través del modulador Mach-Zehnder, que opera en el punto de transmisión nulo en el caso de sistemas con detección coherente. Esta señal modulada es emitida hacia el blanco y la otra parte, es utilizada como una señal óptica LO (oscilador local, en inglés, *Local Oscillator*) que es combinada con la señal reflejada $E_{ref}(t)$ a través de un acoplador ideal de 3 dB. Las salidas de dicho acoplador son:

$$E_{pd1} = \frac{1}{\sqrt{2}}[E_{lo}(t) + jE_{ref}(t)] \quad (3.1)$$

$$E_{pd2} = \frac{1}{\sqrt{2}}[jE_{lo}(t) + E_{ref}(t)] \quad (3.2)$$

Donde E_{pd1} y E_{pd2} son los campos eléctricos incidentes en el fotodetector 1 y 2 respectivamente y $E_{lo}(t)$ es la señal óptica LO cuya expresión es:

$$E_{lo}(t) = \sqrt{P_{lo}} e^{j(\omega_o t + \theta_{lo}(t))} \quad (3.3)$$

Donde $\theta_{lo}(t)$ es una componente de variación aleatoria de la fase de la señal óptica LO, P_{lo} es la potencia óptica de la señal LO y la señal reflejada se puede expresar como:

$$E_{ref}(t) = \sqrt{P_r} \cos \left(2\pi f_{start}(t - \tau) + \frac{\pi B}{T_m}(t - \tau)^2 \right) e^{j(\omega_o + \omega_d)t + \theta_o(t)} \quad (3.4)$$

Utilizando el fotodetector balanceado y un filtro paso banda (del inglés *Band Pass Filter*) podemos extraer la componente continua (DC) de forma que:

$$i_p(t) = 2\Re \sqrt{P_{lo}P_r} \cos \left(2\pi f_{start}(t - \tau) + \frac{\pi B}{T_m}(t - \tau)^2 \right) \sin \left(\omega_d t + (\theta_o(t) - \theta_{lo}(t)) \right) \quad (3.5)$$

Donde la componente DC (corriente continua, del inglés, *Direct Current*) extraída tiene la siguiente expresión:

$$i_{dc} = \frac{\Re P_{lo}}{2} + \frac{\Re P_r}{4} \Big|_{weak\ signal} \approx \frac{\Re P_{lo}}{2} \quad (3.6)$$

En ausencia de efecto Doppler, la detección heterodina simplificada es vulnerable a desvanecimiento (*fading*) de la portadora el cual es producido por el último término ($\theta_o(t) - \theta_{lo}(t)$). La señal de distancia se produce multiplicando la señal fotodetectada con la señal LFM y filtrando la resultante mediante un filtro paso bajo para obtener la frecuencia proporcional a la distancia, f_r , y la frecuencia Doppler, f_d :

$$S_b(t) = \Re A_{lo} \sqrt{P_{lo}P_r} \cos \left(2\pi f_{start} \tau - \frac{\pi B}{T} \tau^2 + 2\pi f_r t \right) \sin \left(\omega_d t + (\theta_o(t) - \theta_{lo}(t)) \right) \quad (3.7)$$

3.2 Implementación en Optisystem

Se hace uso, al igual que en la detección directa, de los bloques de generación de señal LFM donde se cambia la configuración del modulador FM, pasando a tener un *bias* de 0.5 a 1, para situar el funcionamiento del modulador óptico en el punto *Null*, tal que $v = v_\pi = 1$, como se puede observar en la figura 2.2.

Por otro lado, el láser y modulador óptico mantienen su configuración, al igual que el canal de transmisión y el mezclado de la señal tras la detección. El cambio principal es el método de detección, pasando a ser una detección coherente mediante un receptor balanceado.

3.2.1 Elementos propios de la arquitectura

Receptor balanceado

Se trata de un receptor que hace uso de un acoplador híbrido óptico. Consiste en un elemento de 4 puertos (2 de entrada y 2 de salida), siendo en la figura 3.2, los puertos 1 y 2 entradas y los puertos

3 y 4, salidas. A su salida se tienen [18]:

$$r_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_1 + i_2) \tag{3.8}$$

$$r_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_1 + i_2 e^{-j\phi}) \tag{3.9}$$

Donde, las corrientes i_1, i_2, r_3, r_4 son las que aparecen en la figura 3.2.

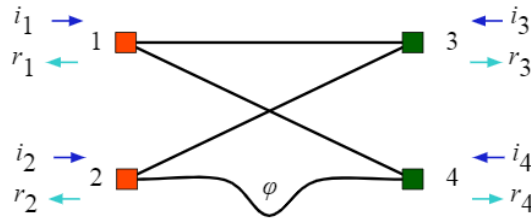


Figura 3.2 Acoplador híbrido óptico [18].

Posteriormente, las corrientes r_3 y r_4 se "detectan" mediante sendos diodos, como se ve en la figura 3.3, de forma que se tiene la siguiente corriente a la salida del receptor balanceado [18]:

$$I_L = I_1 - I_2 = R[E_1 E_2^* + E_1^* E_2] \tag{3.10}$$

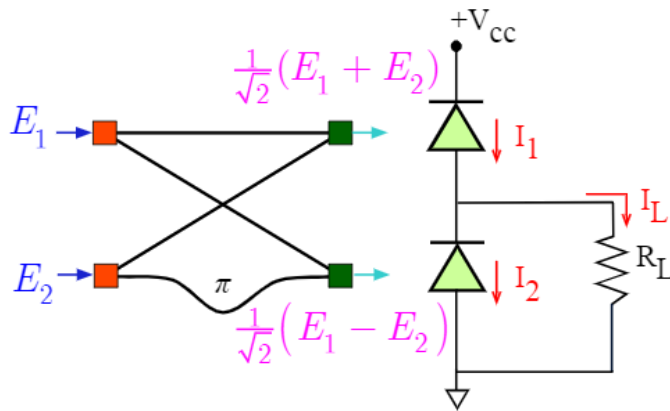


Figura 3.3 Detector coherente [18].

En este trabajo se ha implementado el receptor balanceado mediante dos fotodetectores PIN cuyas salidas se restan entre sí y un acoplador X (según nomenclatura de Optisystem), tal y como se ve en la figura 3.4.

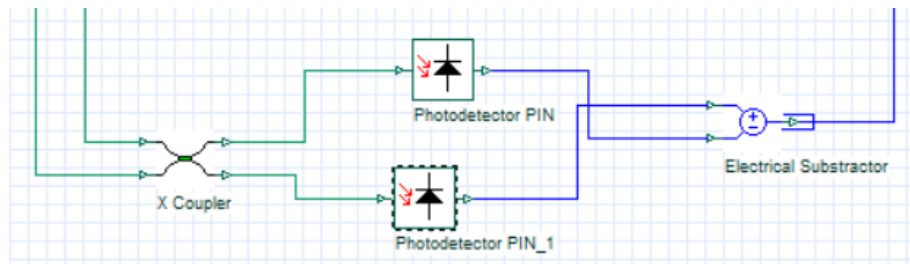


Figura 3.4 Detector coherente en Optisystem.

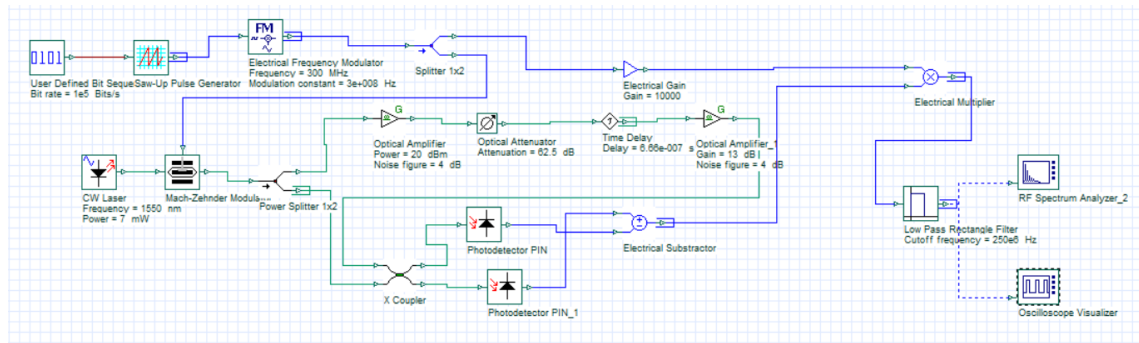


Figura 3.5 LIDAR FMCW con detección coherente heterodina en Optisystem.

3.3 Simulación

3.3.1 Simulaciones iterativas

Barrido en distancia

En primer lugar, se realiza un barrido en distancias de 150 m a 750 m, ilustrado en la figura 3.6, que proporciona un valor de rango de medida de la arquitectura heterodina de $R \approx 650$ m. Por otro lado, se ve en la figura 3.7, que en los casos de mayor precisión se tiene un error mínimo del orden de $10 \mu\text{m}$ y en el caso de mayor error (de esta simulación) se tiene un error de 100-200 metros.

Bucle anidado distancia-reflectividad

En este caso se han barrido las mismas distancias que en el apartado anterior (150-750m) para unas reflectividades del 15 %, 50 % y 75 %. En la figura 3.8, se ve que el comportamiento para las distintas reflectividades es aproximadamente el mismo, excepto para distancias entre 250 y 400 metros, donde se observan mayores errores en el caso de $\rho = 0.15$.

Se producen errores significativos a partir de $R = 650$ m como en el caso ideal. Esto se debe a que en las arquitecturas coherentes tenemos una mayor potencia de señal (mayor SNR) que en el caso directo, gracias a la ganancia de potencia que se obtiene del láser inalterado en la detección coherente; por ello, una pequeña pérdida de potencia (pérdida de 3 dB en el caso de $\rho = 0.5$), no afecta tanto al funcionamiento como en el caso directo.

Bucle anidado distancia-pérdidas atmosféricas

Por último, se realiza la simulación para las mismas distancias y pérdidas atmosféricas de 50 %, 25 % y 10 %. Se observa un comportamiento ligeramente peor para el caso de $\tau_{atm} = 0.5$ y $\tau_{atm} = 0.75$ (pérdida del 25 %) entre 300 y 500 metros. Los errores graves se producen a partir de los 650 metros, como en el caso ideal.

En este caso, se puede concluir que la presencia de condiciones no ideales no afecta en gran medida al rango de medida del LIDAR.

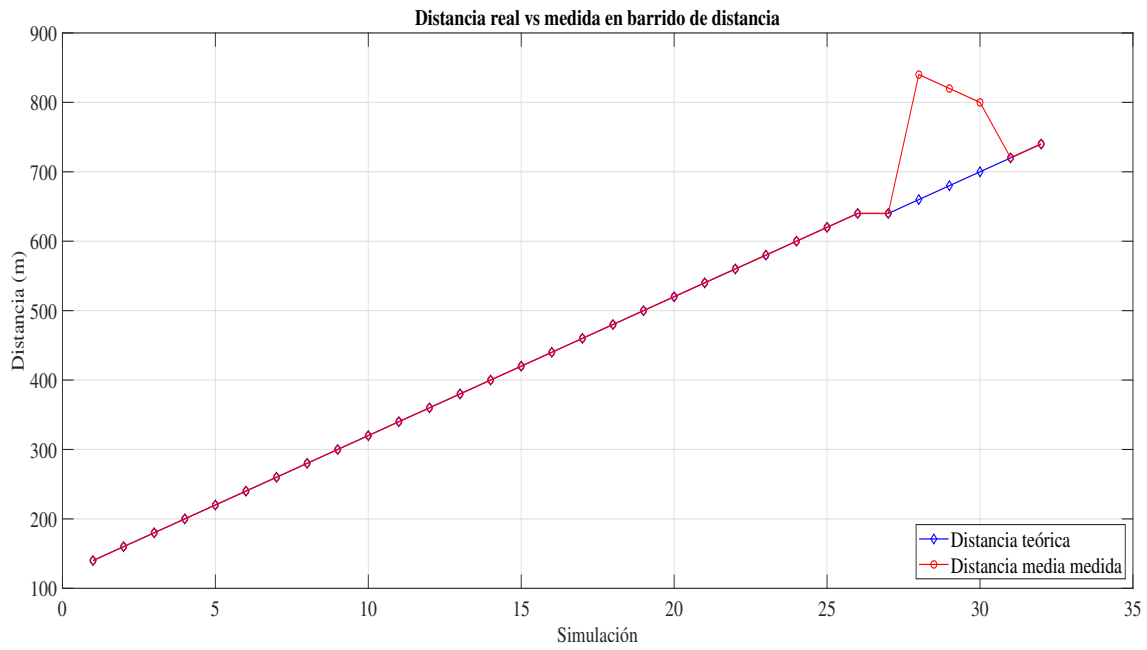


Figura 3.6 Distancia teórica frente a distancia medida en LIDAR FMCW heterodino.

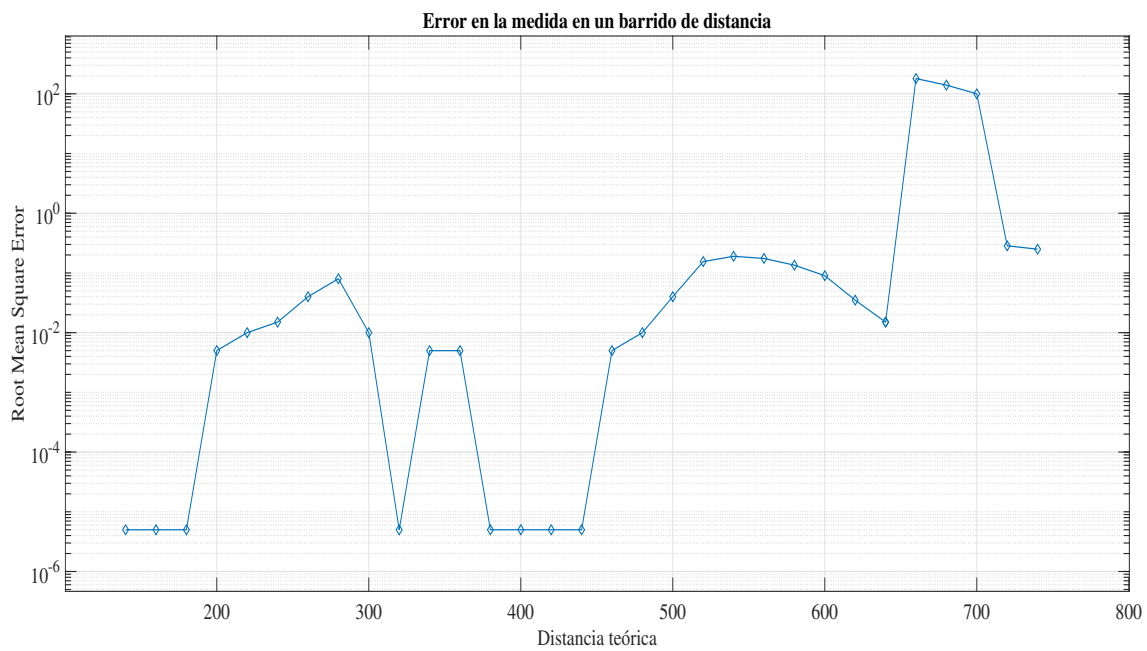


Figura 3.7 Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades en LIDAR FMCW heterodino.

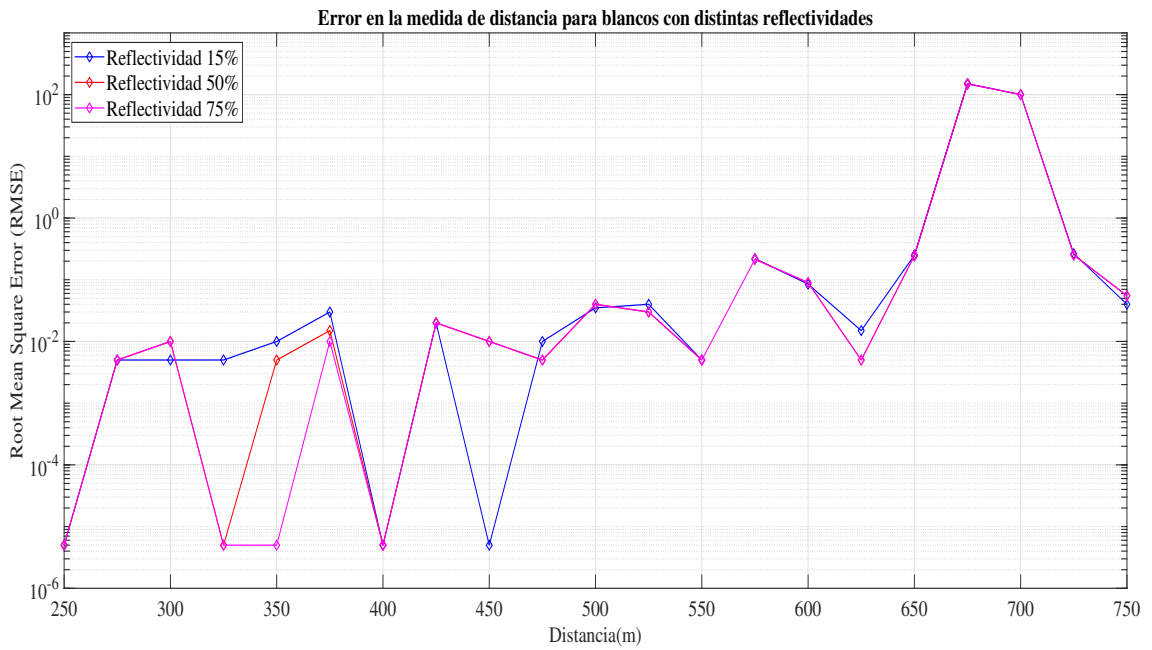


Figura 3.8 Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades en LIDAR FMCW heterodino.

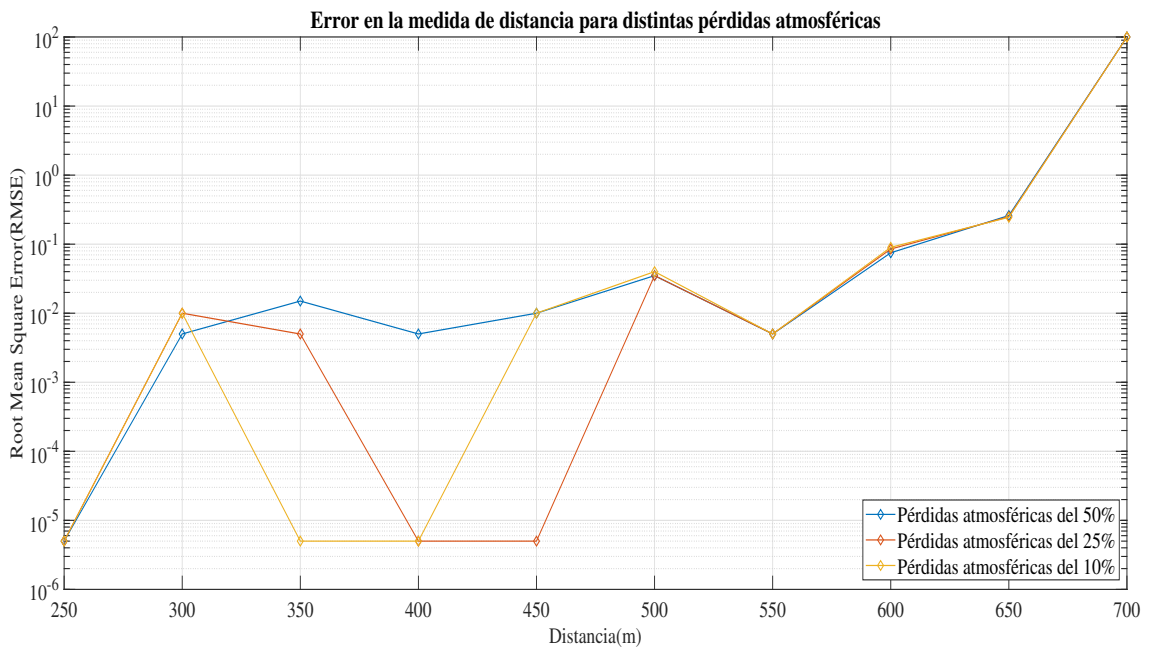


Figura 3.9 Error RMSE en la medida de distancia para distintos valores de pérdidas atmosféricas en LIDAR FMCW heterodino.

4 LIDAR FMCW con detección coherente homodina

4.1 Principio de funcionamiento

En esta arquitectura la señal óptica modulada es dividida en dos partes: una de ellas es transmitida hacia el blanco y la otra es utilizada como señal LO para la recepción. Por lo tanto la señal LO puede expresarse como [10]:

$$E_{lo}(t) = \beta \sqrt{P_{lo}} \cos \left(2\pi f_{start} t + \frac{\pi B}{T_m} t^2 \right) e^{(j\omega_o t + \theta_{lo}(t))} \quad (4.1)$$

La señal reflejada $E_{ref}(t)$ se multiplica por la señal óptica LO, $E_{lo}(t)$, usando un fotodetector dual balanceado en cooperación con un acoplador óptico de 3 dB. La señal de salida del fotodetector se puede expresar como:

$$i_p(t) = 2\Re \sqrt{P_{lo} P_r} \cos \left(2\pi f_{start} (t - \tau) + \frac{\pi B}{T_m} (t - \tau)^2 \right) \cos \left(2\pi f_{start} t + \frac{\pi B}{T_m} t^2 \right) \cdot K(t) \quad (4.2)$$

$$K(t) = \sin \left(\omega_d t + (\theta_o(t) - \theta_{lo}(t)) \right) \quad (4.3)$$

De tal forma que análogamente al capítulo 3, la componente DC eliminada se puede expresar como:

$$i_{dc} = \frac{\Re \beta^2 P_{lo}}{4} + \frac{\Re P_r}{4} \Big|_{weak\ signal} \approx \frac{\Re \beta^2 P_{lo}}{4} \quad (4.4)$$

Finalmente, la señal de distancia es producida filtrando mediante paso bajo la señal fotodetectada de forma que se puede obtener las frecuencias f_r y f_d :

$$S_b(t) = \Re \beta A_{lo} \sqrt{P_{lo} P_r} \cos \left(2\pi f_{start} \tau - \frac{\pi B}{T} \tau^2 + 2\pi f_r t \right) \sin \left(\omega_d t + (\theta_o(t) - \theta_{lo}(t)) \right) \quad (4.5)$$

4.2 Implementación en Optisystem

La implementación es esencialmente igual a la arquitectura heterodina en la que se ha eliminado la multiplicación con la señal LFM, de forma que se ha añadido un amplificador a la salida del detector balanceado, para compensar el efecto que se conseguía con la ganancia eléctrica en los

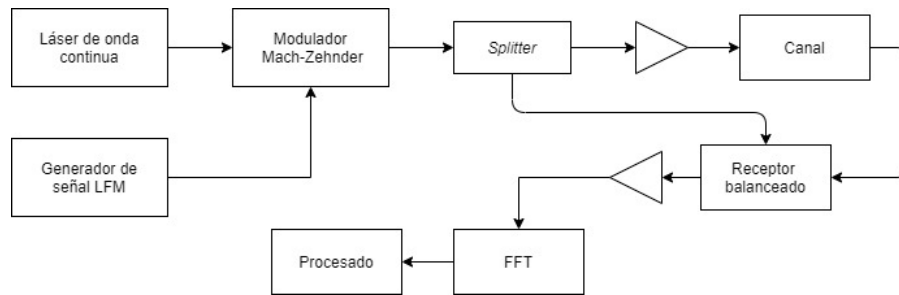


Figura 4.1 Esquema de una arquitectura LIDAR FMCW con detección coherente homodina.

casos anteriores (ahora se introduce ruido puesto que la ganancia era ideal). La configuración de los elementos es la misma que en casos anteriores.

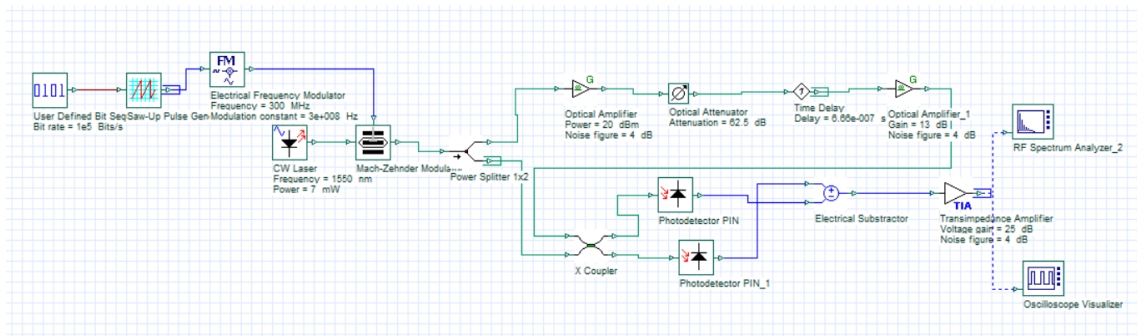


Figura 4.2 LIDAR FMCW con detección coherente homodina en Optisystem.

4.3 Simulación

A continuación, se realizan las simulaciones previamente obtenidas para el caso de la arquitectura homodina. Cabe mencionar que la distancia mínima de medida se ha forzado a un valor de $R = 20\text{ m}$ debido a que se tiene bastante contenido espectral en frecuencias cercanas al cero (figura 2.15) y por lo tanto, la función "max" que se utiliza para buscar la frecuencia f_R detecta esas componentes, que no son la buscada.

Para solventarlo, se han limitado los valores de búsqueda de máximos a partir de 1 MHz, por lo que todas las posibles $f_R < 1\text{ MHz}$, no podrían ser detectadas ($R_{medida} > 20\text{ m}$).

4.3.1 Simulaciones iterativas

Barrido de distancia

En primer lugar, se realiza un barrido en distancias de 250 m a 800 m que se ilustra en la figura 4.3. Ésta proporciona un valor de rango de medida de la arquitectura homodina de $R \approx 650\text{ m}$. Por otro lado, como muestra la figura 4.4, en los casos de mayor precisión se tiene un error mínimo del orden de $10\ \mu\text{m}$ y en el caso de mayor error (de esta simulación) el error asciende a 100-200 metros.

Bucle anidado distancia-reflectividad

En este caso, se han barrido las mismas distancias que en el apartado anterior para unas reflectividades del 15%, 50% y 85%. En la figura 4.5 se ve que el comportamiento para las distintas reflectividades es aproximadamente el mismo (como se explicó para la arquitectura heterodina), produciéndose errores significativos a partir de $R = 650\text{ m}$ como en el caso ideal.

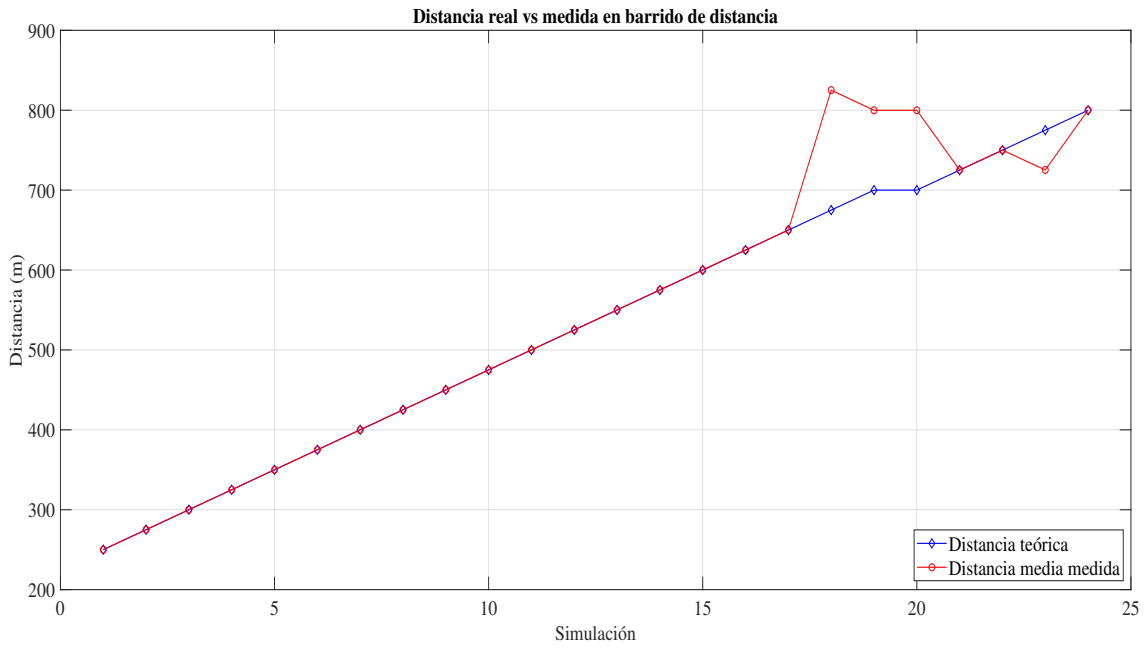


Figura 4.3 Distancia teórica frente a distancia medida en LIDAR FMCW homodino.

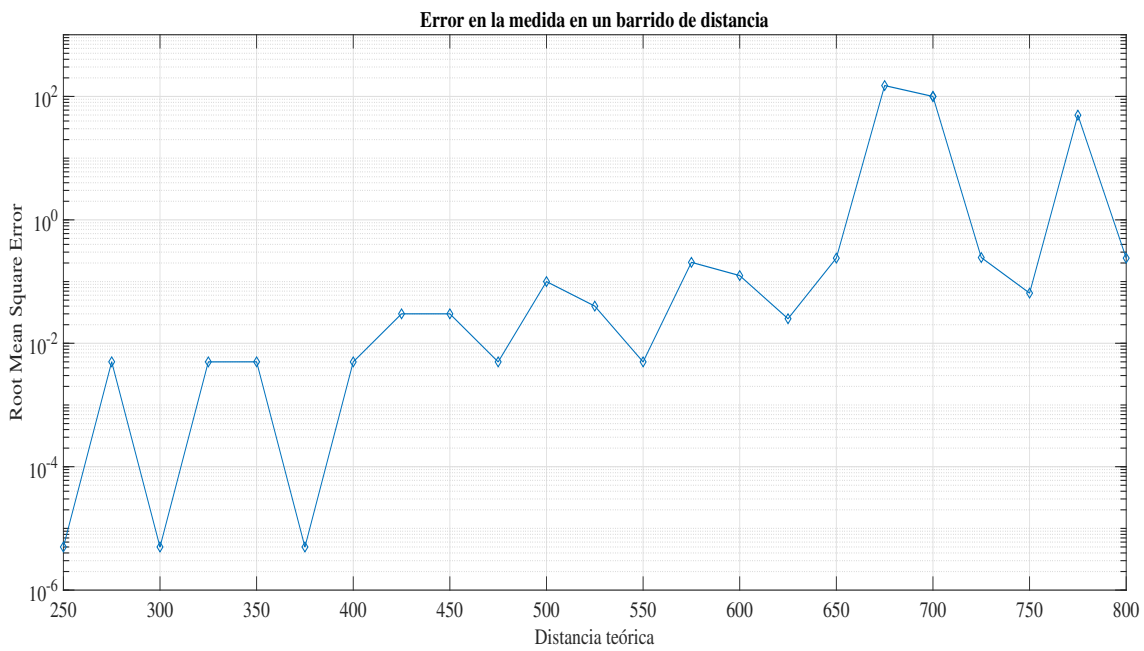


Figura 4.4 Error RMSE para cada distancia medida en LIDAR FMCW homodino.

Bucle anidado distancia-pérdida atmosférica

Por último, se realiza la simulación para las mismas distancias y pérdidas atmosféricas de 75%, 50% y 15%. Se observa un comportamiento casi igual para todos los valores de τ_{atm} y un rango de medida análogo a los anteriores.

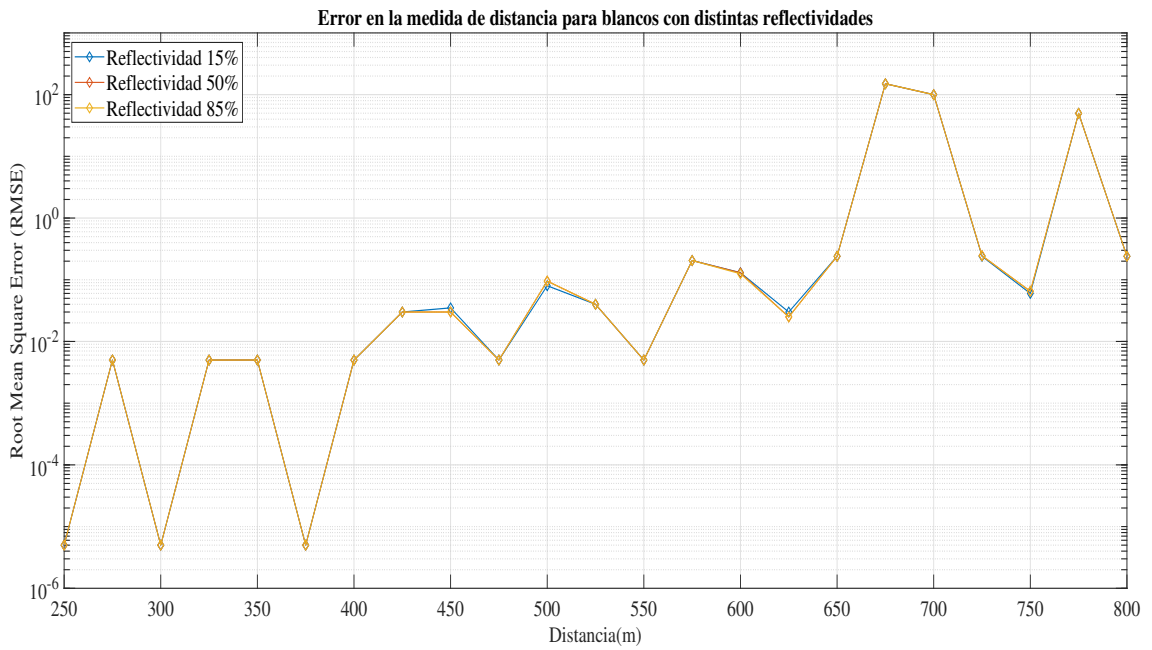


Figura 4.5 Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades en LIDAR FMCW homodino.

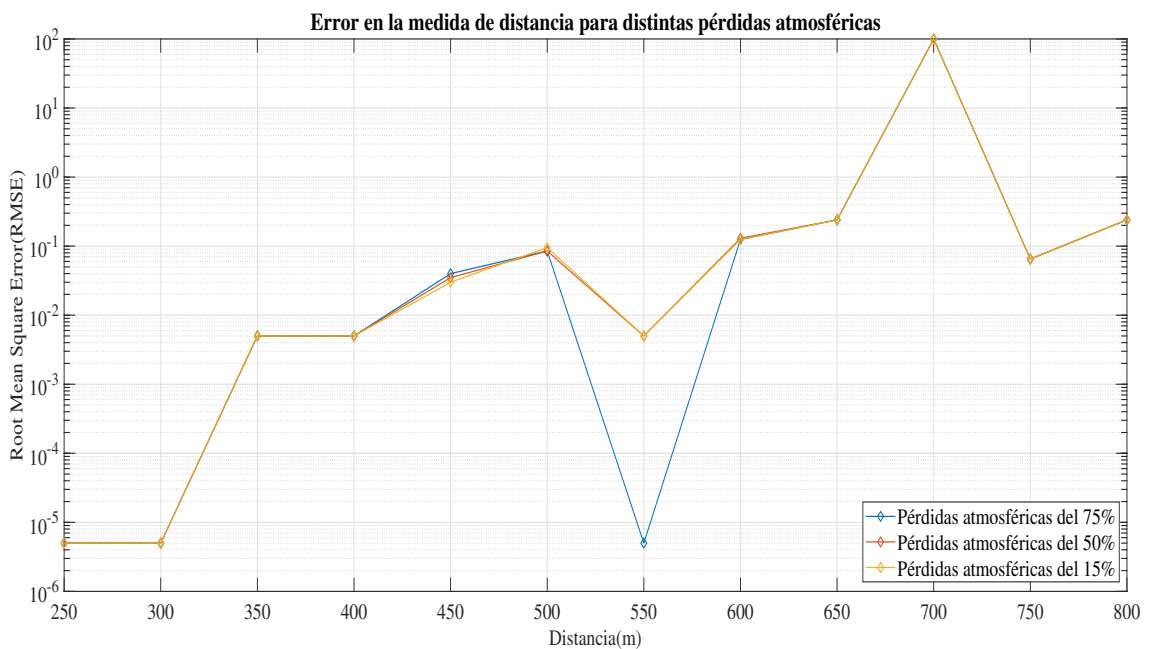


Figura 4.6 Error RMSE en la medida de distancia para distintos valores de pérdidas atmosféricas en LIDAR FMCW homodino.

5 Conclusiones y líneas de trabajo futuras

En este trabajo se han simulado tres arquitecturas de LIDAR FMCW, de las cuales se han podido extraer conclusiones de interés.

En primer lugar, llama la atención el buen comportamiento de las arquitecturas coherentes, dada su robustez ante condiciones no ideales de reflectividad, pérdidas atmosféricas, etc. Se ha comprobado que su rango de medida se mantenía inalterado pese a dichos efectos. Además de su mayor rango de medida respecto a la detección directa para las mismas condiciones.

Por otro lado, se tiene la inmunidad frente a interferencias de otros sistemas que confiere la detección coherente, al hacer uso de su propia señal transmitida para la detección.

A su vez, la resolución en las medidas es una gran baza del LIDAR FMCW, con resoluciones del orden de micrometros en algunos casos, como se ha podido ver en las simulaciones realizadas.

Por último, se remarca la utilidad que puede tener el LIDAR FMCW con detección directa gracias a su simplicidad, que podría resultar interesante en casos de condiciones no muy desfavorables donde presenta un comportamiento razonablemente bueno.

Adicionalmente, se adjunta la tabla resumen 5.1 de los principales resultados de forma que resulte más ilustrativo.

A la vista de los resultados de la tabla 5.1 se puede concluir que tanto la arquitectura coherente heterodina como la homodina presentan un mayor rango de medida a cambio de una mayor complejidad del sistema, resultando la elección de una u otra arquitectura en una relación de compromiso entre rango y complejidad.

Entre las arquitecturas coherentes, la homodina resulta ligeramente menos compleja mientras que mantiene un buen comportamiento similar al de la arquitectura heterodina. En cuanto a resolución no supone ninguna diferencia el uso de una u otra arquitectura.

En cuanto a líneas de trabajo futuras, se propone la implementación de las arquitecturas coherentes de LIDAR FMCW incluyendo un modelo de blanco móvil de forma que se mida la velocidad de éste gracias al efecto Doppler.

Tabla 5.1 Resumen de resultados de simulación.

| Resultados | | | |
|---|-----------------|-----------------------|-------------|
| Arquitectura | Rango de medida | Máxima resolución | Complejidad |
| Detección directa (ideal) | 510 m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | Baja |
| Detección directa ($\rho=0.5$) | 425m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | - |
| Detección directa ($\tau_{atm}=0.5$) | 350 m | $\sim 10 \text{mm}$ | - |
| Coherente heterodino (ideal) | 650 m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | Media-Alta |
| Coherente heterodino ($\rho=0.5$) | 650 m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | - |
| Coherente heterodino ($\tau_{atm}=0.5$) | 650 m | $\sim 10 \text{mm}$ | - |
| Coherente homodino (ideal) | 650 m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | Media-Alta |
| Coherente homodino ($\rho=0.5$) | 650 m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | - |
| Coherente homodino ($\tau_{atm}=0.5$) | 650 m | $\sim 10 \mu\text{m}$ | - |

Índice de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Mapa en 3D generado mediante LIDAR [2] | 1 |
| 1.2 | Esquema explicativo del funcionamiento del LIDAR FMCW. [5] | 3 |
| 1.3 | Espectro de la radiación solar [7] | 3 |
| 1.4 | Exposición máxima permitida respecto a la longitud de onda [8] | 4 |
| 1.5 | Modo script de Optisystem | 5 |
| 2.1 | Frecuencia de la señal moduladora respecto al tiempo (a) y amplitud de la señal moduladora respecto al tiempo (b) [11] | 7 |
| 2.2 | Esquema de un modulador óptico Mach-Zehnder (a) y curva de transmisión de un modulador óptico Mach-Zehnder (b) [12] | 8 |
| 2.3 | Esquema de un sistema LIDAR FMCW con detección directa | 9 |
| 2.4 | Espectro de reflectividad para aluminio, plata y oro con incidencia normal [13] | 9 |
| 2.5 | Pérdidas atmosféricas en distintas condiciones para señales con longitud de onda de 850 y 1550 nm (utilizada en nuestro LIDAR) [15] | 10 |
| 2.6 | Señal a la salida del bloque Saw-Up Pulse Generator | 12 |
| 2.7 | Espectro de la señal a la salida del modulador FM | 13 |
| 2.8 | Subsistema generador de la señal LFM | 13 |
| 2.9 | Láser y modulación óptica | 14 |
| 2.10 | Esquema de un circulador [16] | 15 |
| 2.11 | Canal de propagación simulado | 15 |
| 2.12 | LIDAR FMCW con detección directa en Optisystem | 15 |
| 2.13 | Diagrama de flujo del script 2.1 | 16 |
| 2.14 | Diagrama de flujo del script 2.2 | 19 |
| 2.15 | Espectro de la señal de medida | 20 |
| 2.16 | Espectro para tres distancias distintas | 20 |
| 2.17 | Diagrama de flujo de las simulaciones iterativas | 22 |
| 2.18 | Distancia teórica frente a distancia medida | 23 |
| 2.19 | Error RMSE para cada distancia medida | 23 |
| 2.20 | Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades | 24 |
| 2.21 | Diagrama de flujo de simulación con dos bucles anidados | 25 |
| 2.22 | Error en la medida de distancia para distintas pérdidas atmosféricas | 26 |
| 3.1 | Esquema de una arquitectura LIDAR FMCW con detección coherente heterodina | 27 |
| 3.2 | Acoplador híbrido óptico [18] | 29 |
| 3.3 | Detector coherente [18] | 29 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.4 | Detector coherente en Optisystem | 30 |
| 3.5 | LIDAR FMCW con detección coherente heterodina en Optisystem | 30 |
| 3.6 | Distancia teórica frente a distancia medida en LIDAR FMCW heterodino | 31 |
| 3.7 | Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades en LIDAR FMCW heterodino | 31 |
| 3.8 | Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades en LIDAR FMCW heterodino | 32 |
| 3.9 | Error RMSE en la medida de distancia para distintos valores de pérdidas atmosféricas en LIDAR FMCW heterodino | 32 |
| 4.1 | Esquema de una arquitectura LIDAR FMCW con detección coherente homodina | 34 |
| 4.2 | LIDAR FMCW con detección coherente homodina en Optisystem | 34 |
| 4.3 | Distancia teórica frente a distancia medida en LIDAR FMCW homodino | 35 |
| 4.4 | Error RMSE para cada distancia medida en LIDAR FMCW homodino | 35 |
| 4.5 | Error RMSE en la medida de distancia para blancos con distintas reflectividades en LIDAR FMCW homodino | 36 |
| 4.6 | Error RMSE en la medida de distancia para distintos valores de pérdidas atmosféricas en LIDAR FMCW homodino | 36 |

Índice de Tablas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Parámetros del layout | 11 |
| 2.2 | Configuración del modulador FM eléctrico | 13 |
| 2.3 | Parámetros de la propagación | 21 |
| 5.1 | Resumen de resultados de simulación | 38 |

Índice de Códigos

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Script de lanzamiento de la simulación de un LIDAR FMCW detección directa | 16 |
| 2.2 | Script cálculo y procesado LIDAR FMCW detección directa | 17 |

Bibliografía

- [1] E. Gregersen, “Lidar,” 2016, [Online; accessed 5-Jul-2021]. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/lidar>
- [2] Wikipedia contributors, “Lidar — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2021, [Online; accessed 20-April-2021]. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lidar&oldid=1018830465>
- [3] D. Johnson, “What is lidar? how everyday devices use lasers to scan your environment,” 2021, [Online; accessed 10-Jul-2021]. [Online]. Available: <https://www.businessinsider.com/what-is-lidar>
- [4] Archer Software, “Lidar vs radar: pros and cons for autonomous driving,” [Online; accessed 20-April-2021]. [Online]. Available: <https://archer-soft.com/blog/lidar-vs-radar-pros-and-cons-autonomous-driving#lidar%20vs%20radar>
- [5] C. Rablau, “Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences,” in *Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019*, A.-S. Poulin-Girard and J. A. Shaw, Eds., vol. 11143, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2019, pp. 84 – 97. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.2523863>
- [6] R. J. Muenster, “Fmcw: The future of lidar,” 2019, [Online; accessed 20-April-2021]. [Online]. Available: https://www.novuslight.com/fmcw-the-future-of-lidar_N9691.html
- [7] Wikipedia contributors, “Sunlight — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2021, [Online; accessed 25-April-2021]. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sunlight&oldid=1018714936>
- [8] AENOR, *UNE-EN 60825: Seguridad de los productos láser*, Abril 2015, versión oficial ,en español, de la Norma Europea EN 60825:2014, que a su vez adopta la norma internacional IEC 60825:2014.
- [9] Mathworks, “Optisystem,” [Online; accessed 25-April-2021]. [Online]. Available: https://es.mathworks.com/products/connections/product_detail/optisystem.html
- [10] A. H. Elghandour and C. D. Ren, “Modeling and comparative study of various detection techniques for FMCW LIDAR using optisystem,” in *Int. Symp. Photoelectron. Detect. Imaging 2013 Laser Sens. Imaging Appl.*, F. Amzajerdian, A. Aksnes, W. Chen, C. Gao, Y. Zheng, and C. Wang, Eds., vol. 8905. SPIE, sep 2013, p. 890529. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2034878>

- [11] M. Kebe, R. Gadhafi, B. Mohammad, M. Sanduleanu, H. Saleh, and M. Al-Qutayri, “Human vital signs detection methods and potential using radars: A review,” *Sensors*, vol. 20, p. 1454, 03 2020.
- [12] Y. Li, Y. Zhang, and Y. Huang, “Slope value detection-based ditherless bias control technique for Mach–Zehnder modulator,” *Optical Engineering*, vol. 52, no. 8, pp. 1 – 7, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.8.087109>
- [13] Wikipedia contributors, “Reflectance — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2020, [Online; accessed 24-May-2021]. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Reflectance&oldid=996493336>
- [14] —, “Attenuation — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2021, [Online; accessed 24-May-2021]. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Attenuation&oldid=1023913039>
- [15] A. Proke, O. Wilfert, and J. Petrzela, “Comparison of atmospheric losses in 850 nm and 1550 nm optical windows,” *2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON)*, pp. 310–313, 2010.
- [16] “Circulator working and its applications,” [Online; accessed 28-May-2021]. [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/circulator-working-and-its-applications/>
- [17] J. G. Romero, “Receptores i: Detección directa,” apuntes de comunicaciones ópticas.
- [18] —, “Receptores ii: Detección coherente,” apuntes de comunicaciones ópticas.