

Free Space Optics

COMUNICACIONES ÓPTICAS EN EL ESPACIO LIBRE

Martín Ramos Martín, José Ramón Gisbert Valls

Índice

Índice	1
1. Introducción	1
1.1. Concepto	1
1.2. Funcionamiento	2
1.3. Free Space Optics frente a Radiofrecuencia	2
2. Efectos limitantes	3
2.1. Atenuación atmosférica	4
2.1.1. Lluvia	4
2.1.2. Niebla	4
2.1.3. Escintilación	4
2.2. Atenuación geométrica	6
2.3. Técnicas para combatir estos efectos	6
3. Sistemas comerciales	7
4. Aplicaciones	11
4.1. Sistemas comerciales	11
4.2. City-Wide Wireless Networks	12
4.3. Intersatellite Link	14
4.4. WDMFSO	15
4.5. Radio on Free Space Optics	16
Índice de figuras	17
Referencias	17

1. Introducción

1.1. Concepto

Se conoce con el término de comunicaciones ópticas en el espacio libre o *Free Space Optics* (a partir de aquí FSO), o *Free Space Photonics*¹ (FSP) o también

¹Comunicaciones fotónicas en el espacio libre

comunicaciones ópticas inalámbricas, a la transmisión de pulsos visibles o infrarrojos (IR) modulados de forma electrónica a través de la atmósfera para la consecución de una comunicación óptica. Al igual que en las comunicaciones ópticas guiadas, las FSO, utilizan láseres para transmitir información pero, en lugar de confinar el flujo de datos en una fibra de vidrio, éste se transmite por el aire. Las FSO funcionan bajo el mismo principio de los transmisores de infrarrojos de los mandos a distancia de los televisores, los teclados inalámbricos o las agendas electrónicas inalámbricas.

1.2. Funcionamiento

Los sistemas de FSO transmiten pulsos de luz invisibles y que no representan ningún peligro para el ojo humano. La transmisión se efectúa de un «telescopio» a otro en el rango de los terahercios, utilizando para ello láseres infrarrojos de bajo consumo. Los pulsos de luz se transmiten desde fuentes de luz láser que enfocan receptores dotados de detectores fotónicos de alta sensibilidad. Estos receptores disponen también de lentes telescópicas capaces de recibir el flujo fotónico y transmitir datos en formato digital. De forma transparente pueden transmitirse mediante sistemas de FSO: vídeo, imágenes, señales de radio, tráfico de Internet o archivos. Los sistemas comerciales disponibles ofrecen capacidades en el rango de los 100 Mbps a los 2.5 Gbps, aunque experimentalmente se han obtenido flujos binarios de alrededor de 160 Gbps.

Los sistemas de comunicaciones basados en FSO pueden alcanzar distancias de varios kilómetros. Mientras haya una línea de visión clara, y suficiente potencia, la comunicación óptica es posible.

1.3. Ventajas de los sistemas basados en Free Space Optics frente a los sistemas de radiofrecuencia

Las comunicaciones inalámbricas siempre han resultado muy interesantes. La gran cobertura que ofrecen junto con su propia estructura, que apenas necesita instalación, y su rápida puesta en funcionamiento, resultan muy cómodas y baratas. Los enlaces de RF, tecnología muy usada, desarrollada y estudiada, han satisfecho nuestras necesidades durante mucho tiempo, pero presenta algunas limitaciones para las que FSO puede poner remedio.

Las comunicaciones inalámbricas por FSO presentan solución a los problemas que se comienzan a tener en las comunicaciones por microondas. Para empezar, la demanda cada vez más alta de mayores tasas binarias en las comunicaciones, además de la acusada masificación del espectro radioeléctrico, han resultado en un desplazamiento en las bandas de frecuencias usadas, usando por ejemplo el 2.4 Ghz (WiFi) e incluso más altas (algunas aplicaciones llegan hasta 60 Ghz). Esto lleva consigo varios costes asociados, como son el coste alto que tienen los equipos que trabajan en altas frecuencias, además de una degradación mucho mayor de la señal cuanto mayor es la frecuencia de usada en la comunicación.

Por todo ello, el sistema FSO se presenta como una alternativa muy interesante en el futuro para dar soporte a las comunicaciones inalámbricas de alta tasa binaria y a un precio muy asequible, ya que los dispositivos ópticos necesarios para la comunicación son más bien simples, e incluso requieren

	P2P Microwave	ISM O MMDS	LMDS	FSO
Frecuencia (Ghz)	7 – 60	2,4 – 3,6	24 – 40	$3 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4$
Licencia	Sí	No	Sí	No
Multipunto ^a	n/d	O/S	O/S	virtual
R. Celda (km)	2 – 20	8 – 15	2 – 3	1 – 2
BW down (Mbps)	155	3 – 8	155	$1,5 \cdot 10^3$
BW up (Mbps) ^b	155	3	3 – 10	$1,5 \cdot 10^3$
Simétrico	Sí	No	No	Sí
Transparente	No	No	No	Sí
Atenuación ^c	LL	LL ⁺	LL	NN
Inversión ^d	Alta	Alta	Alta	Baja

^an/d = no disponible, O/S = Omnidireccional y/o sectorial

^bEn sistemas celulares se aplica el reuso de frecuencia

^cLL = Lluvia, LL⁺ = Lluvia muy densa, NN = Niebla y Nieve

^dLa inversión se compensa a medida que asciende el número de usuarios que ocupa la celda

Cuadro 1: *Tabla comparativa entre comunicaciones basadas en Free Space Optics y sistemas basados en el uso de radiofrecuencia*

menor potencia. Además, la incapacidad de las señales ópticas de penetrar los objetos, permite un total reuso del espectro, a diferencia de los enlaces por microondas, y la ausencia de licencias necesarias para transmitir en las bandas ópticas, hacen mucho más barata la comunicación con sistemas FSO. Pero aún hay mas ventajas. La mencionada incapacidad para traspasar paredes, puertas y demás, convierte, por naturaleza, a las comunicaciones FSO en un sistema muy seguro y privado. Lo cual resultará en un menor uso de medidas de seguridad y encriptación. Si a esto le añadimos las ventajas que por naturaleza ofrece un sistema inalámbrico, es fácil darse cuenta de que nos encontramos ante un sistema muy interesante para cubrir nuestras necesidades de comunicación cada vez mayores de cara al futuro.

2. Efectos limitantes

Como ya hemos visto en la introducción, el medio por el que se propagan las señales ópticas en esta tecnología es el aire. Por tanto, como es lógico, constituye un medio mucho más agresivo y hostil para la propagación de luz que una fibra de vidrio. Por ello, los efectos limitantes que tendremos serán los producidos por la propia naturaleza de la atmósfera, además de tener en cuenta la propia limitación geométrica por el uso de transmisores y receptores distanciados centenares de metros, los cuales también tendremos que tener en consideración a la hora de planificar un enlace por FSO.

Todos estos factores nos limitan fuertemente la distancia a la que funcionará correctamente y de forma fiable el enlace, siendo de unos pocos kilómetros como mucho, y nos obligarán a usar mecanismos para contrarrestar la de-

gradación que sufre la señal óptica en su propagación por la atmósfera. La ecuación que sigue muestra la potencia que recibirá el receptor:

$$P_R = P_T \frac{A_{RX}}{(\theta l)^2} e^{-\alpha L} \quad (1)$$

En ella se observan tanto los factores geométricos como los factores atmosféricos que contribuyen a la atenuación de la potencia recibida en el destino. A continuación, vamos a describirlos uno a uno los efectos mas importantes.

2.1. Atenuación atmosférica

Se produce cuando la señal enviada se encuentra por el camino con moléculas de aire (O_2 , H_2O , $N_2 \dots$) y otras partículas suspendidas en el aire (muchas de ellas producidas por la radiación solar). Al interactuar con ellas se producen los ya conocidos, y estudiados, efectos de dispersión, difracción y absorción que sufre la luz.

De todos los fenómenos atmosféricos, tres son los más importantes, y por tanto, los más limitadores de un enlace de FSO:

2.1.1. Lluvia

La lluvia es un problema ya conocido a la hora de realizar enlaces inalámbricos. Por tanto ya es conocida la gran atenuación que presenta, y para señales ópticas, cuyas frecuencias son muy altas, resultará en una fuerte atenuación de la potencia transmitida. Como es lógico, la atenuación producida dependerá también de la intensidad de lluvia. La figura (1) muestra este efecto.

2.1.2. Niebla

Este fenómeno es el que más acusa un enlace de FSO. Puede producir atenuaciones incluso mayores de 300 dB/km en condiciones de muy baja visibilidad. Al igual que la lluvia, la señal óptica, al encontrarse con moléculas de agua, sufre una fuerte dispersión y difracción, degradando mucho la señal transmitida. Para modelar la atenuación que sufre, existen diferentes modelos como el de Kim, o el de Kruse o el de Nabulsi. La gráfica de la figura (2) muestra un resumen de los distintos modelos, representando la atenuación que cada uno de ellos estima en función de la visibilidad, y presenta varias curvas para distintas longitudes de onda.

2.1.3. Escintilación

Aunque este fenómeno produce atenuaciones mucho mas bajas que los vistos anteriormente, también es conveniente tenerlo en cuenta a la hora de estimar nuestro margen de enlace (LM). La escintilación se produce en los días calurosos y soleados, lo cual favorece la formación de zonas de la atmósfera con distinto índice de refracción, lo cual, como sabemos, es causa de dispersión o scattering. Este efecto puede producir atenuaciones de hasta 12 dB.

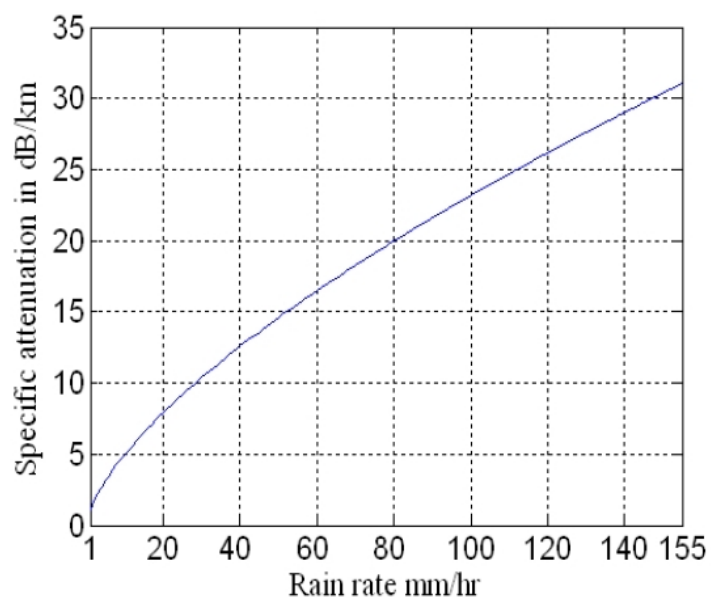


Figura 1: Atenuación específica para distintos enlaces inalámbricos en distintas situaciones de lluvia

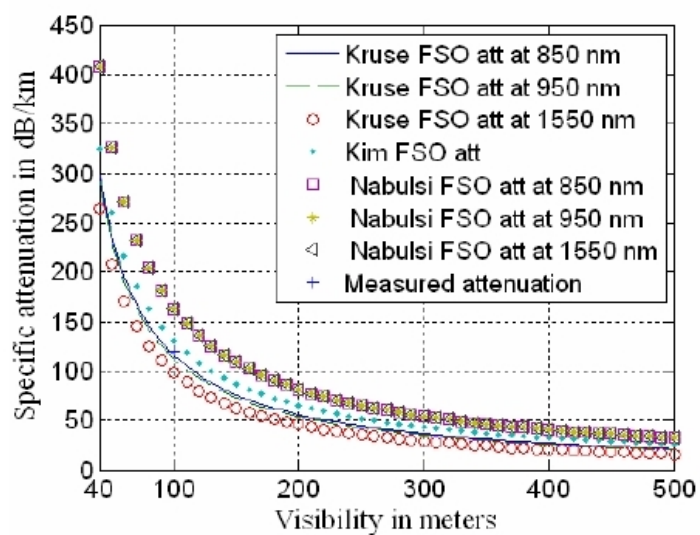


Figura 2: Atenuación específica de ciertas frecuencias para distintas densidades de niebla. Curvas caracterizadas por la distancia máxima a la que permite ver la niebla

2.2. Atenuación geométrica

Este efecto viene determinado por la propia geometría del transmisor y receptor usados en el enlace, además de la distancia del mismo. Los diámetros de los «telescopios» y el ángulo de divergencia intervienen en la ecuación que estima esta atenuación:

$$Att_{geo} = \left(\frac{d_{RX}}{d_{TX} + \theta l} \right)^2 \quad (2)$$

Se causa una divergencia del haz de luz emitido, produciéndose una pérdida de potencia, ya que parte de la luz no llega a impactar en la superficie del receptor, y se pierde en el aire. La siguiente figura, muestra un ejemplo de la atenuación que se produce en un enlace FSO, para unos determinados diámetros de emisor y receptor y un ángulo de divergencia dado de 3 mrad, en función de la distancia:

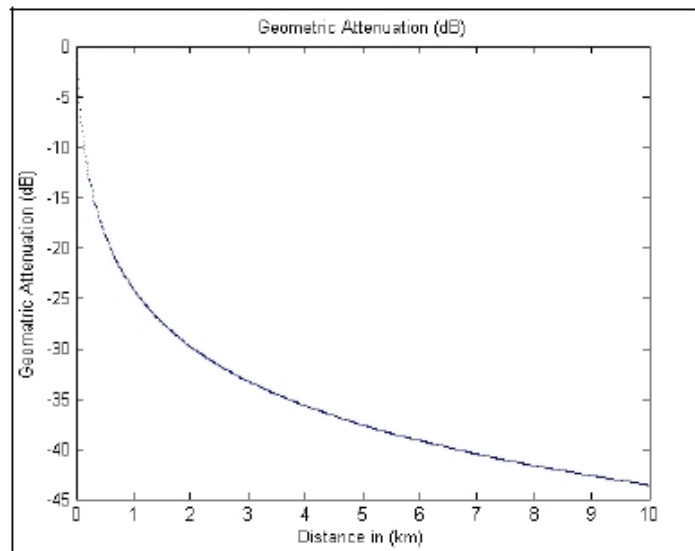


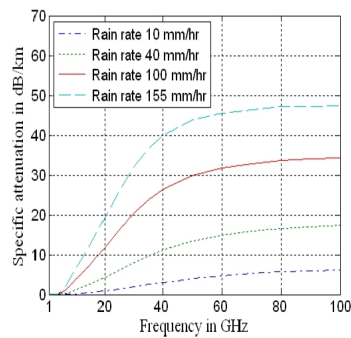
Figura 3: Atenuación geométrica para enlaces de hasta 10 km de longitud

2.3. Técnicas para combatir estos efectos

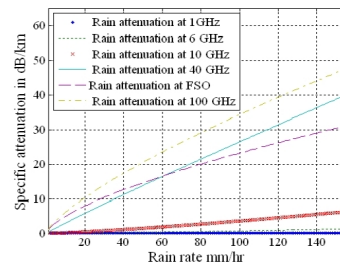
Como se puede observar, no son pocas las consideraciones que tendremos que tener presentes a la hora de diseñar un enlace FSO: distancia del enlace, condiciones de LOS, alineamiento de fuente y receptor, condiciones atmosféricas cambiantes, humedad del ambiente... Pero además, existen técnicas para combatir estos efectos degradantes y que nos ayudan a conseguir mejores resultados en cuando a BER y a fiabilidad del enlace.

Para paliar los efectos producidos por la niebla y la lluvia, usamos el mismo sistema, que consiste en agregar un radioenlace redundante en el sistema

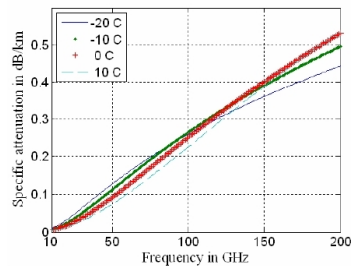
FSO. Varios estudios han comprobado que la lluvia, a frecuencias menores de 10 GHz, afecta de forma considerablemente más suave que a una señal óptica, y además incluso hasta 40 GHz, la atenuación producida es menor. También la señal de RF a esas frecuencias se ve menos afectada por la niebla que una señal óptica. Las siguientes gráficas muestran estas atenuaciones:



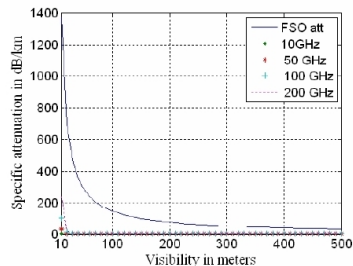
(a) Atenuación específica de un enlace para distintas condiciones de lluvia a medida que se aumenta la frecuencia



(b) Atenuación específica para un enlace de fso y enlaces de microondas a distintas frecuencias



(c) Atenuación específica para frecuencias superiores a 10 GHz con una densidad de agua líquida de 0,05 g/m³



(d) Atenuación específica para fso y frecuencias entre 10 y 200 GHz para una temperatura de 10 °C

Figura 4: Mejoras conseguidas mediante los mecanismos expuestos para combatir los efectos meteorológicos en la calidad del enlace

Por otro lado, la escintilación puede ser combatida con técnicas de multiamino. Una arquitectura de multihaz-multifente consigue paliar sensiblemente la atenuación producida por este fenómeno atmosférico.

3. Sistemas comerciales

En la actualidad existen multitud de compañías que ponen a disposición del mercado equipos basados en las fso. El coste de estos equipos ronda los 6000 €, pero dependiendo de sus características y del fabricante puede llegar a los 12000 €. La mayoría de los equipos comerciales emplean un esquema opaco

de FSO, es decir, la transmisión de la señal por el enlace inalámbrico pasa por un proceso de conversión electro-óptica que sigue los siguientes pasos.

1. En primer lugar el equipo recibe la señal, ya sea en el dominio óptico o en el electrónico.
2. Si es conveniente transforma la señal al dominio electrónico como haría el receptor de cualquier sistema actual basado en comunicaciones ópticas.
3. Finalmente, la señal eléctrica resultado de la conversión anterior se emplea para modular según una modulación directa de corriente un láser que acostumbra a ser de tipo VCSEL (láser de cavidad vertical).

Si bien este es un proceso sencillo que otorga al enlace de un haz altamente colimado presenta la desventaja del cuello de botella inherente a la conversión electro-óptica.

Para colimar aún más el haz es frecuente encontrar equipos que empleen grupos de lentes y filtros destinados a varios propósitos, entre ellos proteger el enlace de los efectos adversos de la luz solar en la comunicación FSO². En el esquema de detección es frecuente la presencia de fotodiodos de avalancha (APD) empleados como detectores, utilizando este tipo de sensores se consiguen receptores de gran sensibilidad.

Para combatir los principales efectos limitantes que acusan las comunicaciones FSO, como son los fenómenos meteorológicos relacionados con precipitaciones, niebla, viento y movimientos sísmicos, los fabricantes dotan a sus equipos de las siguientes medidas de seguridad.

- Sistemas de calefacción que impiden que las ventanas de la carcasa se empañen con vaho o nieve.
- Sistemas de apuntado automático y sujeciones especiales que impiden que el sistema se desalinee por causa del movimiento producido por fenómenos sísmicos en los edificios debido a su elasticidad. Es posible compensar movimientos equivalentes a los producidos por vientos de 120 km/h con el sistema en pleno funcionamiento o 160 km/h con el sistema en reposo durante las operaciones de mantenimiento.
- Uso de haces de luz de amplitud moderada y diversidad especial mediante el uso de grupos pares de transceptores, habitualmente de dos a cuatro por equipo, que reducen las pérdidas de calidad de enlace por limitaciones geométricas.

Además estos equipos están dotados de carcasas de aluminio selladas herméticamente, de tal forma que son inmunes a elementos externos como el polvo, a la deposición de otras partículas, a la radiación externa e incluso al agua. Para compensar la falta de ventilación se equipa a estos sistemas con acondicionadores que disipan el exceso de temperatura en el compartimento estanco, evitando que la temperatura a la que está expuesto el láser supere los 35 °C, manteniendo así sus propiedades. Los sistemas de acondicionamiento térmico citados también ayudan reducir las fluctuaciones en la longitud de onda de emisión manteniendo el láser a temperatura constante.

²Estudiar con mayor profundidad el propósito de los filtros espectrales y espaciales que emplean los fabricantes



Figura 5: *Transceptor perteneciente a la gama Sonabeam M distribuida por fSONA*

Una de las principales preocupaciones de los fabricantes es conseguir que el manejo de sus equipos sea seguro para cualquier persona que desee instalar un enlace basado en fso. De este modo se preocupan de que los transmisores láser cumplan como mínimo con los requisitos para encontrarse en la categoría 1M definida en el estándar IEC/EN 60825-1/A2. Existen principalmente dos formas de conseguirlo, utilizar láseres que emitan haces con una longitud de onda mayor o limitar la potencia de emisión. La ventaja de trabajar con longitudes de onda menores, generalmente el mínimo se encuentra en torno a los 850 nm, es que esta longitud de onda es menos vulnerable a los efectos limitantes relacionados con los fenómenos meteorológicos como la niebla o las precipitaciones. No obstante, en buenas condiciones meteorológicas un sistema fso que emplee como transmisor un láser a 1310 nm trabajando a una potencia mayor —en ocasiones podrá trabajarse a potencias 50 veces mayores que las disponibles para láseres de 800 nm— obtendrá mejores resultados en cuanto a alcance y tasa binaria que sus competidores de longitud de onda más corta.

Es frecuente encontrar equipos que trabajan con longitudes de onda comprendidas entre los 780 y los 1550 nm. Y a pesar de la gran cantidad de longitudes de onda disponibles en ese rango cada fabricante parece trabajar restringiéndose a sólo unas pocas, en la mayoría de casos a partir de sus propias investigaciones. Así por ejemplo, fSONA emplea los 1550 nm, los equipos de LIGHTPOINTE se alojan en los 850 nm, mientras que Cablefree prefiere los 780 y 980 nm para sus transceptores.

Respecto a niveles de potencia, los láseres son capaces de extraer de entre unos 50 mW hasta unos 160 mW. Teniendo en cuenta las pérdidas por acoplo al medio y las pérdidas por inserción derivadas de introducir la señal en el

	fSONA	
	SONABEAM 1250-M	SONABEAM 52-M
Alcance (m)	400 – 5300	300 – 7700
Tasa binaria (Mbps)	100 – 1448	10 – 68
Potencia tx. (mW)	640	640
Transceptores	4	4
λ (nm)	1550	1550
Interfaz	Fibra MM/SM terminada en SC a 1310 nm	
Protocolo	OC-3/STM-1, OC-12/STM-4, Fast/Gigabit-Ethernet	

Cuadro 2: Características de algunos equipos fabricados por fsona. Cabe destacar el largo alcance de los transmisores, la transmisión a 1550 nm y los distintos tipos de conexiones y protocolos soportados

	LIGHTPOINTE	
	FLIGHTSTRATA HD	AIRLITE 100
Alcance (m)	750 – 2000	50
Tasa binaria (Mbps)	1485	10 – 100
Potencia tx. (mW)	—	—
Transceptores	4	1
λ (nm)	850	850
Interfaz	A fibra vía SC	RJ45
Protocolo	Estándar HDTV SDI	10/100-Base-TX Ethernet

Cuadro 3: Podemos observar como los equipos fabricados por light-pointe trabajan a 850 nm. Como puede apreciarse algunos equipos tiene interfaces compatibles con el par trenzado de cobre terminado en conector rj45

	Cablefree	
	Gigabit 1500	Access 4000
Alcance (m)	1500	4000
Tasa binaria (Mbps)	1500	155
Potencia tx. (mW)	19,0 dBm	24,5 dBm
Transceptores	—	—
λ (nm)	780	980
Interfaz	A fibra vía SC	A fibra vía SC
Protocolo	HDTV y otros	PDH/SDH por fibra/cobre

Cuadro 4: Algunos equipos son compatibles con protocolos de comunicación como hdtv o pdh

colimador, los grupos de lentes y los filtros protectores el transmisor emite al medio con potencias comprendidas algo inferiores. Los receptores suelen trabajar en el rango comprendido entre los -31 y los -3 dBm según equipo y fabricante. Siendo la mejor sensibilidad hallada los mencionados -31 dBm. Teniendo en cuenta que según los estudios las pérdidas oscilan entre los 3 dB/km en días claros y los 10 dB/km durante las tormentas más cerradas, es lógico pensar que este tipo de sistemas no está preparado para abarcar distancias mayores a algunos kilómetros.

Estos equipos están, como se ha mencionado anteriormente, destinados a cubrir la denominada *última milla* y su alcance, por tanto, no supera los 7,5 km en claro o los 3,25 km en días con fuertes lluvias. Este alcance, algo corto en comparación con otros sistemas inalámbricos, se ve compensado por un ancho de banda sin rival que en algunos casos permite transmitir flujos binarios de hasta 1.6 Gbps. Este factor es más notable si cabe dado que la mayoría de sistemas ofertados emplean un protocolo de señalización transparente en el que los bits se transmiten según van llegando. Se evita, por tanto, el uso de cabeceras y se consigue un gran rendimiento. En su defecto, en el modo de señalización transparente los terminales FSO utilizan un mecanismo denominado *Clock and Data Recovery* (CDR) para recuperar la señal de reloj y la fase del flujo de datos en recepción. Los equipos de FSO comercializados soportan también protocolos de señalización comunes como son Fast-Ethernet, Gigabit-Ethernet, OC-3/STM-1 o OC-12/STM-4.

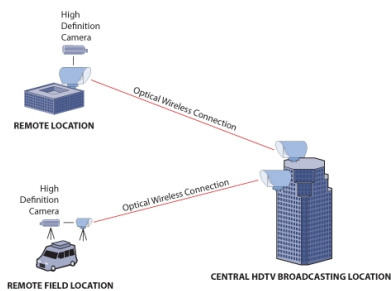
En cuanto a la señal de entrada esta puede proceder en algunos casos de pares trenzados de cobre terminados en conectores RJ45 o fibras monomodo o multimodo terminadas generalmente en conector de tipo SC o LC según las tarjetas de red instaladas en el dispositivo. Los terminales son compatibles con al menos uno de los siguientes protocolos de señalización a su entrada externa: 1000-Ethernet-LX, 1000-Ethernet-TX, 1000-Ethernet-SX u otros; el equipo al otro extremo extraerá una señal idéntica a la introducida en el equipo de origen.

4. Aplicaciones

4.1. Aplicaciones de los sistemas comerciales

Debido a sus propiedades los equipos comerciales pueden resolver las necesidades actuales de un gran ancho de banda proporcionando un alto rendimiento de una forma sencilla. Empleando este tipo de equipos pueden construirse desde enlaces punto a punto hasta redes malladas. Empleando un protocolo de señalización transparente, la tecnología FSO en su forma comercial puede dar servicio al ejército, a instituciones públicas o privadas, o a empresas. Las redes inalámbricas basadas en FSO pueden integrarse fácilmente en redes existentes y sus usuarios podrán empezar a explotarlas prácticamente desde su adquisición recuperando rápidamente la inversión efectuada.

Las características de los transceptores: inmunidad a condiciones extremas de trabajo, volumen y peso reducidos, y relativamente escaso consumo de potencia; los hace óptimos para su rápido despliegue en zonas catastróficas, ante fallos en redes críticas o durante eventos especiales. Además, elimina la necesidad de desplegar largos y costosos tramos de fibra de forma temporal como



(a) El peso, volumen y consumo de potencia reducidos de los equipos los hace altamente manejables y aptos para despliegue móvil

(b) Despliegue de un equipo para la retransmisión de una señal audiovisual de alta definición

Figura 6: Algunos ejemplos del uso dado a los equipos comerciales

ocurre en las retransmisiones de señal audiovisual digital de alta definición.

Al no interferir con otros equipos electrónicos los convierte en candidatos apropiados para comunicaciones inalámbricas en presencia de equipos médicos u otros equipos sensibles a las radiaciones electromagnéticas, y los hace susceptibles de formar parte en las redes celulares como vínculo de unión entre retransmisores, optimizando así el reuso de frecuencias.

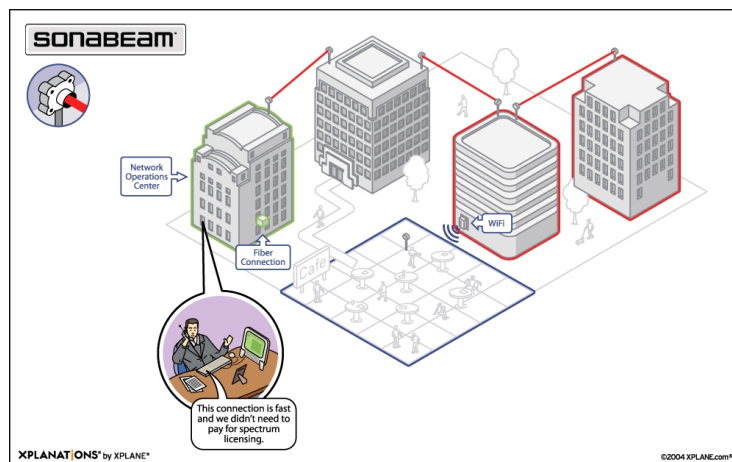


Figura 7: Red interempresarial o intraempresarial formada mediante enlaces basados en Free Space Optics

4.2. City-Wide Wireless Networks

Las redes móviles e inalámbricas han presenciado un gran progreso en los últimos años. De entre las principales técnicas de transmisión en comunicacio-

nes inalámbricas —FSO y ondas de radiofrecuencia— ésta última es la que ha alcanzado una mayor popularidad. Esto es debido a que la industria tenía un profundo conocimiento de esta tecnología, y a otras ventajas como el amplio rango de cobertura que puede proporcionar o la capacidad de las ondas de RF de atravesar la mayoría de obstáculos físicos.

No obstante, la demanda de servicios con requisitos de banda ancha también ha crecido recientemente. Además existe un interés creciente por sustituir la topología inalámbrica actual —pequeñas redes aisladas confinadas a una estación base— por redes inalámbricas de área metropolitana. La capacidad de los sistemas de RF de dar servicio se reduce a medida que aumenta el ancho de banda por los siguientes motivos.

- Necesidad creciente de visión directa, LOS, que reduce el rango de cobertura a medida que aumentan las exigencias de ancho de banda.
- Notable encarecimiento de los equipos que conlleva una pérdida de competitividad. Los equipos de FSO tienen una relación ancho de banda/precio mejor que los equipos de RF.
- Y la desventaja principal, la proliferación de sistemas basados en comunicaciones por RF ha llevado al espectro de RF a su límite. Además parte considerable de ese espectro se encuentra regulada y es necesaria la obtención de licencias para su uso.

A diferencia de los sistemas de RF, los fundamentados en comunicaciones FSO no necesitan de licencia. Además, dadas las características de esta tecnología es prácticamente imposible que dos enlaces cercanos entre sí se interfieran.

Las redes inalámbricas de área metropolitana están pensadas para cubrir ciudades enteras por medio de una nube de puntos de acceso inalámbricos interconectados por una red de backbone. Esta configuración se conoce como multicast virtual. En este tipo de configuración la comunicación se realiza desde el terminal de usuario al punto de acceso, esta se reconduce por la red de backbone hasta el punto de acceso de destino y de este al terminal de usuario remoto. La cobertura de este tipo de redes está, por tanto, fuertemente limitada por la mencionada red de backbone, de modo que en aquellos lugares donde ésta no llegue la red inalámbrica no podrá desplegarse. Es necesaria una solución alternativa capaz de transportar flujos de información de tamaño similar a los transmitidos por las redes backbone de fibra empleadas por los ISPs, pero con un coste significativamente inferior. La solución de mayor viabilidad al respecto son las redes inalámbricas basadas en la interconexión de nodos mediante sistemas FSO.

El diseño de una red de estas características presenta dos dificultades principales: la distribución de los nodos y el número de transceptores por nodo, lo que definirá cuantos enlaces diferentes puede formar cada nodo con sus vecinos. Es verdaderamente importante resolver eficazmente estos aspectos pues de ello dependerá la confiabilidad, la homogeneidad y el coste de la red. A medida que aumenta el número de transceptores por nodo podría pensarse que aumentará la homogeneidad de la red. Lejos de producirse esta situación, el exceso de transceptores puede dar lugar a que ciertos nodos que disfruten de posiciones aventajadas en la red acaparen todo el tráfico y se conviertan en

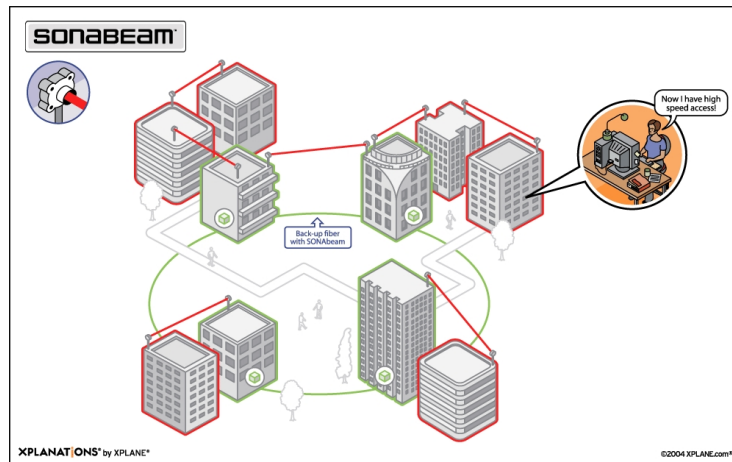


Figura 8: Red inalámbrica metropolitana soportada por una red de backbone basada en Free Space Optics

cuellos de botella. Todo ello sin tener en cuenta el encarecimiento de la red. Por otro lado, la disposición de los nodos es crucial, pues determinará cuantos enlaces de LOS podrá formar un nodo con sus vecinos. El cambio adaptativo de topología es un recurso muy importante de estas redes pues le permiten salvar situaciones de mala visibilidad producidas por fenómenos meteorológicos. Es por ello que en la actualidad se considera la opción de dotar a los nodos de transceptores móviles que amplíen sus posibilidades de comunicación, pero para ello es necesario desarrollar nuevos sistemas de apuntado capaz de orientar los transceptores según indique el protocolo de señalización.

4.3. Intersatellite Link

Otra de las aplicaciones más interesantes que puede tener la tecnología FSO es su aplicación directa en los enlaces intersatelitales. Todas las ventajas que ofrece una comunicación FSO se ven aún más beneficiosas debido a la ausencia de efectos atmosféricos, que, como ya se ha comentado, constituyen el mayor problema en los enlaces FSO. Las altas tasas binarias y su flexibilidad y sencillez, hacen que este sistema se presente como la solución a las demandas globales de intercambio de información a grandes velocidades. La siguiente tabla muestra las perspectivas de futuro que se pretenden alcanzar, con las distintas características que pueden ser implementadas en el enlace.

En cuanto a los terminal ópticos a bordo del segmento espacial, se encuentran un telescopio óptico, un banco óptico con un sistema de apuntamiento fino, un sensor de comunicaciones y los diodos láser, sistema de control termal, mecanismo de suspensión de dos ejes y por último mecanismos de cerrado necesarios durante la fase de lanzamiento.

Además, estos sistemas configuran una red más o menos compleja dependiendo de las órbitas en las que se encuentren rotando. Así, podremos distinguir entre sistemas geoestacionarios y sistemas no geoestacionarios. Los sistemas geoestacionarios, al encontrarse todos en la misma órbita, tendrán

Item	Current Status or ISL's Feature	Requirements	Improvements / Perspectives
Optical Source	- 100-mW class AlGaAs LD - Nd:YAG laser	- High-efficiency, 1-W class source	- MOPA, EDFA, NDFA - Beam combining
Photo-Detector	- Si-APD@1GHz BW - PMT	- High-speed, low noise detector	- Low-loss OEIC - Microwave photonics
Modulation/ Demodulation	- IM/DD (200 photons/bit@50Mbps) - NRZ, RZ, Bi-phase, PPM	- Large current/high-speed drive circuit - High sensitivity receiver - WDM	- IM/DD with optical pre-amplifier (EDFA, NDFA) (<50 photons/bit@10Gbps) - FEC Codec, Coherent scheme
Signal Format	- Digital		- Digital/analog
Access Type	- one-to-one	- Multiple access	- High-speed switching
Transmission Media	- Free-space (dispersionless)	- Space networking - High-speed feeder link - Mitigate atmospheric turbulence effects	- Interconnection with fiber network - Multi-aperture transmission - Adaptive optics
Transmit Wave	- Spatial beam with 10 μ rad divergence	- Diffraction-limited optical beam	- High wave-front quality optics - High-gain optical antenna
Transmit Efficiency *	- $T_p A_t A_r / (\lambda L)^2$ - 20-cm class telescope	- Precise pointing control - Low-loss optics	- Electrical beam deflection - Application of fiber optics
Link Acquisition	- Initial acquisition by CCD array sensor (0.2 deg. FOV) - 1 μ rad accuracy in fine tracking and point-ahead control	- Fast, reliable spatial acquisition and tracking - Sub-micro radian tracking/pointing	- High-speed image processor - Fiber nutator - QAPD - Frequency acquisition/tracking scheme for coherent comm.
Environment	- Background light - Mechanical noise at launch - Thermal & cosmic radiation	- Narrow bandpass filter - Thermal system design - EMC	- e. g., Atomic line filter - Space qualified hardware

* T_p : Pointing loss, A_t , A_r : Effective area of antenna apertures, λ : Wavelength, L : Link distance

Cuadro 5: Estado actual y perspectivas de futuro para los enlaces ópticos intersatelitales

todos los satélites la misma velocidad, por lo que el alineamiento resultará mucho más sencillo que en el caso de los sistemas no geoestacionarios. Éstos, por su parte, requerirán de una topología de red mas compleja, ya que, entre otras cosas, será dependiente del tiempo (cada satélite tendrá una velocidad distinta). Por tanto, el seguimiento de los satélites se hace sumamente importante para poder realizar un correcto alineamiento que permita una comunicación satisfactoria.

4.4. Wavelength Division Multiplexing systems on Free Space Optics communications

Los equipos vistos hasta aquí empleaban un esquema de transmisión opaco en el que la información se reconvertía al dominio electrónico para modular un láser que se utilizaba como transmisor. Existe adicionalmente otro tipo de esquema de transmisión, denominado transparente, con el que se han conseguido transmisiones estables en distintos experimentos.

La principal diferencia frente a los esquemas opacos reside en que toda la comunicación se realiza exclusivamente en el plano óptico. Para ello se toma la señal directamente desde la fibra óptica y se «acopla» al medio mediante unos colimadores controlados por unos mecanismos de seguimiento de haz. Una vez la señal llega al extremo opuesto del enlace inalámbrico se inyecta en la fibra siguiendo el procedimiento opuesto. Al transmitir el haz de luz a través del aire mediante colimadores se consigue un resultado similar al que se obtendría si las fibras estuviesen conectadas entre sí sin fisuras. Este resultado permite no sólo eliminar el cuello de botella propio de la conversión

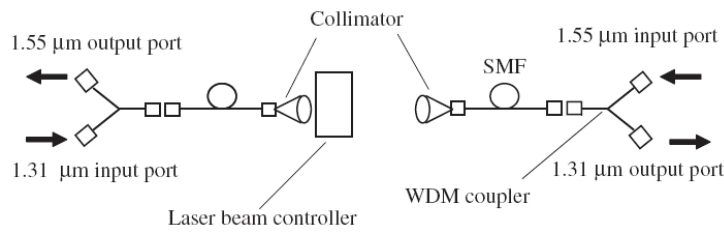


Figura 9: Transmisión de una señal Wavelength Division Multiplexing mediante Free Space Optics transparente de una fibra monomodo a otra

óptico-electro-óptica si no que además permite la transmisión de señales de WDM y DWDM manteniendo la filosofía de este tipo de sistemas.

4.5. Radio on Free Space Optics

Esta tecnología surge con el propósito de cubrir zonas donde el uso del espectro radioeléctrico es difícil o está prohibido. Consiste en confinar las señales de radiofrecuencia en una señal óptica inalámbrica al modo de subportadoras y transmitir las señales de radio vía FSO. Hasta aquí su funcionamiento es similar al de los sistemas de *Radio on Fiber* (ROF). Los estudios realizados se centran en aplicaciones según su localización, así podemos encontrar sistemas outdoor y sistemas indoor.

Los sistemas indoor pretenden dar una cobertura similar a la que ofrecen los puntos de acceso inalámbricos correspondientes a otras tecnologías como las relacionadas con el estándar 802.11 del IEEE. Existen dos métodos de proporcionar un enlace de ROFSO en interiores. Uno es el enlace directo entre transceptores directivos que se apuntan entre sí. Y otro es el enlace indirecto entre transceptores de gran ancho de haz que no necesitan apuntarse. Las estaciones base de enlace indirecto pueden dar servicio a varias estaciones de usuario simultáneamente, por el contrario sólo es posible dar servicio a un usuario por punto de acceso mediante enlaces direccionales.

Existe por otro lado otra clasificación de los sistemas de ROFSO indoor que los distingue según el método que empleen para acceder a la señal. Aquellos que necesitan de la existencia de un camino ininterrumpido entre transmisor y receptor se denominan sistemas LOS. Mientras que los que pueden comunicarse con la estación base utilizando las reflexiones en techos y paredes se conocen como sistemas NLOS. Los primeros son más sencillos y consiguen buenos resultados en cuanto a pérdidas de camino, no obstante, la comunicación en sistemas LOS se pierde si se rompe la línea de visión directa. Es por esto que se están haciendo grandes esfuerzos por mejorar las características de cobertura y disponibilidad en sistemas NLOS usando técnicas con espejos cóncavos.

Otra de las importantes aplicaciones de los sistemas ROFSO es la de transmitir señales WDM o DWDM a través de un enlace inalámbrico. En este caso se denomina al sistema ROFSO outdoor puesto que el flujo WDM está compuesto por portadoras en las que se multiplexa tráfico correspondiente a distintas

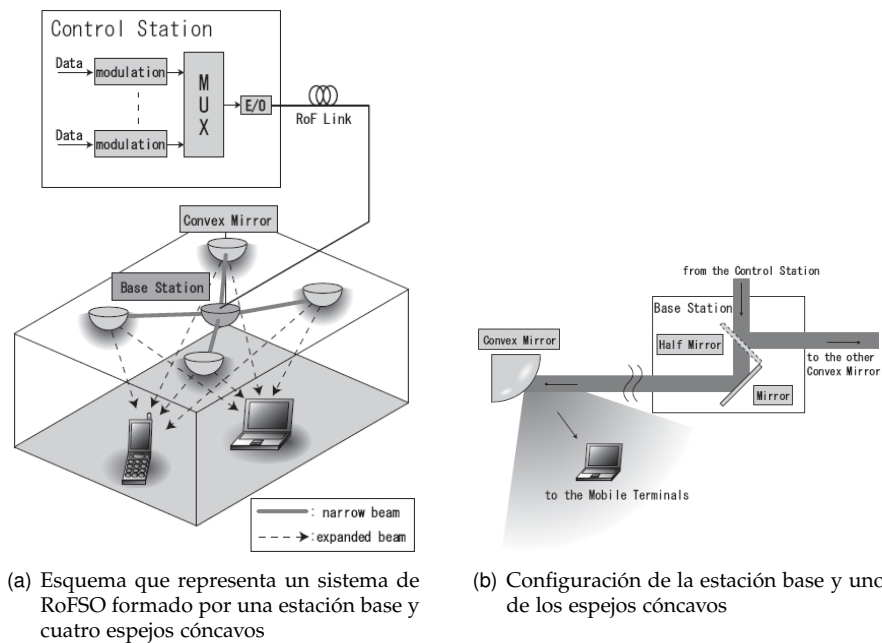


Figura 10: Modelo de espejos cóncavos para la consecución de un sistema RoFSO indoor NLOS de cobertura homogénea

señales de radiofrecuencia. El propósito de estos sistemas es emular un enlace de RoF en el medio inalámbrico y hasta el momento se han conseguido resultados exitosos.

Índice de figuras

1.	Atenuación por lluvia	5
2.	Atenuación por niebla	5
3.	Atenuación geométrica	6
4.	Mecanismos de compensación	7
5.	fSONA Sonabeam M	9
6.	Sistemas comerciales	12
7.	Red empresarial basada en FSO	12
8.	City-Wide Wireless Network	14
9.	Transmisión WDMFSO	16
10.	Sistema RoFSO indoor NLOS	17

Referencias

- [1] K. Tsukamoto, H. Onodera, K.-H. Kim, T. Nakamura, T. Higashino, Y. Aburakawa, S. Komaki, K. Wakamori, K. Takahashi, T. Suzuki, K. Kazaura, A. Shah, K. Omae, M. Matsumoto, and T. Satou, "Link design of

- radio on free space optic system for heterogeneous wireless services," in *Microwave Photonics, 2008. Jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. MWP/APMP 2008. International Topics Meeting on*. Gold Coast, Qld: Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ., Suita, Sep./Oct. 2008, pp. 232–235.
- [2] A. Mahdy and J. Deogun, "Optimizing free space optics for city-wide wireless networks," in *Networking, 2007. ICN '07. Sixth International Conference on*, Martinique, Apr. 2008, pp. 66–66.
 - [3] N. Fukumoto, A. Murakoshi, K. Tsukamoto, and S. Komaki, "A study on unrepeatereed distributed antenna method with convex mirrors for radio on free space optics system," in *Microwave Photonics, 2005. MWP 2005. International Topical Meeting on*, Oct. 2005, pp. 185–188.
 - [4] K. Yoshida, T. Tsujimura, K. Shiraki, and I. Sankawa, "A free space optics system for seamless transmission between single-mode optical fibers," in *SICE, 2007. Annual Conference*, Takamatsu, Sep. 2007, pp. 2333–2336.
 - [5] K. Yoshida, T. Tsujimura, and T. Kurashima, "Seamless transmission between single-mode optical fibers using free space optics system," in *SICE Annual Conference, 2008*, Tokyo, Aug. 2008, pp. 2219–2222.
 - [6] G. Mecherle, "Active pointing for terrestrial free space optics," in *Lasers and Electro-Optics Society, 2002. LEOS 2002. The 15th Annual Meeting of the IEEE*, vol. 2. fSONA, Nov. 2002, pp. 451–452.
 - [7] M. Moresco, A. Leone, F. Curti, D. Beleffi, G. Tosi Forin, G. Cincotti, M. S. Moreolo, and A. Teixeira, "Dense wavelength division multiplexed transparent for ultrahigh bit rate applications and single channel opaque free space optics systems," in *Optical Communications, 2006. ECOC 2006. European Conference on*. Cannes, France: University Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy, Sep. 2008, pp. 1–2.
 - [8] D. Forin, G. Tosi Beleffi, F. Curti, N. Corsi, V. De Sanctis, V. Sacchieri, A. Teixeira, and G. Cincotti, "On field test of a wavelength division multiplexing free space optics transmission at very high bit rates," in *Telecommunications, 2007. ConTel 2007. 9th International Conference on*, Zagreb, Jun. 2007, pp. 77–80.