



Sistema de sincronización óptica espacial para comunicaciones ópticas en satélites pequeños operando en órbita baja

Optical Spatial synchronization system for optical communications on small satellites operating in low-earth orbit

Arvizu-Mondragón Arturo

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

Correo: arvizu@cicese.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6926-2197>

Santos-Aguilar Joel

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

Correo: jsantos@cicese.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9063-8715>

Domínguez-Retamoza Efrén Antonio

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

Correo: edomingu@cicese.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4633-9125>

Muraoka-Espiritu Ramón

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México

Correo: rmuraoka@cicese.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4748-0841>

Nuñez-Alfonso Juan Manuel

Universidad Nacional Autónoma de México

Correo: jnunez@astro.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4097-0063>

Meza-Pérez Jacobo

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México

Correo: jmeza@inaoep.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4854-0896>

Gutiérrez-Martínez Celso

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), México

Correo: cgutz@inaoep.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2985-5681>

López-Leyva Josue Aarón

CETYS Universidad, México

Colegio de Ingeniería

Correo: josue.lopez@cetys.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3004-5686>

Resumen

En este trabajo reportamos el desarrollo de un sistema de sincronización óptica espacial para satélites pequeños operando en órbita baja (LEO). Este sistema se requiere para un enlace de comunicaciones ópticas satélite-estación terrena. Como parte fundamental, se diseñó e implementó una montura de precisión gimbal con dos grados de libertad controlada por tornillos de ajuste fino y un algoritmo ad-hoc. Se generó en laboratorio una estrella artificial utilizando una fuente láser, fibra monomodo y un telescopio astronómico. Utilizando dicha estrella es posible, sin lanzar el satélite, certificar el buen desempeño del gimbal respecto al seguimiento de un faro láser artificial en pruebas de laboratorio. Reportamos asimismo la caracterización del desempeño del subsistema Gimbal en enlaces ópticos atmosféricos. Por otro lado, como base para este diseño, se considera que previamente a la adquisición del faro se llevaría a cabo mediante las etapas de RF, GPS y sistema de actitud, los cuales formarían parte de la plataforma del satélite bajo diseño. Así, las efemérides de la trayectoria satelital son parte fundamental en la etapa de apuntamiento, rastreo y seguimiento inicial del sistema. Debido a la complejidad del sistema reportado en este escrito, se requirió la participación de especialistas de diversas instituciones tales como el CICESE, el INAOE, Cetys-Universidad Ensenada y el Observatorio Astronómico Nacional de la UNAM. Los subsistemas reportados en este trabajo se desarrollaron dentro del marco de un proyecto con Fondos de la Agencia Espacial Mexicana.

Descriptor: Gimbal, seguimiento, adquisición, rastreo, faro óptico.

Abstract

In this paper, we report the development of a spatial optical synchronization system required in small satellites operating in low-earth orbit to establish an optical communication link between the satellite and an earth station. As a fundamental part of this system, we designed and implemented a precision gimbal with two degrees of freedom controlled by fine adjustment screws and an ad-hoc algorithm. We generate in the laboratory an artificial star using a laser source, monomode fiber and an astronomical telescope. Before that the satellite be eventually placed in orbit, it is possible to certify the good performance of our gimbal with respect to the tracking of an optical beacon using such artificial star in laboratory tests. We also report the characterization of the performance of our gimbal subsystem in atmospheric optical links. On the other hand, as a basis for this design, we took into account that prior to the acquisition of the optical beacon a coarse tracking process would be carried out through the RF, GPS and attitude system stages, which would be part of the platform of the satellite under design. Thus, the ephemerides of the satellite trajectory are a fundamental part in the process of acquisition, tracking, and initial pointing of the system. Due to the complexity of the system reported in this paper, the participation of specialists from various institutions such as CICESE, INAOE, Cetys Universidad campus Ensenada and the National Astronomical Observatory-UNAM in Ensenada, B.C., Mexico, was required. We developed the subsystems reported in this paper within the framework of a project with funds from the Mexican Space Agency.

Keywords: Gimbal, acquisition, tracking, pointing, optical beacon.

INTRODUCCIÓN

Los enlaces de comunicaciones ópticas espaciales (entre uno o varios satélites con una o varias estaciones terrenas) pueden realizarse a través de la atmósfera terrestre y el espacio exterior (Figura 1). En este tipo de enlaces se utilizan normalmente láseres como fuentes emisoras y etapas de fotodetección como elementos receptores requiriendo el uso de antenas ópticas (telescopios y lentes) tanto en la etapa transmisora como en la receptora (Figura 2). Una característica importante de los sistemas de comunicación óptica atmosférica es el requerir “línea de vista” para poder operar adecuadamente (Figura 1). Para lograr esta línea de vista se realiza en primer lugar la operación de apuntamiento y rastreo grueso entre transmisor y receptor, para lo cual pueden utilizarse las etapas de RF, GPS y sistema de actitud cuando son incluidas en la plataforma del satélite; las efemérides de la trayectoria satelital son entonces parte fundamental en la etapa de apuntamiento, rastreo y seguimiento inicial del sistema. Una vez que se consigue la línea de vista para establecer un enlace óptico satelital, se requiere un sistema de sincronización óptica espacial, también denominado sistema de apuntamiento, adquisición y rastreo (o ATP por sus siglas en inglés, *Acquisition Tracking and Pointing*), que usa comúnmente un haz óptico no modulado (faro óptico). Además, dado que dicho sistema debe operar en la atmósfera terrestre, su buen desempeño puede verse limitado por la atenuación del faro óptico ocasionada por la presencia

de moléculas de gas y aerosoles (y en algunos casos, debido a la presencia de contaminantes) además de la turbulencia óptica (Andrews & Phillips, 2005), (Figura 3). Los sistemas de sincronización óptica espacial empleados para satélites medianos o de mayor tamaño, así como aquellos que se emplean en enlaces ópticos terrestres pueden ser considerados como una tecnología madura; sin embargo, la investigación y desarrollo tecnológico de dichos sistemas aún continúa a nivel internacional de forma importante, principalmente (aunque no exclusivamente) para enlaces de satélites de menores dimensiones tanto para comunicaciones clásicas como cuánticas (Chang *et al.*, 2019; Rose *et al.*, 2018; Abrahamson *et al.*, 2015; Kaymak *et al.*, 2018). Es en este último punto donde se encuadra el trabajo aquí presentado y en el contexto de un proyecto desarrollado con Fondos de la Agencia Espacial Mexicana.

SISTEMAS DE SINCRONIZACIÓN ÓPTICA ESPACIAL

Un sistema de sincronización óptica espacial (ATP) está formado por tres subsistemas: de adquisición (*Acquisition*), de rastreo (*Tracking*) y de apuntamiento espacial (*Pointing*) de un haz óptico (Hemmati, 2006; Lambert & Casey, 1995). Generalmente se establece una secuencia determinada para llevar a cabo esta operación, por ejemplo (Arvizu *et al.*, 2018):

- a) **Apuntamiento grueso:** El sistema de apuntamiento en tierra se basa tanto en las efemérides como en la

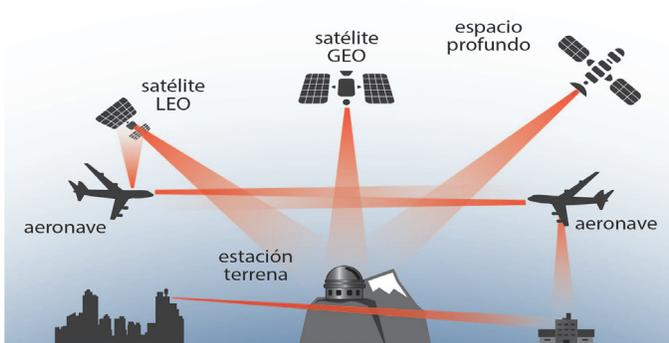


Figura 1. Enlaces ópticos en espacio libre

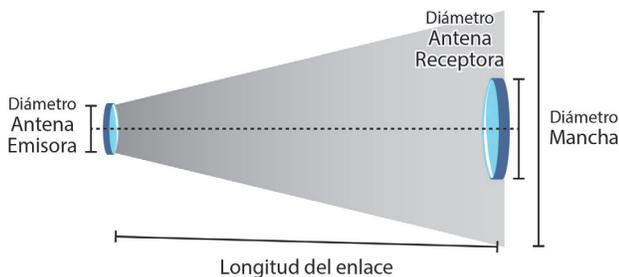


Figura 2. Antenas ópticas transmisora y receptora



Figura 3. Perturbaciones en un canal de comunicaciones óptico atmosférico

información del GPS a bordo del satélite y del enlace RF de telemetría del mismo para determinar el momento adecuado y la dirección hacia la cual debe ser apuntado el faro óptico. Para establecer el enlace óptico el transmisor debe ser apuntado apropiadamente al receptor, el cual 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. En general, el haz del faro óptico enviado en esta etapa debe ser lo más ancho posible para que alcance a iluminar por completo al satélite. Si el satélite es capaz de ubicar el faro óptico, esto permite el inicio de la sincronización espacial (Figura 4).

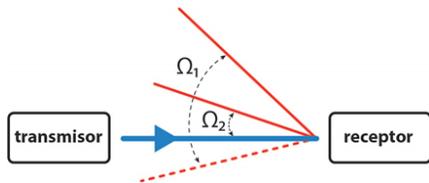


Figura 4. Apuntamiento grueso. Ω_1, Ω_2 , ángulo inicial y final, respectivamente

b) Adquisición espacial: La operación de mantener el apuntamiento y la adquisición durante el periodo de comunicación se denomina rastreo o seguimiento espacial, para esto puede transmitirse un haz expandido como faro óptico 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 (Figura 5). El faro puede ser sentido con diversas técnicas; empleando dispositivos de carga acoplada (CCD's, charge coupled devices) y los fotodetectores de 4 cuadrantes p.i.n o de avalancha (QPIN o QAPD). Los detectores de cuatro cuadrantes tienen, en general, una sensibilidad muy alta y mejor velocidad de respuesta que los CCD's, por ello se seleccionó un detector de cuatro cuadrantes, cuyo funcionamiento puede describirse usando la Figura 6, considerando que incide una señal óptica sobre el detector y la intensidad detectada en cada uno de sus cuadrantes que se emplea para obtener la posición de dicha señal en azimuth y elevación, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2). El objetivo de un sistema ATP es obtener y mantener el nivel óptico de potencia óptica incidente, en primer lugar, en el centro del fotodetector de cuatro cuadrantes y posteriormente, en un fotodetector empleado para el enlace de comunicaciones. Para esto, se requiere el ajuste dinámico de la posición del haz incidente en el fotodetector que puede lograrse de diversas formas, por ejemplo, usando motores de pasos que mueven espejos en los que incide el haz (Mendieta *et al.*, 2001), sistemas de levitación magnética (Morán *et al.*, 2013) o mediante el uso de monturas gimbal (Figura 7) entre otras. En particular, en este trabajo se seleccionó la montura gimbal (Arvizu *et al.*, 2018).

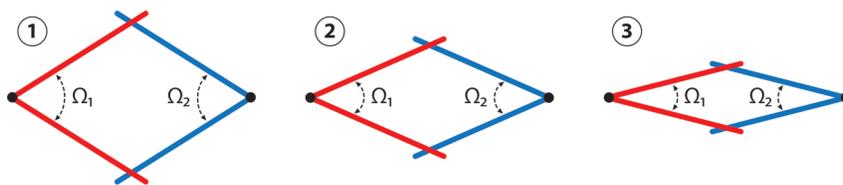


Figura 5. Sistema bidireccional. Ω_1, Ω_2 , ángulos del faro del transmisor 1 y 2, respectivamente



$$\text{Azimuth} = \frac{A + D - B - C}{A + B + C + D} \quad (1)$$

$$\text{Elevación} = \frac{A + B + C + D}{A + B + C + D} \quad (2)$$

Figura 6. Fotodetector de cuatro cuadrantes (ABCD)



Figura 7. Ejemplo de montura gímbal

TÉCNICAS DE SEGUIMIENTO ESPACIAL

El proceso de rastreo o seguimiento espacial puede realizarse de diversas formas (Lambert & Casey, 1995):

a) **Continuo en espiral:** Es la técnica más eficiente para cubrir el área de incertidumbre. El ancho de la espiral estará determinado por la divergencia del haz y el área de incertidumbre (Figura 8a). Las ecuaciones para este rastreo son:

$$X_s = V_r \cos(V_\theta t) \tag{3}$$

$$Y_s = V_r \sin(V_\theta t) \tag{4}$$

Donde X_s, Y_s son la posición de los ejes X y Y, respectivamente, velocidad radial V_r y velocidad angular V_θ , están dadas por:

$$V_r = \frac{R_{max}}{T_{max}} = \frac{\text{Máxima distancia radial recorrida}}{\text{Tiempo máximo}} \tag{5}$$

$$V_\theta = \frac{2\pi N}{T_{max}} = \text{Velocidad angular} \tag{6}$$

Donde N es el número de anillos de la espiral.

- b) **Por barrido:** Consiste en rastrear un eje a lo largo del área determinada e incrementar el otro eje al final de dicha área. El primer eje se regresa entonces en la dirección contraria (Figura 8b). Este barrido puede ser descrito como una función discontinua consistente de N escaneos horizontales y $N - 1$ pasos verticales. Este rastreo, más lento que el continuo en espiral, es menos utilizado para sistemas de comunicaciones ópticas por espacio libre.
- c) **Espiral por pasos:** Consiste en una mezcla de las 2 técnicas anteriores (Figura 8c). Se requiere que tenga una velocidad lineal constante e incrementar un eje cada determinada distancia.

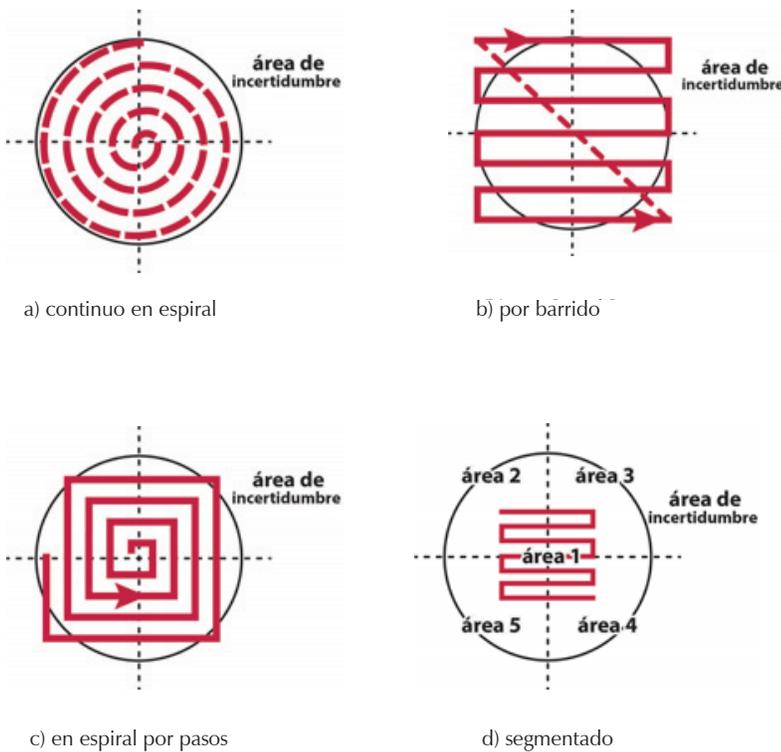


Figura 8. Técnicas de rastreo

Segmentado: El rastreo se divide en segmentos o secciones del área de incertidumbre (Figura 8d). Se rastrea primero la sección que tiene mayor probabilidad de detección espacial, que es el centro del detector y después las secciones de alrededor.

ESTRELLA ARTIFICIAL

Para caracterizar al subsistema ATP motivo de este trabajo, se utiliza el método de estrella artificial que se emplea comúnmente en instrumentación astronómica, donde una estrella artificial se construye utilizando una fuente de luz blanca, un sistema formador de imagen, un orificio muy pequeño (*pinhole*) y un filtro (Malacara & Welford, 2007). Sin embargo, en comunicaciones ópticas es más conveniente utilizar un láser como fuente de luz, así no es necesario un filtro óptico, pues la emisión láser es monocromática y en lugar de utilizar un *pinhole* se emplea fibra óptica y como elemento formador de imagen un telescopio (Figura 9). Esta técnica de estrella puede emplearse para optimizar el desempeño de diversos sistemas ópticos, desde los que cuentan con un solo elemento óptico hasta sistemas mucho más complejos como los telescopios astronómicos. En nuestro caso, el uso de esta técnica es de suma importancia para alineación del satélite con la estación terrena, para esto todas las antenas ópticas (telescopios) usadas en el enlace son comprobadas en tierra enfocándolas al infinito y utilizando un telescopio como estación óptica terrena siendo posible enfocar ambas antenas ópticas (transmisor y receptor) sin necesidad de lanzar un satélite.

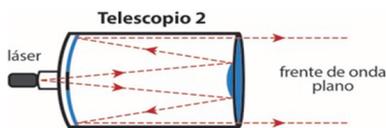


Figura 9. Estrella artificial

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN ÓPTICA ESPACIAL (ATP)

El ATP diseñado (Figura 10), es un subsistema capaz de seguir pequeñas desviaciones del haz proveniente del faro óptico. El componente que realiza el movimiento es un dispositivo tipo gimbal con dos grados de libertad angulares: altitud y azimuth. El movimiento resultante es una alineación que cubre un ángulo sólido de unos cuantos grados (del orden de una decena de grados) cuyo campo de visión puede barrer áreas enormes debido a la gran distancia del enlace.

El mecanismo gimbal construido, es parecido en su funcionamiento a las monturas altazimutales de los te-

lescopios astronómicos, cuya tarea es alinear el frente de onda entrante en el elemento «objetivo» para hacer coincidir la convergencia del haz hacia el centro del sistema detector. La alineación dinámica se lleva a cabo mediante la combinación de un elemento detector de posición de alta velocidad (QPIN) y de un sistema de control de movimiento del gimbal. El elemento detector es un fotodetector de 4 cuadrantes del que se habló anteriormente, este elemento en conjunto con una electrónica de adaptación, entrega señales eléctricas hacia un sistema mínimo que lee la posición del haz en el fotodetector y corrige la posición angular del gimbal utilizando un conjunto de motores de paso que mueven al gimbal. Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de fotodetectores de cuatro cuadrantes, QPIN y QAPD. Estos últimos tienen una muy alta sensibilidad, pero agregan mayor ruido en la etapa de detección debido al efecto de avalancha, además requieren operarse con fuentes de alto voltaje complicando su implementación práctica. Así, en nuestro caso, es más conveniente utilizar un QPIN para el prototipo de laboratorio y enlaces atmosféricos terrestres, pues si usáramos un QAPD debido a su alta sensibilidad se saturaría muy fácilmente debido al ruido ambiental residual.

Es necesario tener en cuenta muchas variables para el diseño del subsistema ATP gimbal, entre las principales a considerar:

- Longitud de onda de trabajo
- Distancia del enlace
- Velocidad de adquisición
- Velocidad de movimiento
- Tamaño del subsistema
- Algoritmos de captura y seguimiento
- Requerimientos de energía

Como puede verse, el diseño del sistema ATP presenta retos importantes, tanto en el área de diseño óptico, en el diseño e implementación electrónica, así como en el diseño y construcción mecánica. De esta forma, un grupo interdisciplinario de diferentes especialidades e instituciones de investigación mexicanas (CICESE, INAOE,

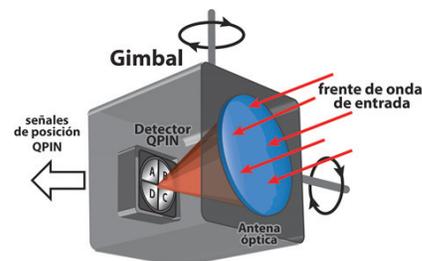


Figura 10. Esquema de funcionamiento del gimbal

Cetys Universidad campus Ensenada y el Observatorio Astronómico Nacional de la UNAM en Ensenada, B.C.) trabajó en el diseño y construcción del prototipo de ATP que se presenta en este trabajo.

En la parte óptica se utilizó una lente plano-convexa como elemento convergente de 42 mm de apertura y 50 mm de distancia focal. Dado que la longitud de onda de trabajo es 980 nm es necesario utilizar filtros ópticos pasa banda para evitar saturar al fotodetector con señales ambientales de otra longitud de onda; esto, en conjunto con un sistema de 'baffles', evita que rayos ópticos que no provengan de la estación terrena se introduzcan en el gimbal y ocasionen falsas detecciones (Figura 11).

La escala de placa determina la distancia en el plano focal que se necesita para cubrir determinado ángulo. Para el detector utilizado se diseñó el sistema con una escala de placa de 68.78 min arco/mm, con el diámetro del detector de 7.8 mm se puede cubrir un ángulo de 8.9 °.

La parte mecánica se encargó de diseñar un sistema tipo gimbal con movimiento altazimutal que mediante un movimiento lineal de tornillos de ajuste fino modifique la posición angular del dispositivo mecánico en un ángulo sólido mayor a 8.9 ° (para este caso se eligió 10 °). El gimbal se fabricó en aluminio maquinado para obtener el menor peso posible.

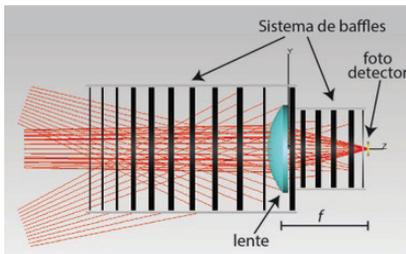


Figura 11. Diseño óptico del gimbal

El sistema electrónico (Figura 12), tiene como función adquirir las señales analógicas entregadas por la tarjeta. El fotodetector de 4 cuadrantes QP50-6SD2 de la compañía Pacific Silicon entrega 3 señales analógicas de voltaje:

$$X_1 = (V_3 + V_4) - (V_1 + V_2) \quad (7)$$

$$X_2 = (V_2 + V_3) - (V_1 + V_4) \quad (8)$$

$$X_3 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (9)$$

Donde V_{1-4} , son voltajes proporcionales al nivel de intensidad óptica incidente en cada uno de los cuatro cuadrantes del QPIN. Las señales X_{1-3} son digitalizadas por un Arduino Nano y procesadas (de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2)) por un arreglo de compuertas programable (FPGA) Digilent Cmod S6 para obtener la po-

sición del haz incidente en el QPIN en azimuth y altitud, respectivamente. Este FPGA controla a su vez en lazo cerrado el movimiento de dos motores de pasos lineales modelo 39BYGL (manejados por el controlador DRV8825 Stepper Motor Controller IC), que mueven a los tornillos de ajuste fino del gimbal para que el haz del sistema convergente se desplace hacia el centro del fotodetector, garantizando así que el sistema esté alineado con el faro óptico proveniente de la estación terrena (Figura 10); adicionalmente se utilizan sensores magnéticos de fin de carrera para cada eje de movimiento, lo que permite decidir la posición inicial del sistema. La adquisición del faro es la etapa inicial del algoritmo de funcionamiento del ATP, en esta etapa se lanza el faro desde la estación terrena hacia la posición indicada por las efemérides del satélite y se le indica al satélite mediante telemetría que inicie la búsqueda dentro del ángulo sólido de adquisición del haz, hasta colocar al mismo en el fotodetector, ya con el haz adquirido se procede a la etapa de sincronización y seguimiento del faro. El algoritmo para la adquisición y seguimiento del haz se muestra en la Figura 13.

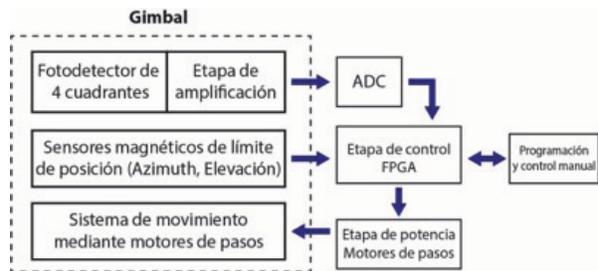


Figura 12. Diagrama a bloques de la etapa de control. ADC: convertidor digital a analógico, FPGA: arreglo de compuertas programable

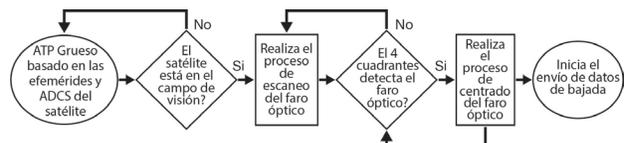


Figura 13. Secuencia de operación del sistema ATP

Como resumen del diseño del gimbal se muestran en la Tabla 1 los principales parámetros de diseño y como a partir de un modelo en 3D se construyó el prototipo de la montura de precisión gimbal (Figura 14). Se construyó de manera que el movimiento de búsqueda pudiera ejecutarse de forma manual o automática. La montura cuenta con varios elementos que cumplen funciones específicas, a continuación se detalla el funcionamiento de cada elemento. El cuerpo principal de la montura de precisión gimbal es una caja cuadrada con una tapa tra-

sera desmontable, dentro de la caja, en la tapa trasera, va montado el fotodetector QPIN, que cuenta con un conector DB9 hembra para los cables de las señales del QPIN. Las medidas de esta caja tienen el suficiente espacio para dar margen a la distancia focal establecida anteriormente. La tarjeta del detector QPIN se colocó en la tapa trasera de manera que el área activa del QPIN quedara justo en el centro geométrico de la misma (Figura 15). Esta caja cuenta además con un orificio circular roscado en su cara anterior. En esta parte de la caja va un tubo roscado en el cual se acopló la lente y el seguro de la lente, Para obtener la rotación del gimbal respecto a los ejes X, Y se utilizaron 2 tornillos de ajuste

fino que trabajan en conjunto con un sistema “cargado”. Al girar los tornillos de ajuste fino estos se mueven linealmente en el eje Z moviendo angularmente a la caja (Figura 16). El movimiento de rotación en estos ejes permite realizar la búsqueda del faro óptico. Al girar los tornillos de ajuste fino se lleva a cabo el movimiento de búsqueda del gimbal. Los tornillos de ajuste fino utilizados proporcionan un movimiento lineal de 1/80 de pulgada equivalente a 0.3175 mm lineales por cada vuelta realizada. La caja se mueve utilizando rodamientos en los 4 puntos de apoyo de cada eje (2 en el eje X y 2 en el eje Y).

Tabla 1. Parámetros de diseño del gimbal

	Valores	Unidades
Resolución mecánica	1.1	m/grados
Límite angular Azimuth	± 5	grados
Límite angular Altitud	± 5	grados
Apertura Gimbal	42	mm
Distancia focal	50	mm
Escala de placa	68.78	min arco/mm
Diámetro del detector	7.8	mm
Filtro óptico	Tipo EdgePass @950	nm
Motores de pasos con reductor de velocidad	512	pasos/rev
Tornillos de ajuste fino	80	hilos/pulgada



Figura 14. Modelo 3D de la montura de precisión gimbal

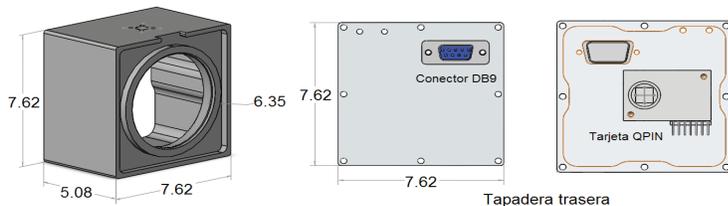


Figura 15. Caja de la montura de precisión gimbal (cm)

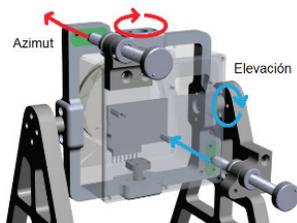


Figura 16. Movimiento de la caja de la montura de precisión gimbal

Para convertir el movimiento lineal de los tornillos de ajuste fino en desplazamiento angular en el eje X y Y, respectivamente, se tiene que al realizar una vuelta del tornillo de ajuste fino la caja del gímbal gira 0.545° en el eje correspondiente (Figura 17).

$$1 \text{ vuelta} = \frac{1}{80} \text{ pulgada} = 0.3175 \text{ mm}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.3175[\text{mm}]}{33.35[\text{mm}]}\right)$$

$$\alpha = 0.545^\circ$$

Donde:

- α = Ángulo de giro
- a = Desplazamiento lineal por una vuelta de tornillo de ajuste fino
- c = Distancia desde el eje de giro hasta punto de contacto del tornillo de ajuste fino



Figura 17. Detalle del movimiento de la montura de precisión gímbal

Se muestra una imagen del prototipo final de la montura de precisión gímbal mostrando varios detalles del mismo tales como antena óptica, “baffles”, motores, QPIN, entre otros (Figura 18).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para una mejor caracterización experimental del subsistema ATP desarrollado se requeriría el uso de un faro óptico situado a la distancia de un enlace óptico de espacio libre satelital (los satélites de órbita baja se encuentran a una distancia de 640 km a 3000 km de la superficie terrestre) lo cual no es factible antes de lanzar el satélite, pero mediante la técnica de la estrella artificial es posible simular un faro con dichas características. Para esto, se lleva a cabo un proceso de calibración empleando dos telescopios marca MEADE LX200-ACF, produciendo un haz colimado de 14” de diámetro enfocado a infinito, así puede observarse una estrella en laboratorio de la misma manera que se observaría en el cielo.

Lo primero es enfocar un objeto en el infinito (observar una estrella o planeta). Un primer telescopio se utiliza para captar un objeto en el infinito. Se empleó una cámara CCD Prosilica para captar las imágenes del objeto. La finalidad fue dejar calibrado este telescopio para que cuando se tenga un frente de onda plano incidente se forme imagen en el plano focal del telescopio en el cual se encuentra la cámara (Figura 19).

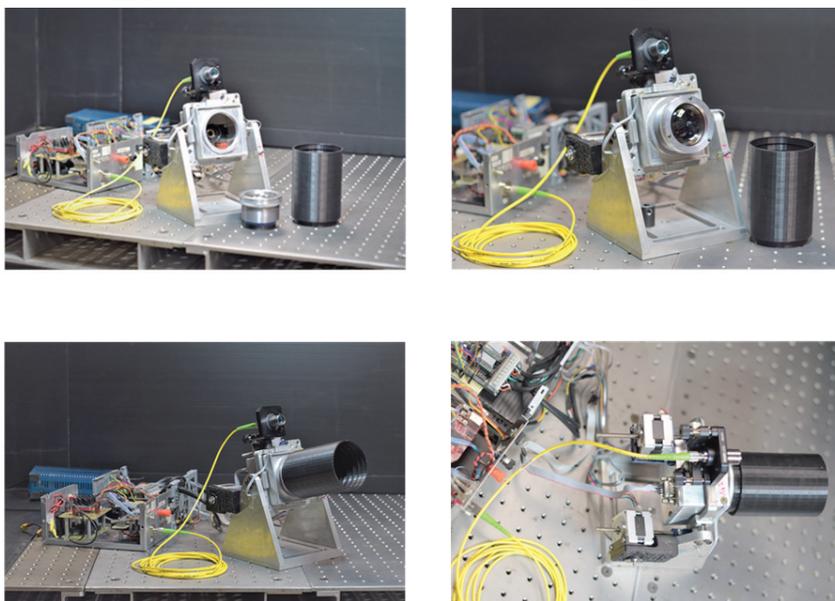


Figura 18. Diferentes tomas de montura de precisión gímbal

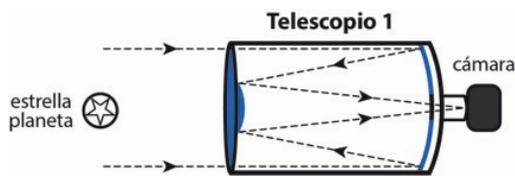


Figura 19. Primera etapa para obtener una estrella artificial

Al observar con el telescopio un objeto que se encuentra en el infinito se asegura que el telescopio formará una imagen al tener un frente de onda plano (fuente puntual en el infinito).

La segunda etapa implica utilizar un segundo telescopio al que se acopla una fuente de luz láser (faro óptico). En nuestro caso es un láser confinado en una fibra óptica y un extremo de esta se coloca en el plano focal del segundo telescopio, generando un haz colimado (Figura 20).

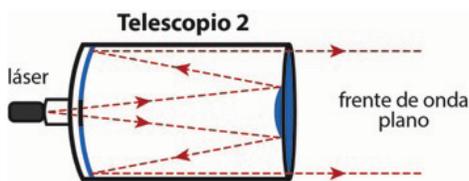
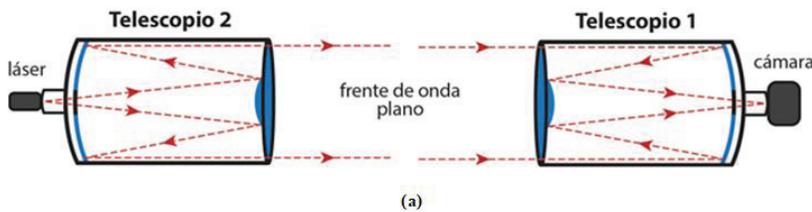
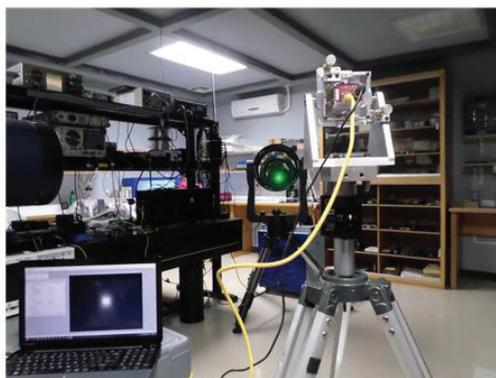


Figura 20. Segunda etapa de la estrella artificial

Lo siguiente es colocar los dos telescopios frente a frente mediante la correcta alineación de uno respecto al otro para que una vez que ambos telescopios compartan el mismo eje óptico, en el telescopio 1 se vea la imagen de la fuente del telescopio 2.



(a)



(b)

Para asegurar que se tiene un haz colimado en el telescopio 2 es necesario ajustar la distancia focal de este. Visualizando en una computadora la imagen que se forma en la cámara del telescopio 1 se procede a ajustar la distancia focal del telescopio 2, una vez que se tiene imagen en la cámara del telescopio 1 se tiene un haz colimado (Figura 21).

Como se mencionó anteriormente, un haz láser enviado desde la estación terrena servirá como "faro" para que el gimbal montado en el satélite ubique la posición angular del faro y pueda transmitir una señal de datos de regreso hacia la estación terrena mientras se mantiene la condición de línea de vista. Debido a que el satélite está en movimiento, el gimbal debe ser capaz de adquirir y seguir al faro mientras se realiza el enlace de bajada.

Dado que no es posible realizar pruebas satelitales de forma práctica se recurre a pruebas indirectas para caracterizar y optimizar la etapa óptica del sistema. Para un enlace satelital de larga distancia (> 500 km), un láser con un diámetro inicial de 2 mm y un ángulo de divergencia de 0.35 mrad, después de propagarse 500 km llegará con un diámetro de mancha del orden de 350 m. Debido a la enorme distancia de propagación del haz, el frente de onda que llega al gimbal puede considerarse como plano, por lo que esta condición debe replicarse en laboratorio para caracterizar y optimizar la etapa óptica. Para optimizar la etapa óptica del gimbal se realizaron pruebas experimentales usando la técnica de estrella artificial con el esquema mostrado en la Figura

Figura 21. Diagrama experimental para obtener una estrella artificial, a) esquemático, b) implementación en el laboratorio

23, con este método adicionalmente es posible obtener la escala de placa del sistema y utilizando una doble apertura en el telescopio receptor, es posible evaluar las condiciones de turbulencia al medir los centroides de las dos manchas recibidas en una cámara digital. De manera práctica, en el laboratorio se utilizó un láser visible de 532 nm (verde) como faro óptico para determinar la escala de placa del sistema óptico, dos telescopios Meade de 14" (LX200-ACF) y una cámara digital de alta velocidad (monocromática) adaptada al gimbal a la misma distancia en la que se coloca el fotodetector de cuatro cuadrantes.

El primer paso es obtener el frente de onda plano de uno de los telescopios con el láser verde, utilizando el método descrito en la sección anterior. Este frente de onda plano visto con un telescopio o el gimbal se verá como estrella enfocada a infinito, de esta forma simularemos que el faro se encuentra a una distancia de orbita satelital.

El objetivo es posicionar a la distancia exacta los elementos ópticos para que un frente de onda plano converja en un solo punto del fotodetector, es decir, que la distancia focal efectiva del gimbal corresponda a un sistema óptico enfocado a infinito.

Cuando la estrella artificial está enfocada en el CCD de la cámara se observa un solo punto como en la Figu-

ra 22a, y cuando está desenfocada se observa una mancha (Figura 22b). La distancia focal efectiva del sistema se obtuvo de esta medición, resultando 49 mm. Con esta prueba también se determina la escala de placa, la cual resulto en 68.78 min arco/mm.

Una prueba adicional es la visualización de la estrella artificial con dos aperturas de diferente ángulo de convergencia. Para esta prueba se colocan en la entrada del telescopio receptor dos aperturas de igual tamaño, a una de estas se le coloca un prisma con un vidrio de espesor determinado, suficiente para lograr un camino óptico diferente (Figura 23). El resultado es una proyección de dos estrellas en el plano focal de telescopio receptor, donde se ubica la cámara digital. Las imágenes originales de las estrellas dobles y un análisis por computadora muestra cómo varía el ancho y la distancia de los centroides de las estrellas para imágenes sin y con turbulencia (Figura 24).

Como se ha descrito anteriormente, la señal del faro óptico debe incidir en el QPIN donde se realiza el proceso de centrado del mismo. Para llevar a cabo esta operación, como se mencionó arriba, se procesan las señales de los cuatro cuadrantes y se obtiene el azimuth y elevación del faro óptico en el detector y en caso de que el faro óptico no se encuentre en el centro, debe corregirse su posición mediante un sistema de motores retroali-

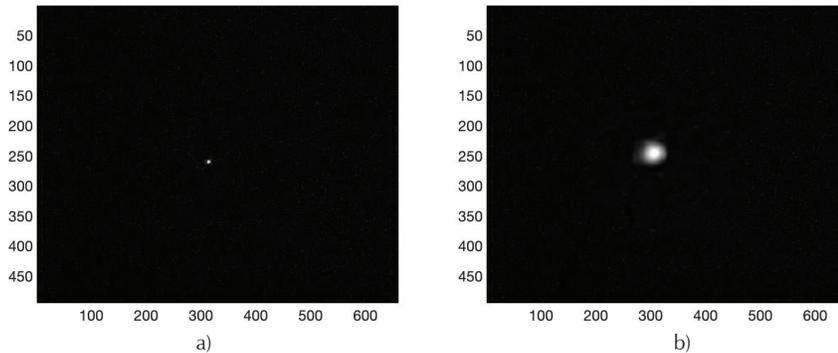


Figura 22. Estrella artificial, a) enfocada, b) desenfocada

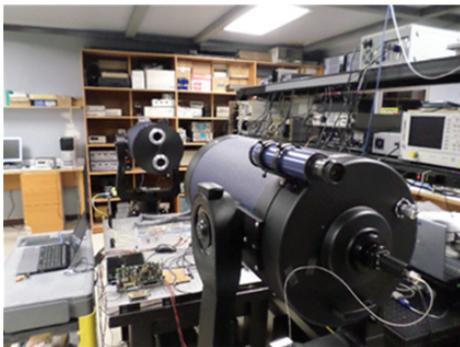


Figura 23. Estrella artificial, a) enfocada, b) desenfocada

mentados en lazo cerrado. Adicionalmente al control de la posición angular es conveniente tener en el laboratorio una visualización de la ubicación del faro en el QPIN, para esto se diseñó un programa en Matlab que despliega dicha posición en tiempo real tal como se ilustra en las Figuras 25a y 25b. Así, con esta aplicación se puede observar el seguimiento y caracterización del movimiento angular del gimbal a través del tiempo.

Dado que el objetivo final de los subsistemas reportados en este trabajo es su empleo en enlaces de comu-

nunicaciones ópticas satelitales en órbita terrestre baja, es muy conveniente (y necesaria) su caracterización en enlaces ópticos atmosféricos de larga distancia. En particular, aquí reportamos los resultados de un enlace óptico atmosférico de 53.8 km de distancia realizado en el mes de julio de 2019 entre el Observatorio Astronómico Nacional ubicado en San Pedro Mártir y un punto ubicado en San Felipe, B.C., México (Figuras 26 y 27). Es muy importante mencionar que este enlace pudo realizarse de manera exitosa gracias a que la caracterización

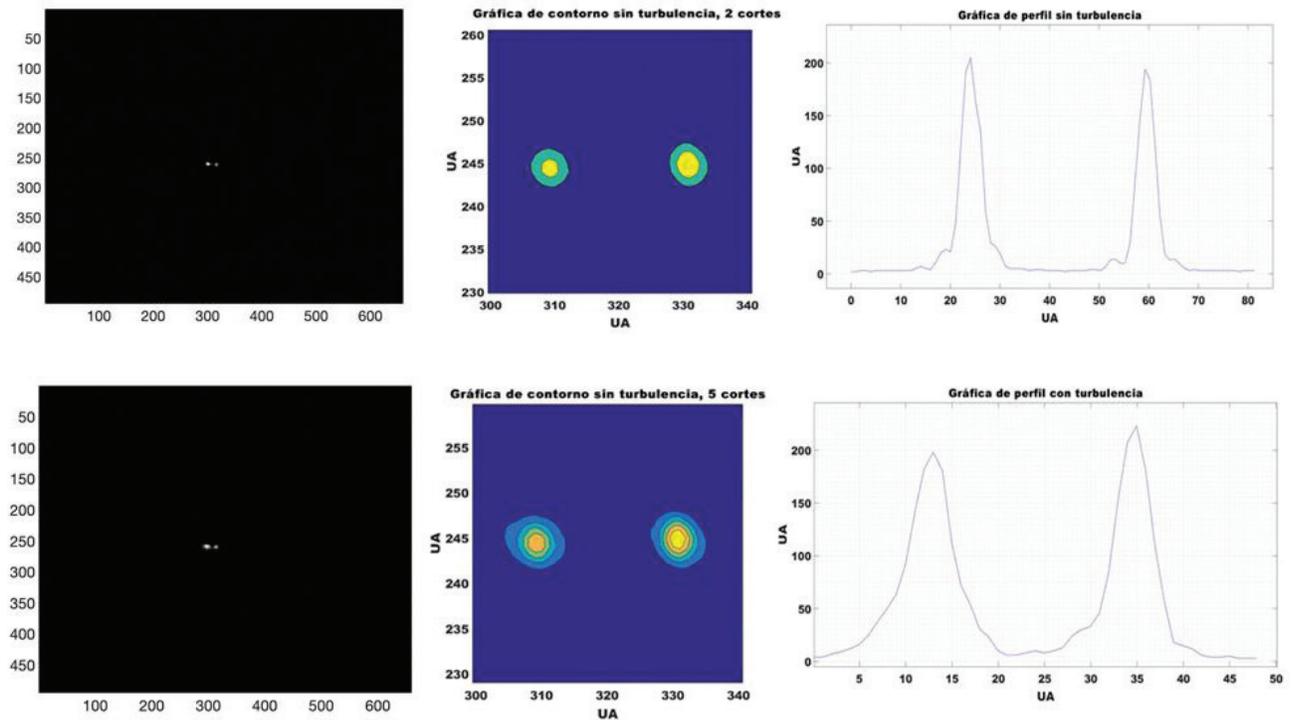


Figura 24. Imagen de estrella artificial con dos aperturas: renglón superior sin turbulencia, renglón inferior con turbulencia

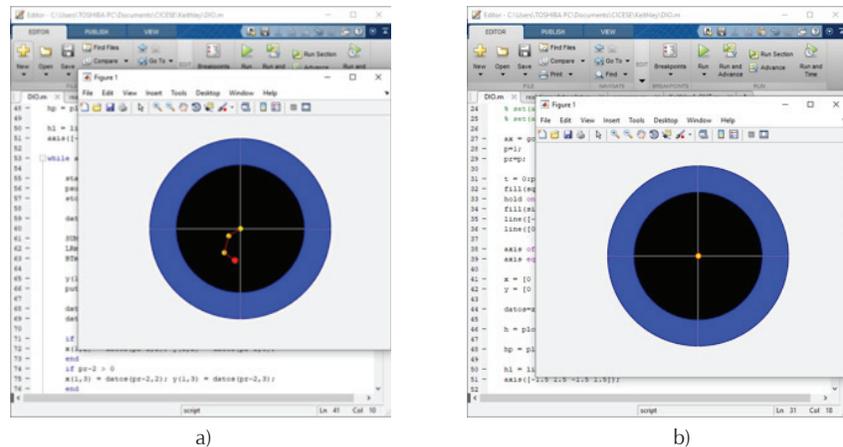


Figura 25. Despliegue de la posición del faro en el QPIN mediante Matlab, a) trayectoria seguida durante el proceso de barrido, b) centrado del haz



Figura 26. Transmisor óptico (faro óptico y láser para transmisión de datos), ubicado en el Observatorio de San Pedro Mártir (SPM) B.C., México a una altitud de 2800 m sobre el nivel del mar



Figura 27. Receptor óptico (montura de precisión gimbal, cámara infrarroja y fotodiodo para detección de señal de datos) ubicado a 9 m sobre el nivel del mar en Rancho el Dorado en San Felipe B.C., México a una distancia de 53.8 Km del Observatorio de SPM

y optimización de los subsistemas en laboratorio fue adecuada y cumplió con los requerimientos de un enlace de larga distancia.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos reportado el desarrollo de un sistema de sincronización óptica espacial para satélites pequeños operando en órbita baja (LEO). Hemos descrito el diseño e implementación de una montura de precisión gimbal con dos grados de libertad, fotodetección de cuatro cuadrantes, así como la electrónica de digitalización y control para tornillos de ajuste fino, los cuales mediante un algoritmo ad-hoc, rigen el buen

funcionamiento del gimbal dentro de las especificaciones dadas. Con la finalidad de certificar el buen desempeño de los diferentes subsistemas que conforman nuestro sistema de sincronización óptica espacial generamos en laboratorio una estrella artificial. Reportamos asimismo la caracterización del desempeño del subsistema Gimbal en un enlace óptico atmosférico de larga distancia, el cual se realiza de manera exitosa gracias a que la caracterización y optimización de los subsistemas en laboratorio con los requerimientos de un enlace de larga distancia fue adecuada. Por otro lado, como base para este diseño, se considera que previamente el seguimiento grueso se llevaría a cabo mediante las etapas de RF, GPS y sistema de actitud, los cuales forma-

rían parte de la plataforma del satélite bajo diseño. Actualmente contamos con la especificación de una estación terrena (realizada en colaboración con el grupo de trabajo del INAOE), operando en la banda de RF. Basándonos en dicho desarrollo y el ATP descrito anteriormente, nos encontramos trabajando actualmente en la especificación de la etapa de apuntamiento fino de la estación terrena óptica. Este apuntamiento fino será implementado mediante un mecanismo “tip-tilt” con precisión de 0.25 microrad. Debido a la complejidad del sistema reportado en este escrito, se requirió la participación de especialistas de diversas instituciones tales como el CICESE, el INAOE, CetyS-Universidad Ensenada y el Observatorio Astronómico Nacional de la UNAM. Los subsistemas reportados en este trabajo se desarrollaron dentro del marco de un proyecto con Fondos de la Agencia Espacial Mexicana.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Espacial Mexicana por financiar el Proyecto No. 275618-2016.

REFERENCIAS

- Abrahamson, M.J., Oaida, B.V., Sindiy O. & Biswas, A. (2015). Achieving operational two-way laser acquisition for OPALS payload on the International Space Station. En Proceedings of the SPIE, 9354, id. 935408 21 pp.
- Andrews, L.C. & Phillips, R.L. (2005). *Laser beam propagation through random media*, Vol. 1. Bellingham, WA, USA: SPIE press.
- Arvizu-Mondragón, A., Santos-Aguilar, J., Domínguez-Retamoza, E.A., Meza-Pérez, J., Gutiérrez-Martínez, C., Núñez-Alfonso, J.M., López-Leyva, J.A. Diseño, implementación y caracterización de un sistema Gimbal con dos grados de libertad para enlaces de comunicaciones ópticas en satélites pequeños. En SOMI XXXIII Congreso de Instrumentación, To-rreón, Coahuila, México, 29-31 de octubre de 2018. pp.1-8.
- Hemmati, H. (2006). *Deep space optical communications*. NJ, USA: John Wiley and Sons Inc., Ho-boken.
- Chang J., Schieler C.M., Riesing K.M., Burnside J.W., Aquino K. & Robinson B.S. (2019). Body pointing, acquisition and tracking for small satellite laser communication. En Proc. SPIE 10910, Free-Space Laser Communications XXXI, 109100P, 22 de marzo de 2019. Recuperado de <https://doi.org/10.1117/12.2511159>
- Lambert S.G. & Casey W.L. (1995). *Laser communications in Space*. Boston, USA: Artech House, Inc.
- Kaymak, Y., Rojas-Cessa, R., Feng, J., Ansari, N., Zhou, M. & Zhang T. (2018). A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2), 1104-1123. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2804323>
- Malacara, D. & Welford, W.T. (2007). *Star tests en optical shop testing*. 3rd ed., Malacara, D. New Jersey, USA: Wiley, P., pp. 398-434.
- Mendieta, J., Pacheco, E., Arvizu, A. & Muraoka, R. (2001). Optical communication payload for an experimental microsatellite in low Earth orbit. En Proc. SPIE 4272, Free-Space Laser Communication Technologies XIII.
- Morán, L., Murrieta, J., Arvizu, A., Muraoka, R. & Velis, L. (2013). Sistema electromagnético ATP para enlaces ópticos inalámbricos satelitales. En VI Congreso de Innovación Tecnológica en Eléctrica y Electrónica, CITEE 2013, Ciudad Obregón, Sonora, 6-8 de noviembre.
- Rose T.S., Rowen D.W., LaLumondiere S., Werner N.I., Linares R., Faler A., Wicker J., Coffman C.M., Maul G.A., Chien D.H., Utter A., Welle R.P. & Janson S.W. (2018). Optical communications downlink from a 1.5U CubeSat: OCSD. En International Conference on Space Optics-ICSO 2018, Proc. of SPIE, vol. 11180, pp. 111800J1-111800J-12.