

Revista Electrónica Nova Scientia

Desarrollo de un Sistema de Comunicaciones Ópticas Clásicas en Espacio Libre con Aplicación en Comunicaciones Cuánticas Development of a Free Space Optical Classical Communications System with Application in Quantum Communications

**Arturo Arvizu Mondragón¹, Josué Aarón López Leyva¹,
Juan Carlos Murrieta Lee², Luis Alberto Morán Medina²,
Ramón Muraoka Espíritu¹ y Joel Santos Aguilar¹**

¹Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, CICESE, Ensenada, B.C.

²Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica, ITSON, Ciudad Obregón,
Sonora

México

Arturo Arvizu Mondragón. E-mail: arvizu@cicese.mx

Resumen

Actualmente los enlaces ópticos en espacio libre tienen diversas aplicaciones (algunas comerciales y otras en desarrollo) tales como: a) enlaces horizontales de comunicaciones dentro de la misma capa de la atmósfera terrestre (denominados enlaces FSO por sus siglas en inglés “free space optics”) permanentes o temporales (para situaciones de emergencia) de corta distancia para comunicación entre edificios (Fsona, 2014), y comunicación de alta velocidad en redes personales de área local óptica inalámbrica (Wang, K., et al, 2011), b) enlaces verticales (denominados generalmente sistemas LASERCOM) para comunicación entre aviones y satélites, entre satélites en diferentes órbitas (Chan, V., 2003), de satélites a estaciones terrenas y viceversa (operando en diversas capas de la atmósfera terrestre o en el espacio profundo (Hemmati, H., 2006)), c) conexión óptica inalámbrica de alta velocidad entre tarjetas de circuito impreso (por ejemplo para distribución de señales de reloj dentro de un satélite y/o para interconectar ductos y microprocesadores sin interferencia electromagnética (Savage, N., 2002)). El desarrollo de enlaces ópticos para comunicación de tierra hacia y desde el espacio ha sido y es de gran interés para diversas agencias espaciales alrededor del mundo (JAXA, 2009), en particular, el sistema satelital europeo SILEX es un ejemplo de su aplicación (ESA, 2014); además, la NASA puso en funcionamiento en septiembre de 2013 la misión “Lunar Laser Communication Demonstration”, cuyo objetivo principal es demostrar la confiabilidad de la comunicación óptica entre una estación situada en órbita lunar y estaciones terrenas en nuestro planeta (NASA, 2014). Generalmente los enlaces arriba mencionados son “clásicos” (operando con un relativamente alto número de fotones por período de observación), pero, recientemente ha crecido el interés en desarrollar sistemas de comunicaciones “cuánticos” (con bajo número de fotones por período de observación) (Hemmati, H. et al, 2012). Para estos sistemas pueden emplearse diversos “estados cuánticos”, (cuyas propiedades han sido y son investigadas por diversos grupos de científicos alrededor del mundo (Becerra, F.E., et al, 2013)), entre otros, los “estados entrelazados” (Ma, X., et al, 2012), o los “estados débiles coherentes” (WCS). Nosotros elegimos los WCS por ser posible generarlos con fuentes ópticas de telecomunicaciones (López, J., et al, 2013, López, J., et al, 2012), y porque su empleo a través del espacio libre permite, entre otros, enlaces incondicionalmente seguros para distribución de llave cuántica (QKD) y enlaces satelitales, (tópicos actualmente de alto interés a nivel mundial). Es pertinente mencionar que ya hemos realizado algunos subsistemas con WCS operando en fibra óptica (López, J. et al, 2013), sin

embargo, nos interesa desarrollar sistemas en espacio libre para aplicaciones satelitales (Gutiérrez, C., et al, 2013). Para la realización de un sistema FSO-WCS es conveniente primero desarrollar un enlace FSO-clásico cuyos subsistemas funcionen en enlaces cuánticos. Así, presentamos en primer lugar la metodología para diseño de enlaces ópticos en espacio libre, y una herramienta computacional desarrollada para esto. Entre los sistemas diseñados hay un esquema de sincronización espacial (ATP) usando un APD de cuatro cuadrantes y un subsistema de levitación magnética para seguimiento de un “faro óptico” clásico a 532 nm. Cabe mencionar que aunque existe una cantidad importante de trabajos dedicados al desarrollo de sistemas ATP con transmisión óptica clásica, a lo mejor de nuestro conocimiento no se ha reportado ningún sistema ATP basado en levitación magnética para enlaces empleando WCS, (desde nuestro punto de vista esta es una aportación importante del presente trabajo). Por otro lado, aunque aquí nos enfocamos en la implementación y caracterización de un enlace FSO- clásico, con los resultados obtenidos se continuará con el desarrollo de enlaces FSO-WCS con aplicación satelital.

Palabras clave: FSO, Estados Coherentes Débiles, ATP, QKD

Recepción: 11-07-2013

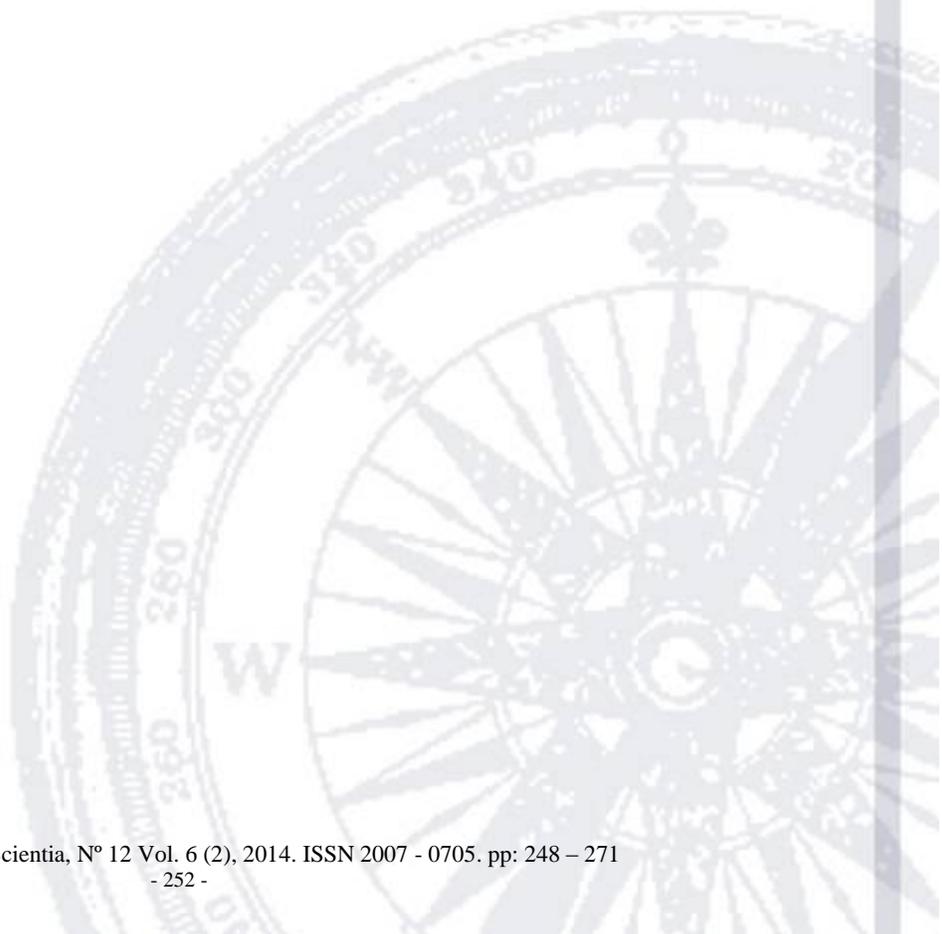
Aceptación: 06-05-2014

Abstract

Currently the free-space optical links have different applications (some of them are already commercialized and other are in the stage of development) such as: a) horizontal communication links within the same layer of Earth's atmosphere (FSO links, i.e. "free space optics"), among which are permanent or temporary links (used in emergency situations) for short-distance communication between buildings (Fsona, 2014), and high-speed communication in personal wireless optical LANs (Wang, K., et al, 2011), b) vertical links (LASERCOM systems) for communication between aircraft and satellites , optical links between satellites in different orbits (Chan , V., 2003), links from satellite to earth stations and vice versa (operating in various layers of the Earth's atmosphere and in deep space (Hemmati , H., 2006)), c) optical-wireless high-speed connection between printed circuit boards (for distributing clock signals in a satellite and/or to interconnect microprocessors without EMI (Savage, N., 2002)). The development of optical communication links (bidirectional) towards the Earth and from the space has been and is of great interest for various space agencies around the world (JAXA, 2009); the European satellite system SILEX is a practical example of such technology (ESA, 2014); in addition, NASA launched on September 2013 the mission "Lunar Laser Communication Demonstration" which main objective is to demonstrate the reliability of the optical communication between a station in lunar orbit and earth stations within our planet (NASA, 2014). Usually the links above-mentioned are "classical" (i.e. they operate with a relatively high number of photons per observation period), however, recently there has been a growing interest in the development of "quantum" communication systems (using low number of photons per observation period) (Hemmati, H., et al, 2012). For these systems different types of "quantum states" may be employed (whose properties have been and are investigated by scientists around the world (Becerra, F.E., et al, 2013)), among others, the "entangled states" (Ma, X., et al, 2012), or "weak coherent states" (WCS). We chose the WCS because its generation is possible with optical sources in the telecom band (Lopez, J., et al, 2013, Lopez, J., et al, 2012). In addition, the use of WCS for communications through free space allows the establishment of links unconditionally secure for quantum key distribution (QKD), satellite links (where the "original" information signal is classical but may arrive as a WCS signal in the receiver front due to the strong attenuation of the atmosphere), among others (currently these topics are of great interest worldwide). It is convenient to mention that we have already implemented some WCS-based

subsystems employing optical fiber (Lopez, J., et al, 2013), however, we want to develop WCS-free-space systems for satellite applications (Gutiérrez, C., et al, 2013). Prior to the practical implementation of a FSO- WCS system we consider very convenient the development of a classical FSO link whose subsystems are also used in free-space quantum links. We present the methodology for the design of free-space optical links and a computational tool developed for this purpose. We designed a spatial synchronization scheme (ATP) based on a four-quadrant APD and a magnetic levitation subsystem to monitor a classical optical beacon signal at 532 nm used to establish the communications link and to maintain it operating adequately. It is convenient to mention that although there is a significant amount of papers dedicated to the development of ATP systems with classical optical transmission, to the best of our knowledge has not been reported yet an ATP system based on magnetic levitation for quantum links employing WCS; from our point of view this could be an important contribution of this work. On the other hand, although here we focus on a classic FSO link, the results will be used to the development of links type WCS – FSO for satellite applications.

Keywords: FSO, Weak Coherent States, ATP, QKD



Introducción

La mayoría de los sistemas de comunicaciones ópticas comerciales actuales usan fibra óptica con niveles de potencia clásicos. Aunque, existe una actividad importante de investigación y desarrollo a nivel mundial de los sistemas FSO (también usando potencias ópticas clásicas) que presentan ventajas importantes como; a) ganancias elevadas con dimensiones de antenas (ópticas) muy inferiores a las usadas en radiofrecuencias, b) son sistemas con un gran ancho de banda inherente. Adicionalmente, actualmente se trabaja en la investigación y desarrollo de sistemas de comunicaciones FSO-WCS cuya operación adecuada enfrenta, entre otros, los siguientes problemas; a) se requiere tener “línea de vista”, b) es necesario el uso de un sistema muy preciso de sincronización espacial (ATP) que se implementa por ejemplo, sensando la dirección de un láser “faro” y/o del mismo haz láser de información (Guelman, et al, 2004). Para centrar la señal faro incidente en el sensor se han desarrollado técnicas como el uso de motores de pasos moviendo espejos en los que incide el faro, entre otras. Aquí reportamos la técnica de levitación magnética que a lo mejor de nuestro conocimiento no ha sido usada anteriormente en aplicaciones con WCS en espacio libre. Reportamos asimismo resultados obtenidos en un enlace FSO-clásico y el diseño de las antenas ópticas requeridas.

Diseño de enlaces en espacio libre:

El primer paso es determinar la viabilidad respecto a potencia óptica disponible que en enlaces ópticos clásicos se lleva a cabo mediante el cálculo denominado “presupuesto de potencia” (ecuación 1) (Sánchez, et al, 2011). La potencia óptica recibida P_R en función de los elementos del enlace es:

$$P_R = P_0 - A_{tx} - A_{prop} - A_{atm} - A_{rx} \quad (1)$$

P_0 es la potencia media del láser; A_{tx} , A_{atm} , A_{rx} son las atenuaciones de transmisión (incluyendo pérdidas por acoplamiento, apuntamiento y atenuación en lentes transmisoras), la debida a las pérdidas por propagación, a fenómenos atmosféricos y turbulencia; y la atenuación de recepción (incluyendo pérdidas de acoplamiento, apuntamiento, atenuación en lentes receptoras y eficiencia de los foto-detectores), respectivamente. Las pérdidas asociadas a la transmisión-recepción son función de las eficiencias de antena transmisora y receptora, y de las aperturas de salida y entrada.

$$A_{rx} = \eta_T \eta_A \frac{4\pi A_T}{\lambda_T^2} \quad (2)$$

$$A_{rx} = \frac{A_R}{4\pi z^2} \eta_R \quad (3)$$

donde

η_T , η_A = eficiencia óptica del transmisor y de la apertura de la antena óptica transmisora.

A_T , A_R = área de apertura del transmisor y receptor, respectivamente.

λ_T = longitud de onda del transmisor.

z = distancia del enlace.

η_R = eficiencia de recolección del receptor.

En la figura 1, se muestran de manera general los aspectos más relevantes a considerar en el cálculo del presupuesto de potencia para enlaces ópticos clásicos y cuánticos en espacio libre. Para el cálculo del presupuesto de potencia en enlaces ópticos desarrollamos una herramienta computacional utilizando Matlab, específicamente la interfaz GUIDE (ver figura 2) (González, et al 2012). Los datos de entrada consisten de los parámetros del sistema transmisor, receptor y del canal atmosférico. Los parámetros de salida, se dividen en: parámetros de desempeño, herramienta de ayuda conceptual y proyecciones del enlace. En “Presupuesto de potencia” se presentan los posibles parámetros usados para determinar si el enlace óptico funcionará. El primero define la fracción de potencia óptica transmitida llegando al receptor y que debería ser mayor que la sensibilidad del mismo. El margen de potencia es la penalización de potencia (reducción señal a ruido) permisible.

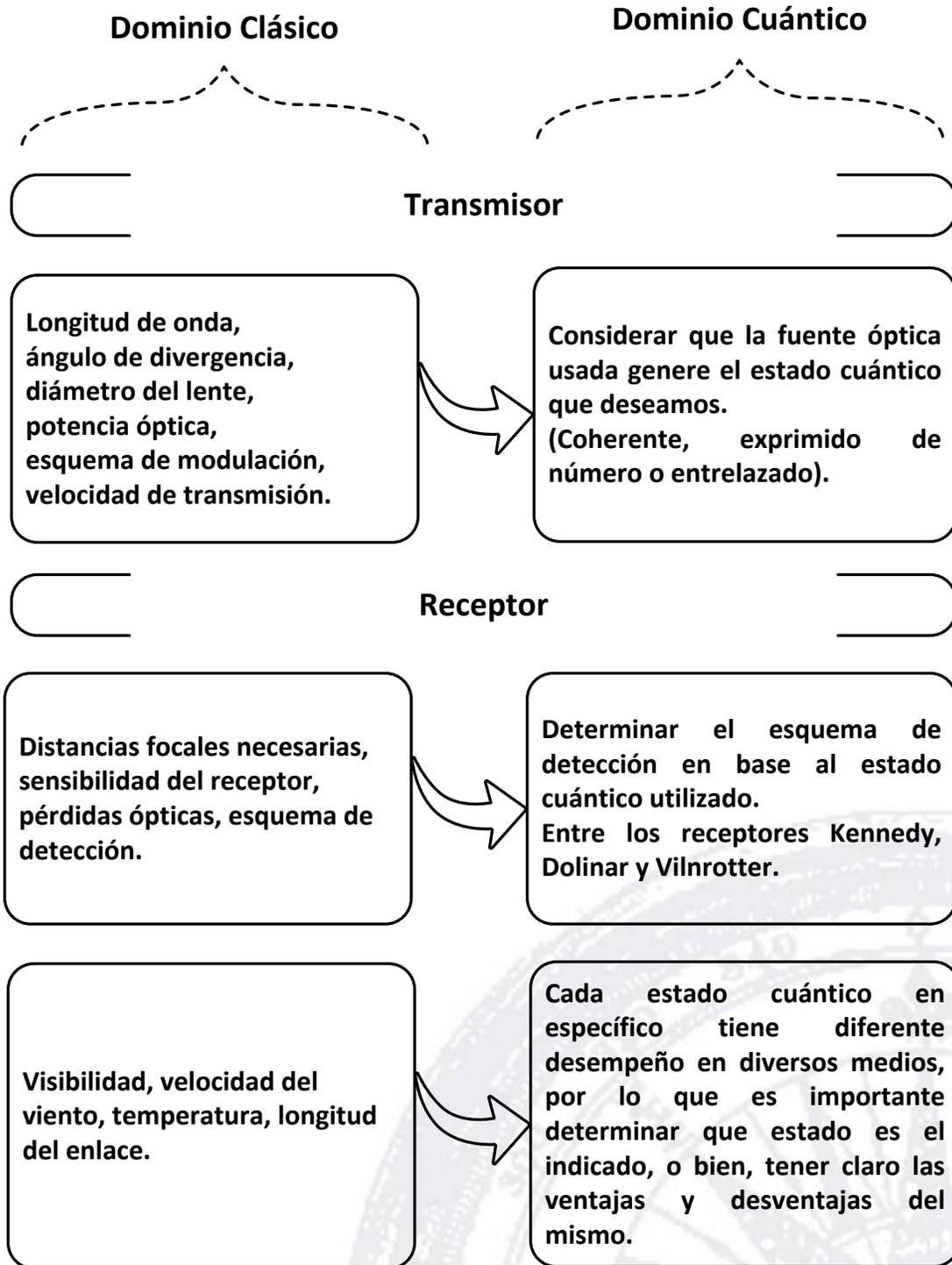


Figura 1. Principales parámetros a considerar en el diseño de enlaces FSO clásicos y cuánticos.

FSOPROGRAMABUDGET2

PRESUPUESTO DE POTENCIA FSO

Transmisor			Receptor			Parámetros del enlace		
Longitud de onda	1550e-9	m	Df. del lente de colimacion	40	mm	Geométricas	-55.139	dB
Longitud del enlace	200e3	m	Df. del telescopio	3556	mm	Propagación	-244.198	dB
Ángulo de divergencia	1e-3	rad	Sensibilidad	10e-15	W	Ganancia de ant. Rx	117.017	dB
Diámetro del transmisor	0.009	m	Diámetro del receptor	0.35	m	Perdi. Obscurecimiento	-2.888	dB
Potencia transmitida	200e-3	W	Pérdidas Rx	-2		Ganancia de ant. Tx	85.221	dB
Visibilidad	100	km	Margen	-2		Apuntamiento	-2.666	dB
Esquema de modulación	IM-DD		Radio del E. primario	0.175	m	Potencia transmitida	23.010	dBm
Velocidad	2.4e9	Hz	Radio del E. secundario	0.09	m	Atmosférica	-6.472	dB
Pérdidas Tx	-2	dB				Turbulencia	-0.969	dB
Tamaño del archivo	30e6	bit				Radio del spot	200	m
						Magnificación	88.9	
						EPS	3.937	mm

Presupuesto de potencia			Parámetros de desempeño		
Potencia recibida	-93.083	dBm	Capacidad del canal	22.2e9	bit/s
Sensibilidad	-110	dBm	Tiempo de transmisión	0.0013	seg
Margen de disponibilidad	19.804	dBm	BER	0.498	
Ptx mínima	3.206	dBm	Número de fotones	0.0015	

Extras	
Pérdidas geométricas	Ir
Longitud Vs BER	Crear

CALCULAR

Figura 2. Ejemplo de pantalla de la herramienta computacional de ingreso de datos para calcular el presupuesto de potencia de un enlace óptico horizontal en espacio libre.

Finalmente, se indica la potencia óptica mínima que debería enviar el transmisor con respecto a la sensibilidad del fotorreceptor. Se cuenta también con el apartado “Parámetros de desempeño” (capacidad del canal, tasa de bit erróneos (BER), tiempo de transmisión de algún archivo predefinido) donde todo esto está determinado por el esquema de modulación seleccionado, ya sean esquemas ópticos convencionales o cuánticos (por ejemplo los esquemas de Kennedy, Dolinar y Vilmrotter (Lau, et al, 2006)). Además, la herramienta tiene la sección “Extras”, con acceso a la descripción detallada de conceptos y parámetros (capacidad del canal, diversas pérdidas ópticas, diversas ganancias, entre otros) usados para cálculo del presupuesto de potencia. Se puede obtener también un conjunto de gráficas útiles (BER vs. longitud del enlace, pérdidas totales vs. longitud del enlace, pérdidas atmosféricas vs. visibilidad, entre otras).

Sistemas de Sincronización Espacial (ATP):

Los enlaces ópticos en espacio libre operan con “línea de vista” requiriendo “sincronía espacial” entre transmisor y receptor. Un sistema de sincronización espacial (ATP, por sus siglas en inglés) está compuesto de los subsistemas de adquisición (acquisition), rastreo (tracking) y apuntamiento (pointing) espacial de un haz óptico (Hemmati, 2006). Para establecer el enlace

óptico el transmisor debe ser apuntado apropiadamente al receptor. De manera similar, el receptor debe determinar la dirección de llegada del haz transmitido. El elemento de apuntamiento de un sistema realiza la función de redirigir la línea de vista tal que el sistema tenga acceso a un ángulo sólido grande para un apuntamiento inicial antes de la adquisición. Apuntamiento es la operación de apuntar el transmisor en la dirección correcta (hacia el receptor). Adquisición espacial es la operación del receptor de determinar la dirección de llegada del haz. El rastreo o seguimiento espacial es la operación de mantener el apuntamiento y la adquisición durante el periodo de comunicación. El subsistema de adquisición puede usar transmisión de un haz expandido como faro o un faro independiente (láser no modulado a una longitud de onda diferente a la del transmisor) que se coloca en el receptor. En un sistema bidireccional, cada transmisor puede servir como faro. Para sensar el faro pueden emplearse dispositivos de carga acoplada (CCD) y detectores de 4 cuadrantes p.i.n (QPIN) o fotodiodos de avalancha de cuatro cuadrantes (QAPD) (ambos con mayor sensibilidad y velocidad de respuesta que los CCD's) (Pisani, 2004). En los detectores de cuatro cuadrantes (fig.3) la señal óptica incidente es dividida en cuadrantes para obtener la posición de la señal rastreada en azimut y elevación de acuerdo a las ecuaciones (4) y (5). Para centrar la señal faro incidente en dichos dispositivos se han desarrollado técnicas como el uso de motores de pasos que mueven espejos en los que incide el haz; en un trabajo previo reportamos un sistema como éste (Mendieta, et al 2011), mientras en el presente trabajo reportamos la técnica de levitación magnética que a lo mejor de nuestro conocimiento no ha sido usada anteriormente en enlaces WCS con ventajas tales como no presentar desgaste mecánico, es silenciosa y sin problemas de fricción (Zhaohui, et al, 2005).

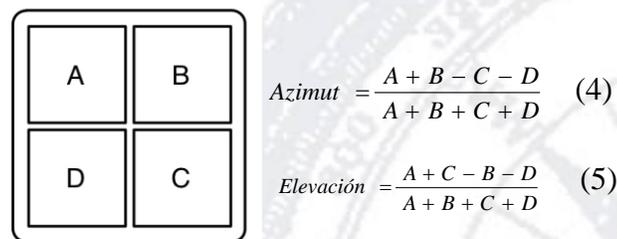
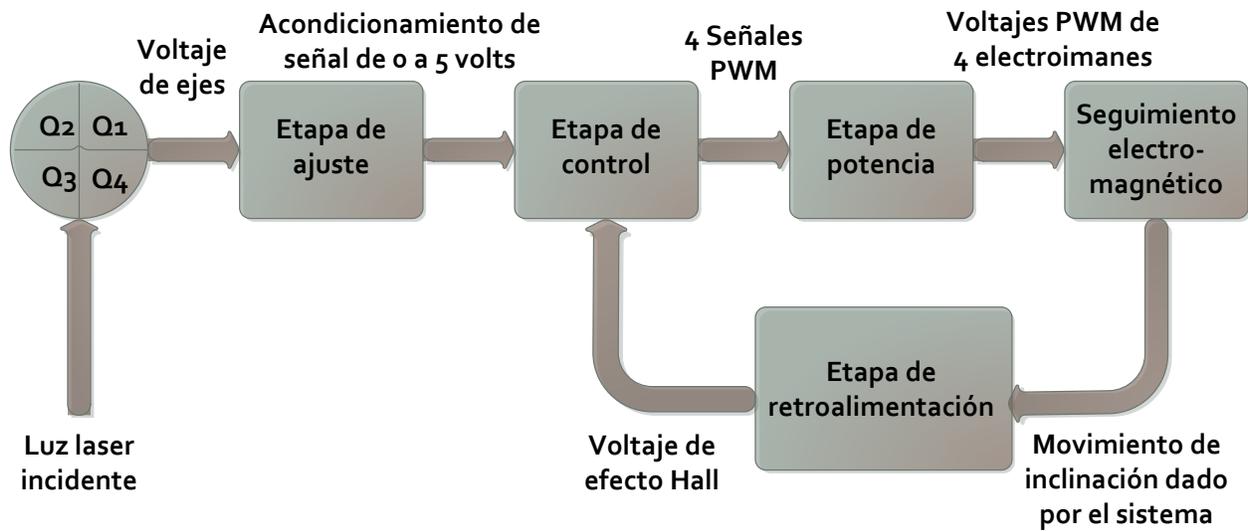


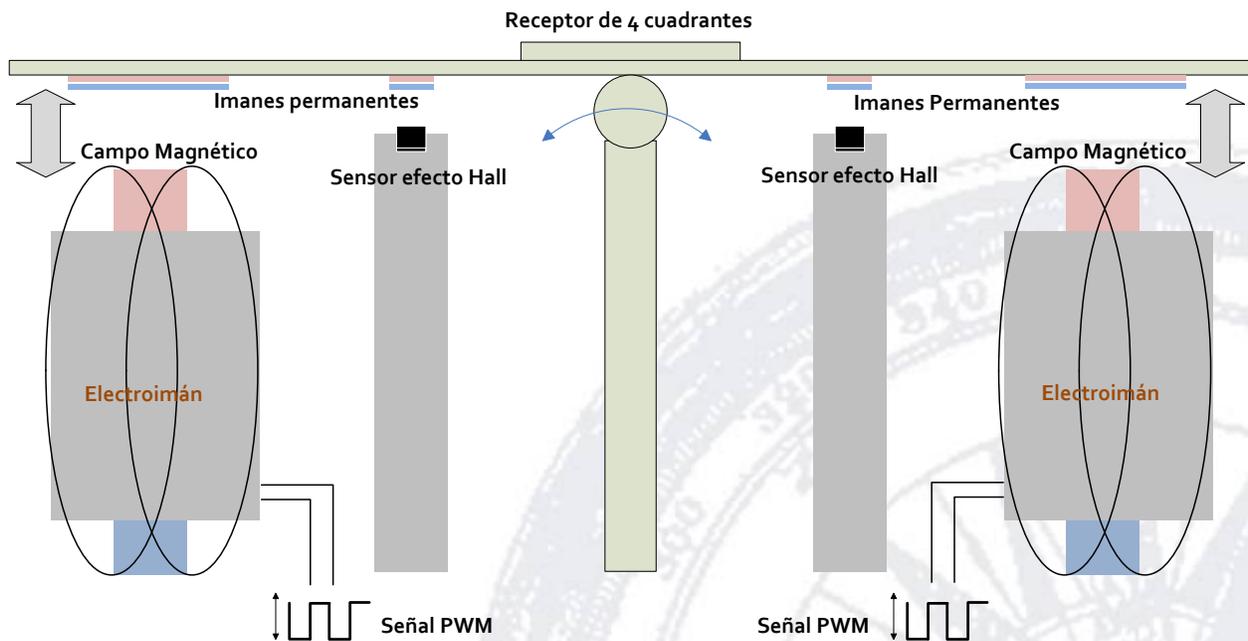
Figura 3. Detector de cuatro cuadrantes y ecuaciones de operación.

El sistema ATP consiste de un sensor de posición (QAPD) y un subsistema de levitación magnética. La figura 4a muestra el diagrama a bloques implementado con las etapas siguientes: a) recepción , b) acondicionamiento y digitalización, c) control , d) potencia , e)

retroalimentación, f) aislamiento eléctrico, g) entrada con amplificador de ganancia programable (PGA).



(a)



(b)

Figura 4. Sistema de levitación magnética, a) diagrama a bloques, b) subsistema de electroimanes.

En este sistema el haz láser incide en el QAPD cuyas salidas acondicionadas y digitalizadas se mandan a un microcontrolador para manipular una señal de modulación por ancho de pulso (PWM) que proveerá 4 salidas para una etapa de potencia que genera voltajes equivalentes a las señales PWM para cada uno de los 4 electroimanes que controlan los dos extremos de los ejes (horizontal y vertical) de los electroimanes manipulando la inclinación requerida por el sistema de seguimiento (Fig. 4b). Los sensores de efecto Hall encargados del seguimiento de la posición retroalimentarán la información al microprocesador para conseguir la estabilidad del sistema.

Antenas Ópticas:

La antena óptica transmisora es el elemento responsable de enviar al espacio libre un haz colimado capaz de recorrer grandes distancias con la menor divergencia posible. La antena óptica receptora colecta la energía proveniente de la fuente óptica en función de su apertura de entrada, ésta es guiada al sistema de detección mediante elementos ópticos convencionales o acoplada a fibra óptica. Cuando la luz se propaga a través del espacio libre experimenta pérdidas y modificaciones en su frente de onda (la turbulencia atmosférica distorsiona la fase del frente de onda que llega al receptor) (Arvizu, et al, 2010). En un sistema FSO-clásico, las antenas ópticas se diseñan en base a las leyes de la óptica geométrica y aproximaciones paraxiales pues las distancias del enlace permiten considerar plano al frente de onda en la recepción. Para un número reducido de fotones es necesario considerar la validez de estas aproximaciones en el diseño de antenas ópticas. La radiación electromagnética puede considerarse como trenes de onda que corresponden a los fotones emitidos en una transición atómica. Ya que la dualidad de comportamiento de la luz, onda - partícula, es puramente estadístico, como se ha demostrado en diversos experimentos (Mittelstaedt et al, 1987 Busch, 2006), y con la aproximación eikonal (Blandford, 2012), es posible demostrar que las líneas de universo de los fotones son los rayos que describen las trayectorias en los que están basados las leyes de óptica geométrica.

Entonces, el diseño de antenas en el dominio cuántico puede realizarse en principio con elementos de óptica clásica con ciertas precauciones (debido al bajo número de fotones es necesario reducir las pérdidas sobre todo en la recepción). En óptica clásica se utilizan arreglos de varias lentes para corregir aberraciones de frente de onda o de convergencia, lo que origina que los haces tengan varias transiciones al pasar de un elemento a otro, esto aumenta las pérdidas por reflexión y/o absorción. Es conveniente en el caso de bajo número de fotones disminuir el

número de elementos ópticos, y que tengan capas anti-reflejantes adecuadas para la longitud de onda de trabajo. Las figuras 5-6 muestran algunos tipos de antenas y su diseño para sistemas de comunicaciones FSO. Una antena de transmisión, presenta una menor divergencia del haz cuando el diámetro de transmisión es mayor, por lo que es recomendable expandir el haz antes de enviarlo al espacio libre. La antena receptora de las figuras 5b y 6a es un telescopio tipo Cassegrain, muy utilizados en enlaces de espacio libre como antenas emisoras y/o receptoras, debido a su apertura de entrada en relación con su distancia focal efectiva, permitiendo tener aperturas mayores con reducido tamaño.

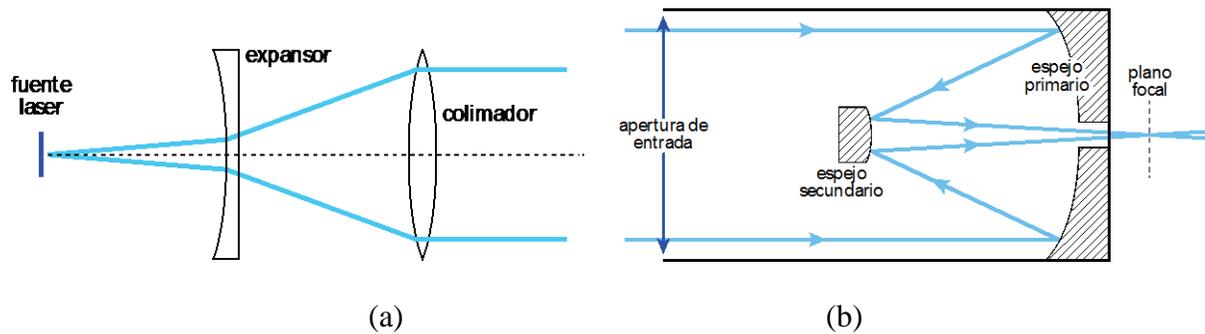


Figura 5. Antenas ópticas para a) transmisión, b) recepción.

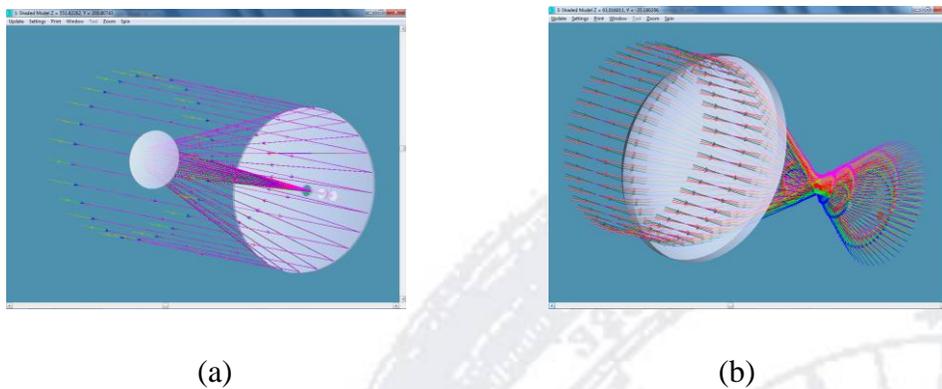


Figura 6. Diseño de antenas ópticas a) tipo Cassegrain, b) recepción en gimbal.

Enlace FSO clásico implementado:

Previo a implementar un sistema FSO-WCS es conveniente desarrollar y caracterizar un enlace FSO clásico en el cual existen diversas alternativas de modulación y/o detección, siendo la modulación de intensidad y detección directa (MI/DD) la más popular por su relativa sencillez de implementación (aunque para enlaces FSO-WCS es mejor opción la detección coherente (de mayor complejidad pero mejor sensibilidad (López, 2013))). La figura 7 muestra el diagrama a

bloques del enlace MI/DD implementado con un faro óptico de 532 nm en onda continua apuntado hacia un QAPD montado sobre el sistema ATP de levitación magnética. Ya que se logra la sincronización espacial se envía la señal de información (láser modulado en intensidad de 830 nm y 200 mW de potencia óptica promedio) hacia un fotodiodo de avalancha (APD). Se usan manejadores (drivers) para el faro óptico y el láser de información. La selección de cada uno de los componentes empleados depende de diversos factores, entre otros el costo, disponibilidad, etcétera. Con éstos debe determinarse la viabilidad de los enlaces de subida (faro óptico) y de bajada (datos) con la herramienta arriba descrita. La tabla 1 resume los parámetros más importantes empleados en dichos cálculos. En cuanto a las antenas ópticas, para el enlace de bajada se utiliza una antena colimadora esférica, que permite acercarse al límite de difracción de propagación al no introducir aberraciones esféricas al frente de onda. En el plano focal de la antena receptora se coloca el APD que recibirá la energía recolectada por la apertura de la antena receptora. Para el enlace de subida (láser @532 nm (verde)) se utiliza una antena colimadora. La antena receptora del enlace de subida es una antena convergente que enfoca el láser en el QAPD. En este módulo, el láser emisor y el receptor comparten el mismo camino óptico y la misma apertura de 50 mm, permitiendo una mejor alineación y un espacio más reducido; los haces se separan mediante un divisor de haz tipo dicróico. El espacio libre es un canal de comunicaciones cuyas pérdidas más importantes a considerar son dependientes de las condiciones atmosféricas. Este tipo de pérdidas en enlaces horizontales dentro de la misma capa atmosférica pueden relacionarse al rango meteorológico de visibilidad en unidades de longitud (Arvizu, 2012). Este parámetro puede ser obtenido en diversas “páginas” de Internet que proporcionan el pronóstico meteorológico, por ejemplo, Weatherchannel (<http://www.weather.com/weather/today/MXBC0003:1>). Este dato (que considera entre cosas el efecto de la turbulencia óptica sobre el haz) es incluido en la herramienta de cálculo del enlace. Otras pérdidas consideradas en nuestro cálculo son las pérdidas geométricas y por propagación que son (Arvizu, 2012, Sánchez, et al 2011, Hemati, 2006) ocasionadas por la expansión del haz al viajar a través del espacio libre equivalente a una redistribución (dispersión) espacial de la energía óptica radiada limitando a su vez la energía óptica que podrá ser capturada por el área de recolección de la antena óptica receptora. Otros parámetros que son incluidos en el cálculo del enlace son las diferentes eficiencias de acoplamiento entre lentes y fibras ópticas. Las velocidades de bit que empleamos en nuestros cálculos son del orden de los Kilobits por segundo

ya que los enlaces cuánticos (como los usados para QKD) utilizan de este orden de velocidades además existe un compromiso entre la relación señal a ruido, la tasa de bit erróneo y el número de fotones por bit (potencia óptica disponible) de acuerdo al límite de Holevo (Hemmati, 2012). En los resultados experimentales mostramos el sistema operando a 1 Kbps y 5 Kbps (a una distancia de 500 metros) como demostración de su funcionamiento, si bien es de esperarse que el enlace sea capaz de operar adecuadamente a varias decenas de Kilómetros con estas potencias y sensibilidades ópticas, velocidades de bit y con condiciones óptimas de visibilidad con una tasa de bit errónea $\leq 10^{-6}$ (valor típico en este tipo de enlaces). La velocidad de bit también puede incrementarse hasta algunas decenas de Mbps pues tanto el manejador de datos del láser de información como el APD correspondiente tienen el ancho de banda suficiente, en cuyo caso se requiere recalcular el enlace en lo referente a distancia máxima vs. BER y sensibilidad del APD. Las figuras 8, y 9 muestran fotografías con diversos detalles de dicho enlace.

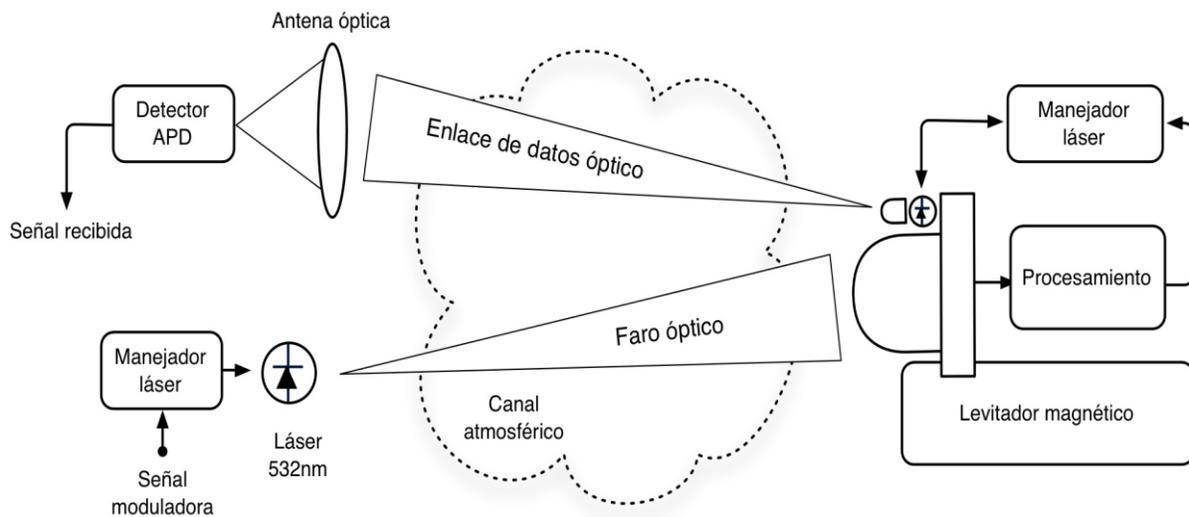


Figura 7. Diagrama a bloques del enlace FSO clásico implementado.

Tabla 1 Parámetros más importantes del enlace FSO clásico implementado.

Parámetro	Valor
Enlace de Bajada @ 830 nm (Datos)	
Antena del Transmisor (colimadora esférica)	Apertura de salida: Diámetro (D_{Tx})=4.95mm Distancia focal efectiva (DFE)=4.51mm Diámetro de Haz (DiamHaz)= 4mm
Antena del Receptor tipo Cassegrain	Diámetro (D_{Rx})=355.6mm Distancia focal efectiva (DFE)=3556mm Área central de obstrucción=180mm
Potencia óptica promedio del láser	200 mW
Sensitividad del receptor APD @ 830 nm	-30 dBm
Enlace de Subida @ 532 nm (Faro)	
Antena del Transmisor (colimadora)	Antena, apertura de salida: Diámetro (D_{Tx})=25.4mm Distancia focal efectiva (DFE)=30mm Diámetro de Haz (DiamHaz)= 8mm
Antena del Receptor	Diámetro (D_{Tx})=50mm, Distancia focal efectiva (DFE)=40mm
Potencia óptica promedio del Faro	250 mW
Sensitividad (por cuadrante) del receptor de cuatro cuadrantes @ 532 nm	-30 dBm



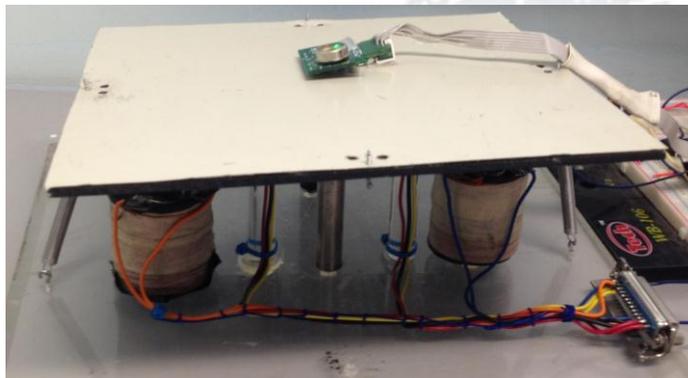
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8. Faro óptico visto desde: a) receptor, b) transmisor, c) enfocado en el detector de cuatro cuadrantes, d) prototipo de sistema de levitación magnética con el detector de 4 cuadrantes.



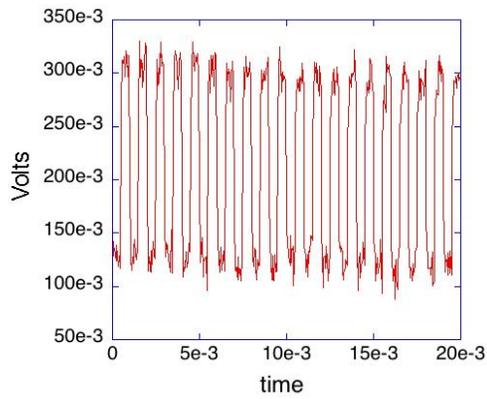
(a)



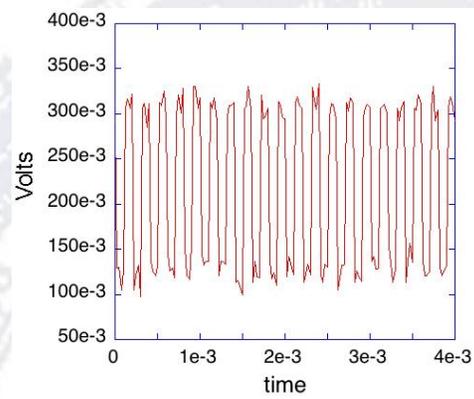
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 9. a) Transmisor infrarrojo y faro óptico con antena óptica, b) receptor infrarrojo basado en APD, c) etapa de montaje del transmisor. Señales de datos típicas recuperadas por el APD; d) @ 1Kbps, e) @ 5 Kbps.

Conclusiones.

En este trabajo hemos presentado la metodología de diseño e implementación de un enlace FSO-clásico empleando un láser de 830 nm modulado digitalmente en intensidad (con datos de 1 Kbps y 5 Kbps) y con un faro óptico de onda continua a 532 nm que es rastreado con un sistema ATP (basado en el uso de un detector de cuatro cuadrantes y levitación magnética), así como las etapas de detección y antenas ópticas requeridas. Varios de estos subsistemas los emplearemos para la implementación de un enlace FSO-WCS diseñado para comunicación entre una estación-terrena y un satélite de órbita baja (Gutiérrez, 2013). Es conveniente mencionar que este tipo de enlaces están en el estado del arte de las comunicaciones ópticas y que la propuesta aquí descrita es preliminar. La figura 10 muestra el diagrama a bloques del enlace cuántico a implementar.

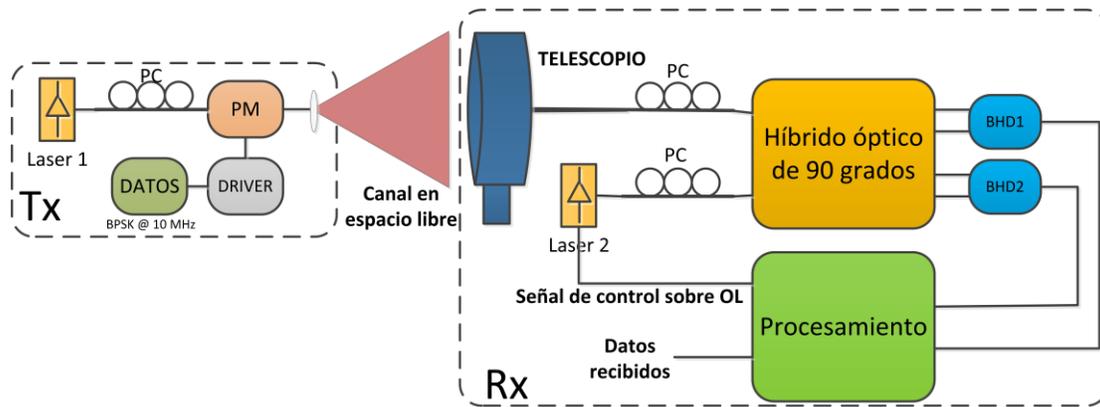


Figura 10. Diagramas a bloques del enlace cuántico a implementar, Tx: transmisor, Rx: Receptor, PM: modulador de fase, PC: controlador de estado de polarización, BHD1, 2: fotodetectores homodinos balanceados 1 y 2 respectivamente, OL: oscilador local.

El transmisor propuesto (arriba del satélite) consistirá de una fuente óptica clásica con modulación de fase binaria para “bajar” datos de una cámara de percepción remota operando a 10 Mbps (Gutiérrez, 2013). La señal modulada, al propagarse a través del espacio libre se atenuará de tal forma que llegará al receptor como una señal de niveles cuánticos (el receptor es capaz de funcionar también con niveles clásicos). El receptor en tierra consistirá de una antena óptica telescópica para captar la señal cuántica hacia un receptor digital coherente basado en un lazo de Costas cuántico (López, et al 2012, López et al 2013). El receptor digital coherente consistirá de un híbrido óptico de 90 grados, etapas de fotorrecepción balanceada (BHD’s) y procesamiento digital de señal postdetección así como un oscilador local óptico. El híbrido óptico tiene por función acoplar las señales ópticas de datos y oscilador local para obtener las componentes en

fase y cuadratura del campo óptico de información (al ser fotodetectados) que serán procesados digitalmente para recuperar los datos y mantener la diferencia de frecuencia entre el oscilador óptico local y el campo óptico de información dentro del ancho de banda de los fotorreceptores balanceados. Para establecer y mantener el enlace operando mientras el satélite esté en línea de vista con la estación terrena se enviará una señal de faro óptico (no mostrado en la figura) a 532 nm (aunque se ha considerado también el empleo de 1060 nm para no interferir con la cámara de percepción remota) que se sincronizará en el receptor en el satélite mediante un sistema ATP como el desarrollado en este trabajo. A la fecha hemos realizado algunas pruebas preliminares sobre varios de los subsistemas en un enlace FSO-WCS (López, Aguilar et al, 2013), en las figuras 11 y 12 se muestran los puntos geográficos donde se realizó el experimento así como algunas fotos de dicho enlace.

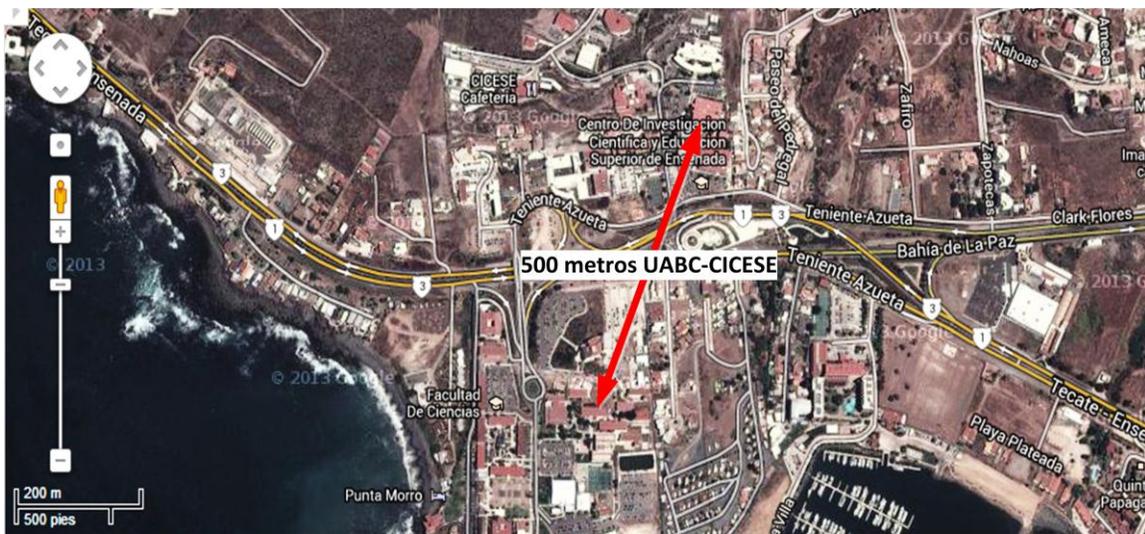


Figura 11. Esquema de localización del enlace óptico aéreo con una longitud de 500 m entre el CICESE y la Universidad Autónoma de Baja California, UABC, (campus El Sauzal, Ensenada, B.C., México).



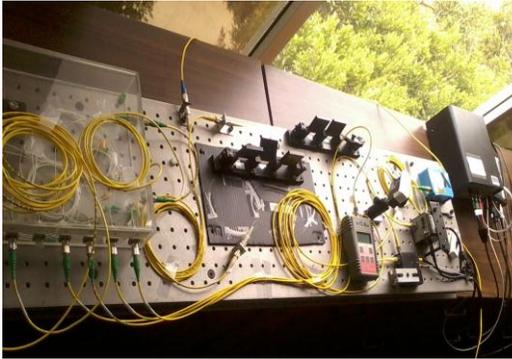
(a)



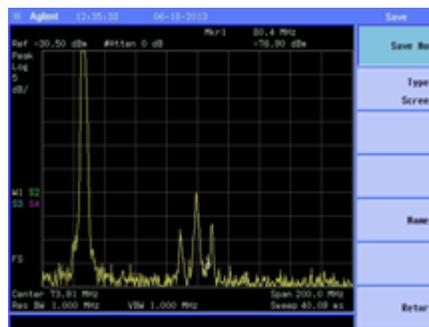
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 12. Enlace FSO-WCS. a) Transmisor infrarrojo y faro óptico con antena óptica, b) sistema optomecánico y electrónico del transmisor, c) receptor coherente usando PIN, d) sistema optomecánico y electrónico del receptor, e) señal de frecuencia intermedia (77 MHz) con datos (10 Mbps) obtenida por el receptor coherente.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado con recursos de un proyecto del CONACYT. Agradecemos a Yudith Florencia González Padilla del CUJAE de la Habana, Cuba, su participación en la elaboración de la herramienta computacional.

Referencias

Arvizu A., Sánchez J. de D, Mendieta F.J., (2010). Coherent Optical Wireless Link Employing Phase Estimation with Multiple-Beam, Multiple-Aperture, for Increased Tolerance to Turbulence. IEICE Trans. On Comms., VOL.E93-B, NO.1 January, 226-229.

Arvizu Mondragón, Arturo (2012), Curso: Diseño de pequeños satélites. 1er. Congreso Latinoamericano de Ciencia y Tecnología Aeroespacial, 17-21 septiembre, San Luis Potosí, SLP, México. SOMECYTA.

Blandford R. D., Thorne K. S., (2012). Applications of Classical Physics. CalTech.

Busch P., Shilladay C. (2006). Complementarity and uncertainty in Mach-Zehnder interferometry and beyond. Physics Reports, Vol. 435 (1). 1-31.

ESA (European Space Agency), Homepage, 2014, <http://www.esa.int/esasearch?q=silex>. (8 de abril 2014).

F. E. Becerra, J.Fan, G. Baumgartner, J.Goldhar, J.T.Kosloski, and A. Migdall, Experimental demonstration of a receiver beating the standard quantum limit for multiple nonorthogonal state discrimination, Nature Photonics, 6 january 2013, 1-6.

Fsona, 2014, http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso_guide (8 de abril 2014)

González P.Y.F., López L. J. A., Arvizu M. A., Mendieta J.F.J., Santos A. J., García C. E., Conte G.R. (2012). Herramienta para evaluación del presupuesto de potencia óptica en enlaces de comunicaciones clásicas y cuánticas en espacio libre. ROC&C 2012, 11-15 Noviembre. Acapulco, Gro., México.

Guelman, M., Kogan, A., Kazarian, A., Livne, A., Orenstein, M., Michalik, H. (2004). Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communications. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 40, Issue: 4, 2004, 1239 – 1248.

Gutiérrez Martínez Celso, Viñals Padilla Sergio, Gutiérrez Santillán Saúl, Mendieta Jiménez Francisco, editores, Diseño y especificación inicial microsátelite mexicano SATEX 2, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aeroespacial (Somecyta), México, 2013, ISBN:978-607-95625-2-6.

Hemmati H. (2006). Deep Space Optical Communications. Wiley-Interscience, 1st-edition USA.

Hemmati H., Dolinar S., Quantum Limits of Space-to-Ground Optical Communications, CLEO Technical Digest 2012, JTh3K.2.pdf

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), Homepage, 2014, http://www.jaxa.jp/projects/sat/oicets/index_e.html (8 de abril 2014)

Lau C.W., Vilmrotter V. A., Dolinar S., Geremia J. M., Mabuchi H. (2006). Binary Quantum Receiver Concept Demonstration. IPN Progress Report 42-165, May 15, 2006.

López L. J. A., Mendieta J. F. J., García C. E., Arvizu A. M. (2011). Comunicaciones cuánticas con aplicaciones satelitales. 2do Cong. Int. La investigación en el Posgrado, 20-21 Octubre. Aguascalientes, Aguascalientes, México.

López L. J. A., Arvizu A. M., García C. E., Mendieta J. F. J., Alvarez G. E., Gallion, P. (2012). Detection of phase-diffused weak-coherent-states using an optical Costas loop. Optical Engineering. 51(10).

López Leyva, J. A., A. Arvizu Mondragon, J. R. Zavala Zazueta, M. Velázquez Centeno, A. Farías Salazar, J. Santos Aguilar, F. J. Mendieta Jimenez, R. Muraoka Espiritu y E. Garcia Cardenas (2013), Preliminary results of the first optical quantum communication in Mexico: 2 photons/ bit at 5 Mbps using 62 and 125 Km in a commercial optical network, IEEE Summer Tropicals 2013, 08-10 Julio, Waikoloa, Hawaii, Estados Unidos.

López Leyva, J. A., Santos Aguilar J., Arvizu Mondragón A., Sánchez López, J. D. D. , León Luna, J. L., Ortiz Huerta E. y Ortiz Alcalá F. J. (2013) Pruebas de campo de un subsistema de comunicación óptica cuántica coherente para QKD en espacio libre. pp. 15, Informe técnico CICESE PA: 106184.

Mendieta J. F. J., Arvizu M. A., Muraoka E. R., Pacheco C. E., Murrieta L. J. C., Sánchez G. J. A., Gutiérrez A. J. A. (2011). Optical communications payload for the Mexican Nanosatellite Project SENSAT. ICSOS-2011, 11 - 13 mayo. Santa Monica, Ca., USA.

Mittelstaedt P., Prieur A., Schieder R. (1987). Unsharp Particle-Wave Duality in a Photon Split-Beam Experiment. Foundations of Physics, Vol. 17, No. 9. NASA Goddard Space Flight Center 2014, <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271.html> (8 de abril 2014).

Pisani, M. (2004). Four quadrant photo-detector with ultra high common mode rejection ratio and ultra narrow gap. LEOS 2004. Volume: 1, 51 - 52.

Sánchez L. J. D. D., Arvizu M. A., Mendieta J. F. J. , Nieto H. J. I. (2011). Trends of the optical wireless communications. En: Advanced Trends in Wireless Communications. In-Tech. ISBN: 978-953-307-183-1.

Savage, Neil, Linking with light, IEEE Spectrum Magazine, August 2002, 32-36.

Chan, Vincent W. S., Optical Satellite Networks, IEEE Journ of Lightw.Techn., VOL. 21, NO. 11, Nov. 2003, 2811 – 2827.

Shim Y., Milner S. D., Christopher C. D. (2007). A Precise Pointing Technique for Free Space Optical Networking. IEEE MILCOM 2007, 1-7.

Wang, Ke, Nirmalathas, Ampalavanapillai, Lim, Christina and Skafidas, Efstratios, High-Speed Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. IEEE Phot.Techn.Lett., VOL. 23, NO. 8, Ap. 15, 2011, 519-521.

Weatherchannel:<http://www.weather.com/weather/today/MXBC0003:1>, (8 de abril 2014)

Xiao-song Ma, William Naylor, Thomas Herbst, Alexandra Mech, Thomas Scheidl, Daqing Wang, Bernhard Wittmann, Sebastian Kropatschek, Johannes Ko, Elena Anisimova, Vadim Makarov, Thomas Jennewein, Rupert Ursin and Anton Zeilinger, Quantum teleportation using active feed-forward between two Canary Islands, Nature 489, 269 (2012), 17 May 2012, 1-9.

Zhaohui R., Stephens L.S.(2005). Closed-loop performance of a six degree-of-freedom precision magnetic actuator. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume: 10, 2005, 666-674.

