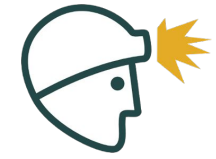


Comunicaciones en ductos

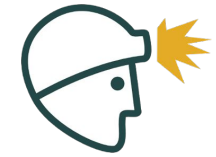
Javier Baliosian, Eduardo Grampín
<baliosian,grampin>@fing.edu.uy

Robótica autónoma en entornos hostiles



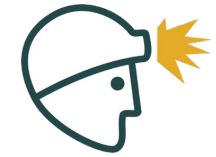
Agenda

- Contexto
- Nociones de radiofrecuencia
- Propagación en ductos
- Estrategias de comunicaciones para inspección de ductos



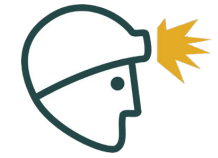
Contexto

- Inspección de infraestructuras
 - En particular, ductos de saneamiento (cloacas) Otras aplicaciones: inspecciones de edificios (azoteas, muros), palas de molinos, etc
- Entorno hostil
 - Robots con distintas estrategias, mono-robot, multi-robots



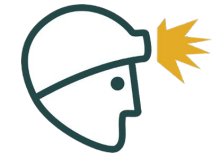
Contexto

- Requerimientos de comunicación
 - Datos robots→teleoperador, típicamente video (resolución?)
 - Control en ambos sentidos
 - Entre robots: necesario para estrategias multi-robot
- Típicamente: comunicación inalámbrica
 - Múltiples dificultades
 - Numerosas alternativas tecnológicas
 - Es necesario entender cómo funciona la RF en los ductos



Nociones de radiofrecuencia

- Conceptos tradicionales de propagación en el espacio libre
 - Extraído de “Introduction to Wireless and Mobile Systems 3rd Edition” de Dharma P. Agrawal, Qing-An Zeng

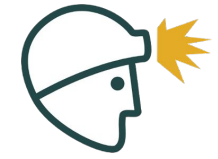


Speed, Wavelength, Frequency

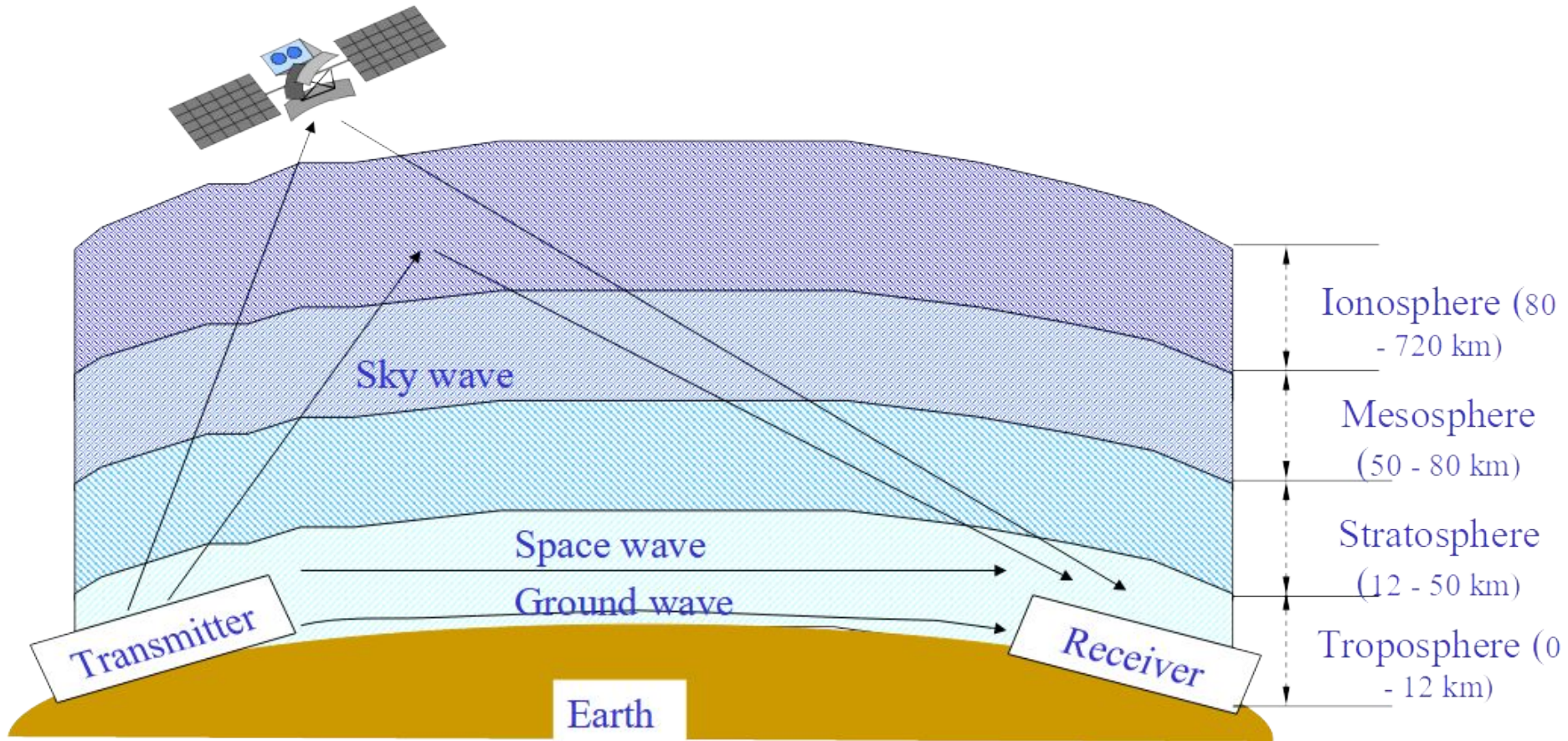
Light speed = Wavelength x Frequency

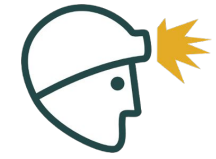
$$= 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300,000 \text{ km/s}$$

System	Frequency	Wavelength
AC current	50 Hz	6,000 km
FM radio	100 MHz	3 m
Cellular	800 MHz	37.5 cm
Ka band satellite	20 GHz	15 mm
Ultraviolet light	10^{15} Hz	10^{-7} m



Tipos de Ondas





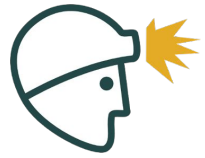
Radio Frequency Bands



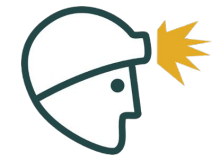
Classification Band	Initials	Frequency Range	Characteristics
Extremely low	ELF	< 300 Hz	Ground wave
Infra low	ILF	300 Hz - 3 kHz	
Very low	VLF	3 kHz - 30 kHz	
Low	LF	30 kHz - 300 kHz	
Medium	MF	300 kHz - 3 MHz	Ground/Sky wave
High	HF	3 MHz - 30 MHz	Sky wave
Very high	VHF	30 MHz - 300 MHz	Space wave
Ultra high	UHF	300 MHz - 3 GHz	
Super high	SHF	3 GHz - 30 GHz	
Extremely high	EHF	30 GHz - 300 GHz	



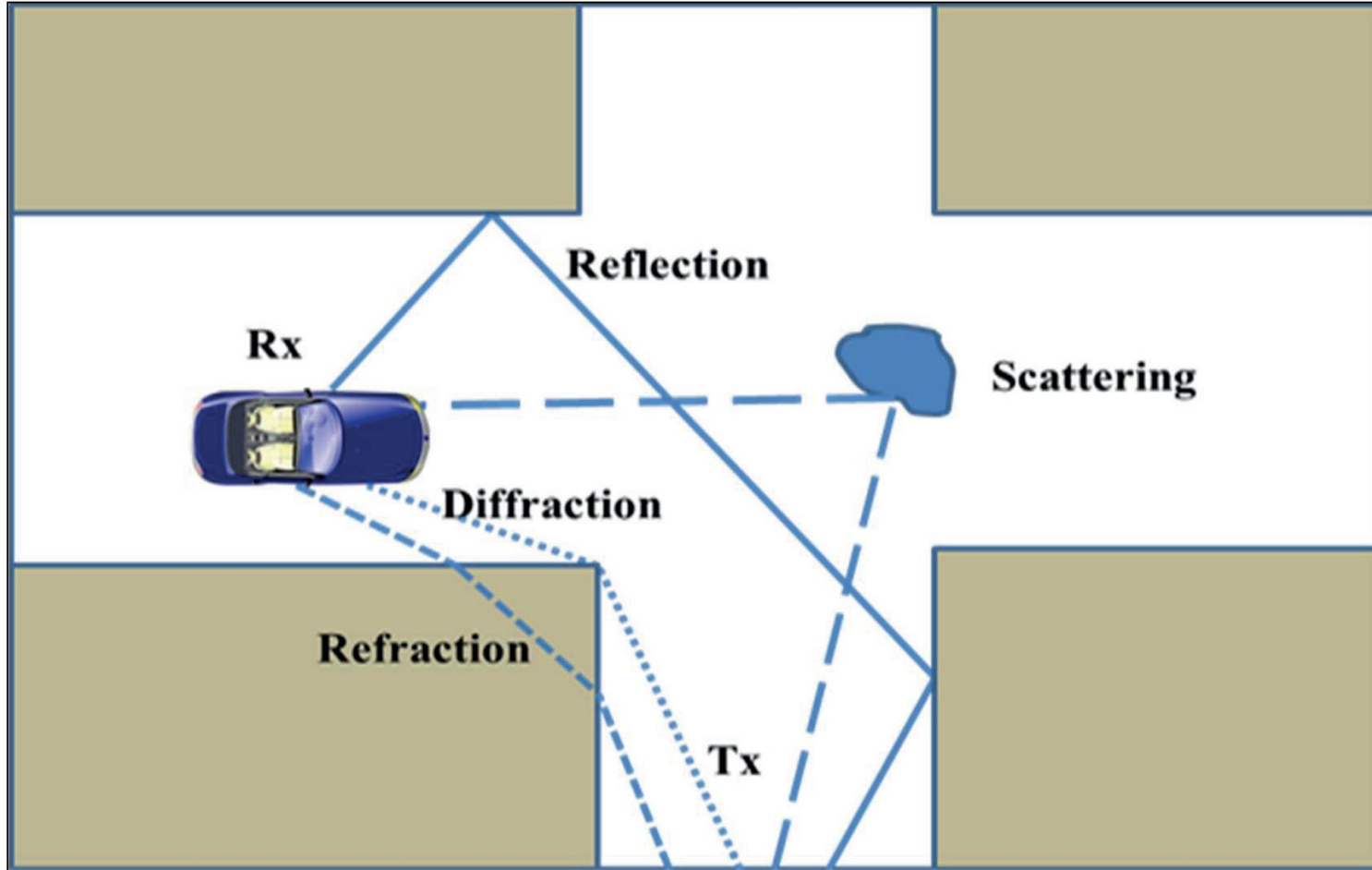
Propagation Mechanisms

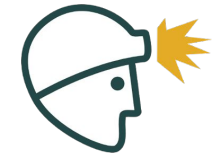


- Reflection
 - Propagation wave impinges on an object which is large as compared to wavelength
 - e.g., the surface of the Earth, buildings, walls, etc.
- Diffraction
 - Radio path between transmitter and receiver obstructed by surface with sharp irregular edges
 - Waves bend around the obstacle, even when LOS (line of sight) does not exist
- Scattering
 - Objects smaller than the wavelength of the propagation wave
 - e.g. foliage, street signs, lamp posts

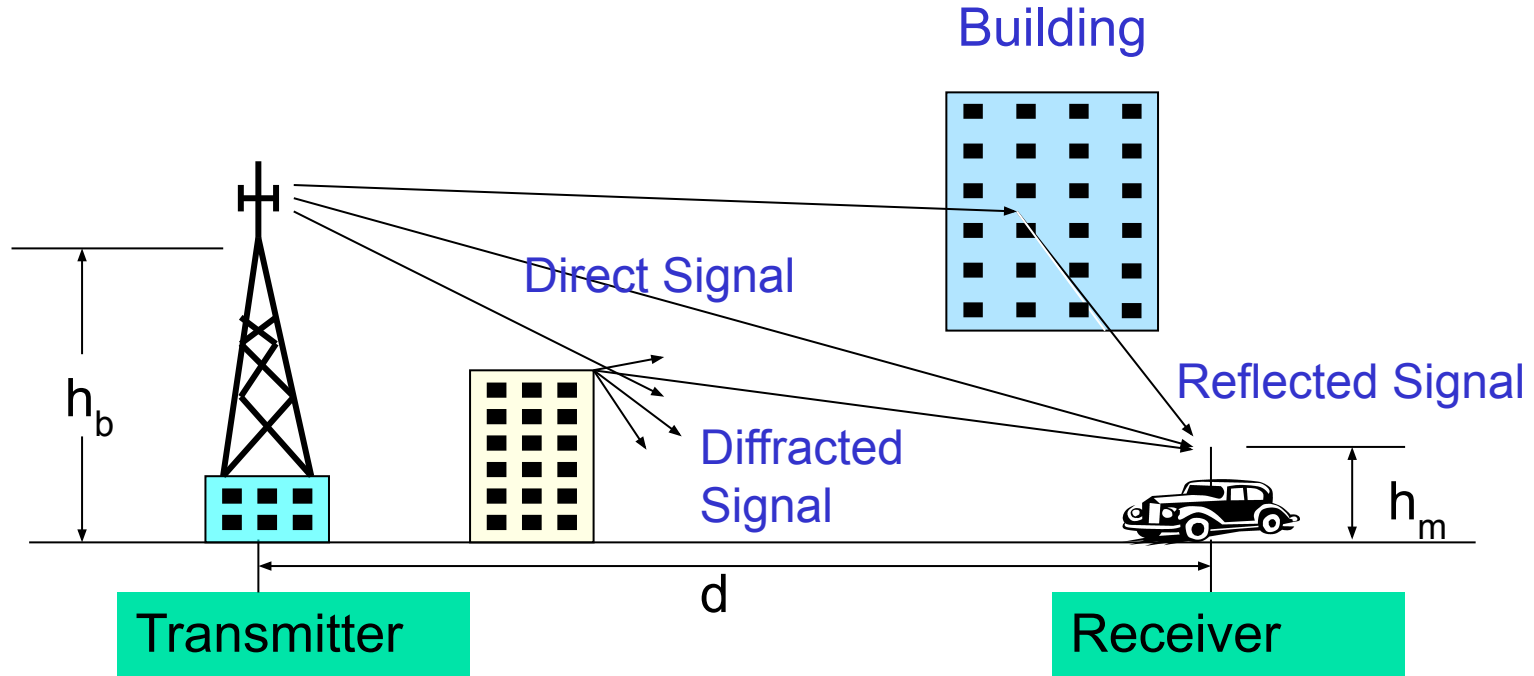


Propagation Mechanisms

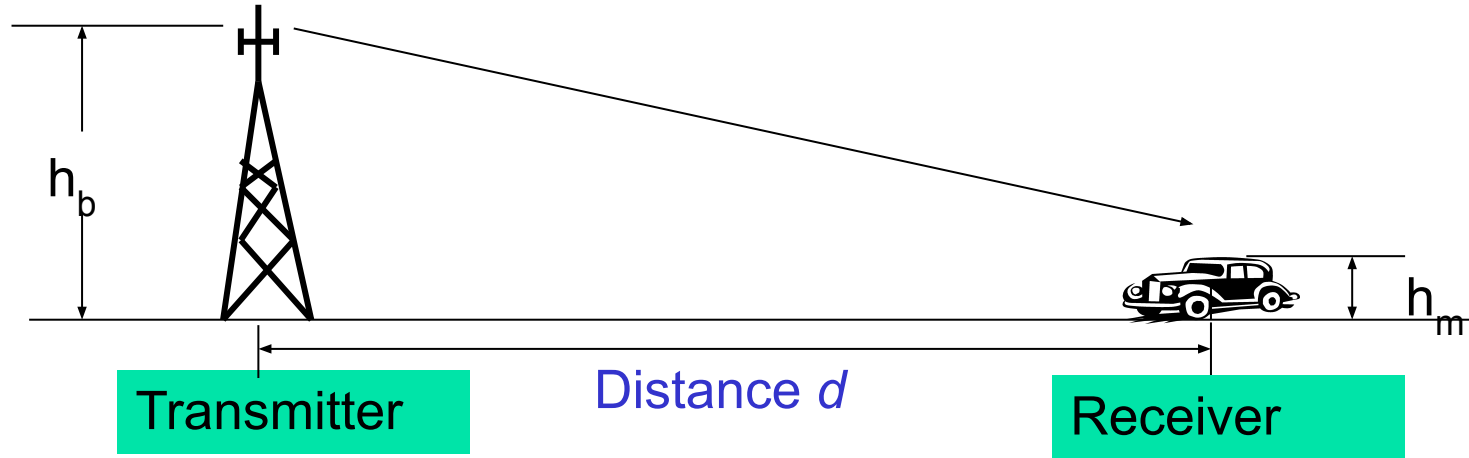




Radio Propagation Effects



Free-space Propagation



The received signal power at distance d :

$$P_r = \frac{A_e G_t P_t}{4\pi d^2}$$

where P_t is transmitting power, A_e is effective area, and G_t is the transmitting antenna gain. Assuming that the radiated power is uniformly distributed over the surface of the sphere.



dB - decibel

Decibel, a logarithmic unit of intensity used to indicate *power* lost or gained between two signals. Named after Alexander Graham Bell.

$$10 \log (P1/P2)$$

Extraído de “COSC 393 Wireless Networks”, Georgetown University, Spring Term 2004

Instructor : Bala Kalyanasundaram



Fading

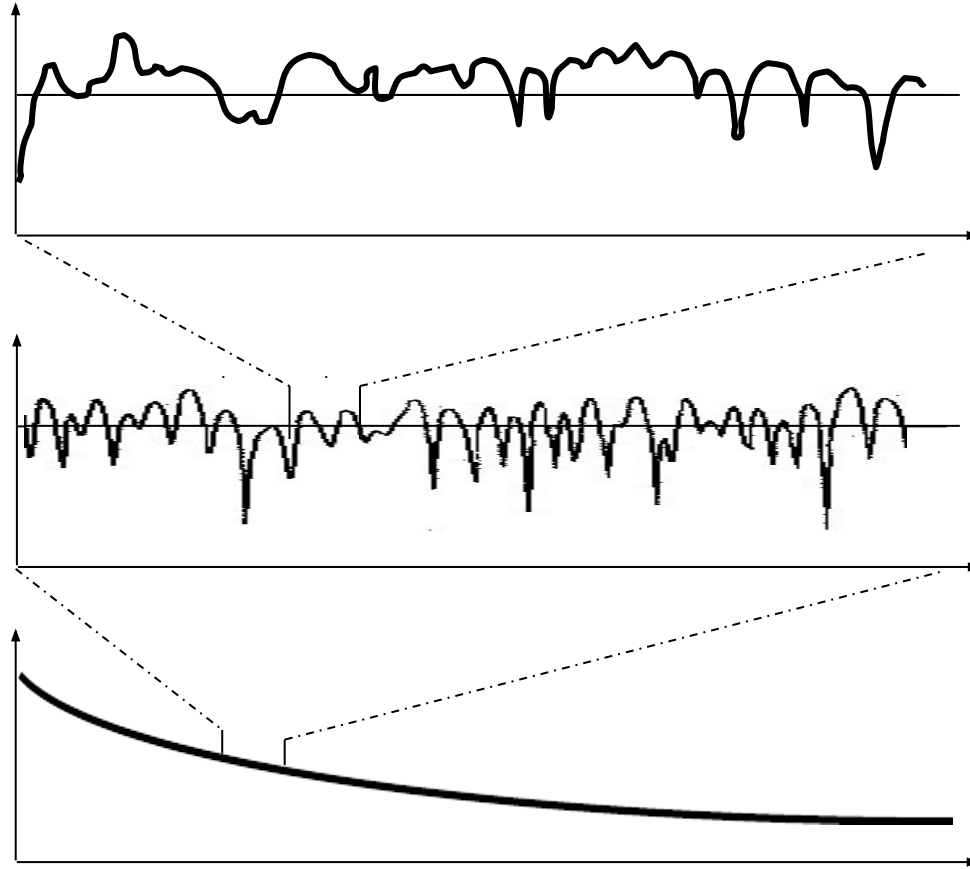
Fast Fading
(Short-term fading)

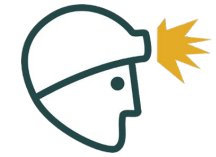
Slow Fading
(Long-term fading)

Signal
Strength
(dB)

Path Loss

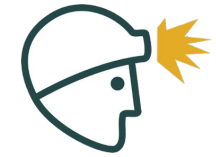
Distance





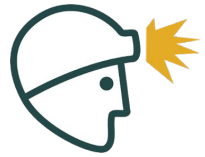
Propagación en ductos

- Basado en "RF Propagation in Mines and Tunnels: Extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels" [2]
- Este artículo presenta resultados de la medición de la propagación de radiofrecuencia (RF) en túneles y minas para señales con polarización cruzada, horizontal y vertical.
- Se han realizado exhaustivas mediciones en túneles de hormigón, minas de carbón con polvo de roca y hormigón proyectado ("shotcrete"), con y sin malla conductora, y minas de roca dura. Las medidas incluyen atenuación de potencia en distancias con y sin línea de visión (LOS) en cuatro frecuencias (455, 915, 2450 y 5800 MHz) que son comunes a las radios subterráneas.



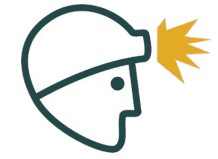
Propagación en ductos

- Los datos muestran la importancia de las dimensiones del túnel, la frecuencia, la polarización y las propiedades eléctricas de las paredes del túnel en las características de propagación de la señal.
- Las medidas de propagación generalmente muestran una rápida caída de potencia en los primeros 10 a 50 m (denominada “zona cercana”) seguida de una disminución lineal más gradual (“zona lejana”) en función de la distancia.
- Se presentan asimismo resultados de la simulación basados en los métodos **modal** y de **trazado de rayos**, que coinciden con los resultados de la medición en un túnel de hormigón recto, lo que indica que el comportamiento de propagación en dicho entorno puede modelarse adecuadamente mediante la teoría básica de la guía de onda dieléctrica.

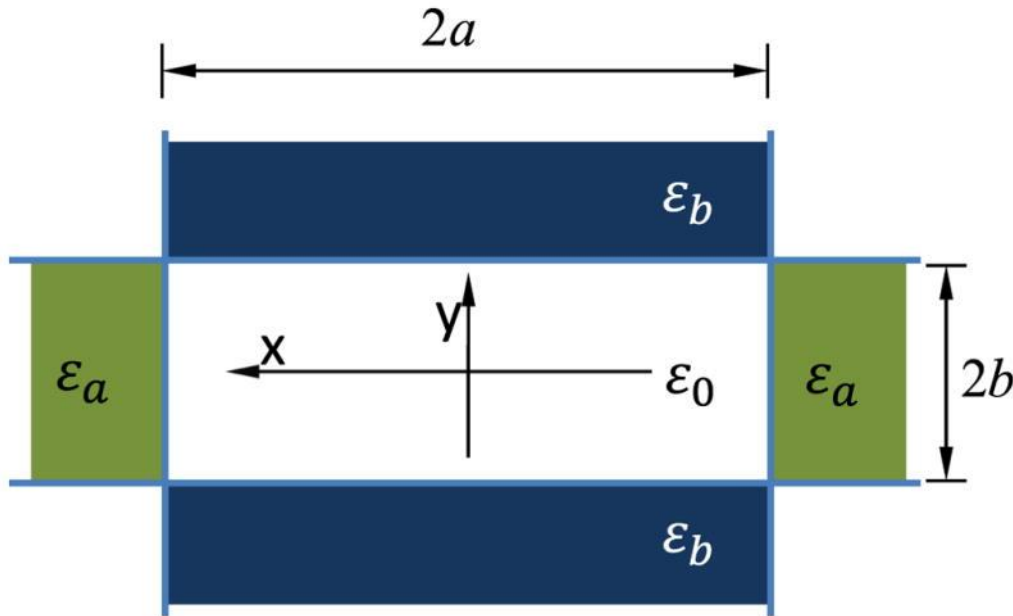


Propagación en ductos

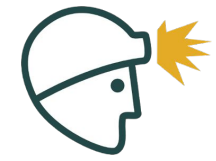
- El método de trazado de rayos trata las ondas de radio como tubos de rayos, y el campo eléctrico en cualquier ubicación dentro de un túnel se representa mediante la suma de los rayos que llegan a la ubicación.
- El método modal, por otro lado, asume que las ondas se propagan en forma de modos y el campo eléctrico se representa en términos de una suma de modos.



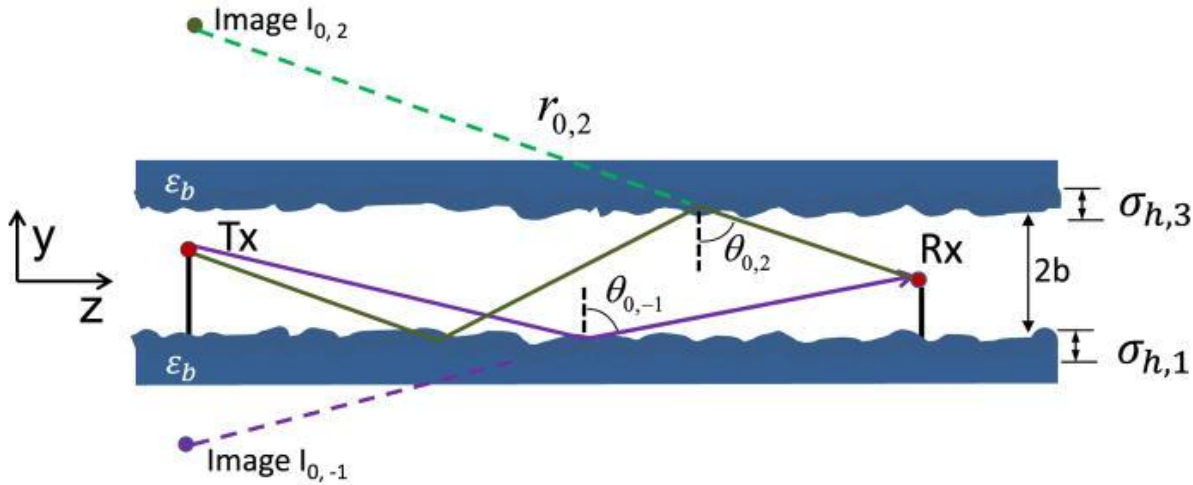
Propagación en ductos



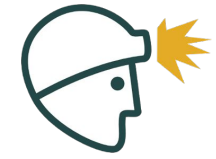
Modelo del túnel rectangular,
imagen extraída de [2,3]



Propagación en ductos



Método de trazado de rayos,
imagen extraída de [2,3]



Propagación en ductos

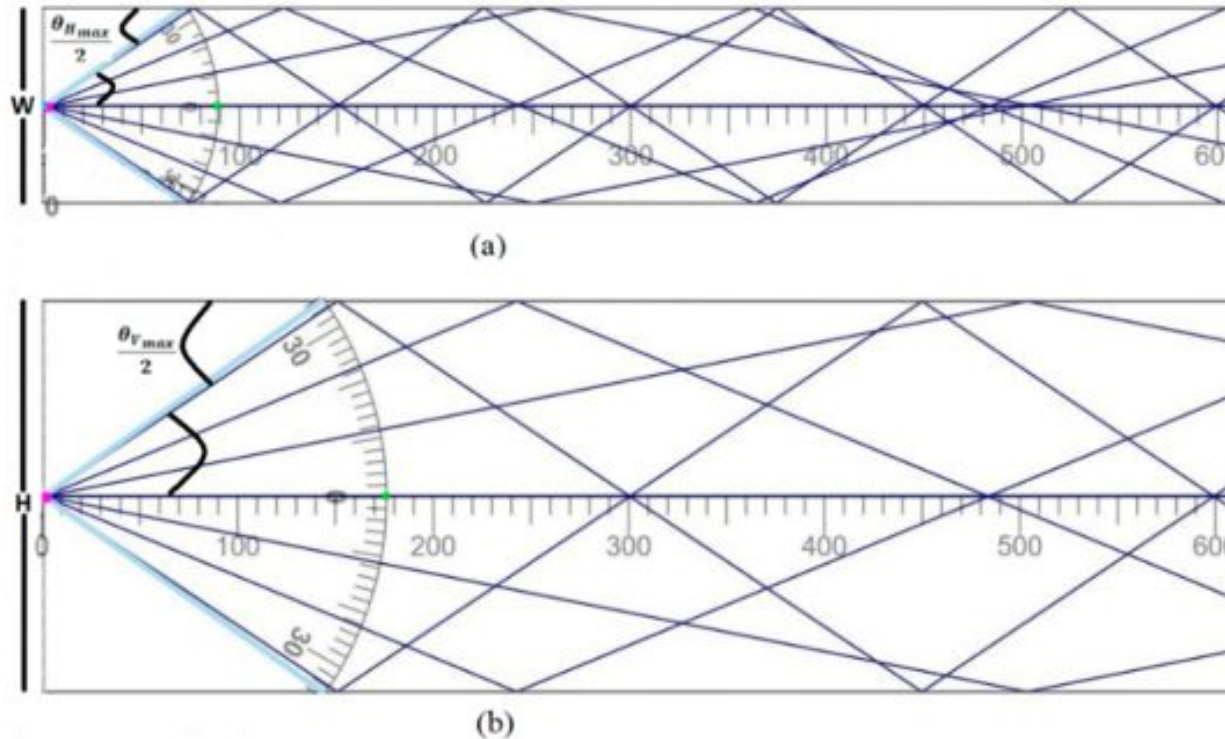
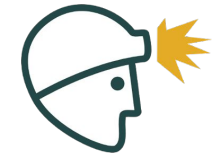
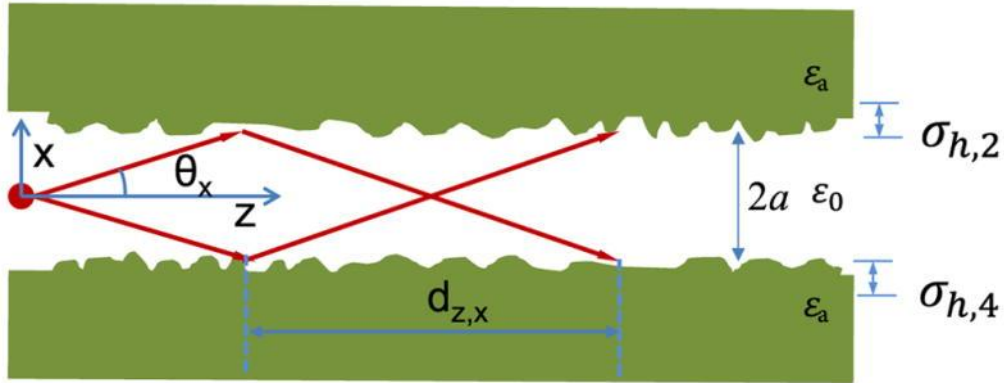


Figure 1. A two-dimensional illustration of ray tracing inside a tunnel from the (a) side walls, and (b) ceiling/floor reflections.

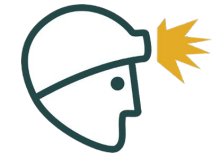
Método de trazado de rayo, imagen extraída de [4]



Propagación en ductos

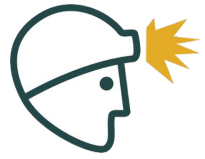


Método modal, imagen
extraída de [2,3]



Propagación en ductos

- Para el método de trazado de rayos, el efecto de rugosidad se tiene en cuenta aplicando un coeficiente de reflexión de Fresnel modificado a cada rayo, ya que el rayo se refleja en diferentes paredes del túnel.
- Para el método modal, el coeficiente de reflexión de Fresnel modificado se aplica a cada modo, que se ve como una mezcla de cuatro ondas planas.
- Los dos métodos son dos puntos de vista diferentes del mismo problema y, por lo tanto, se puede probar que son matemáticamente equivalentes.



Propagación en ductos

- Experimentos

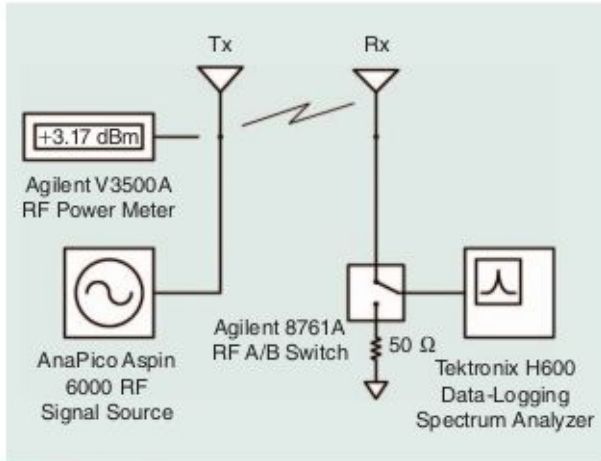
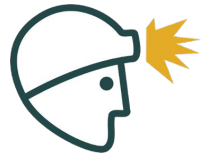


FIGURE 2. The RF test apparatus block diagram.



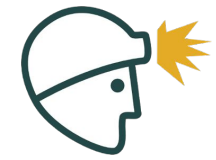
FIGURE 3. The RF test apparatus.

Imágenes extraídas de [2]



Propagación en ductos

- Las variables a tener en cuenta son las **dimensiones** del ducto, la **frecuencia** de TX, la **polarización** de la señal, la **permisividad** de las paredes, y la **posición** de la antena.
- Cuando la frecuencia aumenta, la pérdida de antena aumenta, pero la pérdida de propagación disminuye.
 - Compromiso para encontrar la frecuencia óptima (pérdida mínima) en un entorno de túnel.
 - Según las condiciones geométricas del túnel, las señales de alta frecuencia son mejores para la comunicación de largo alcance.



Propagación en ductos: resultados en túnel de hormigón

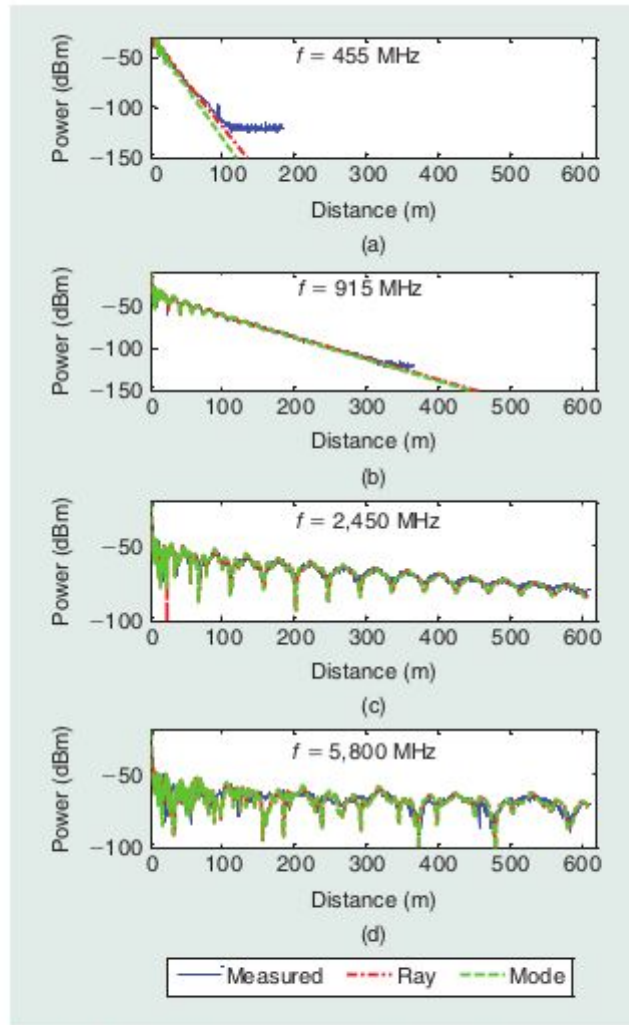


FIGURE 5. (a)–(d) The measured and simulated power attenuation over distance in a concrete tunnel (horizontal polarization).

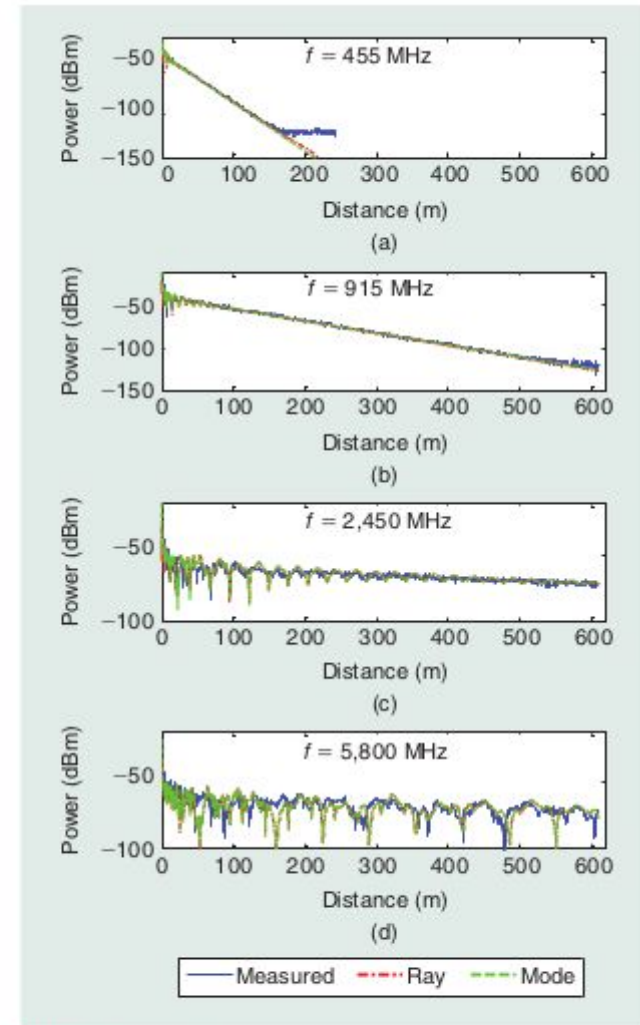
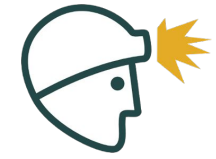


FIGURE 6. (a)–(d) The measured and simulated power attenuation over distance in a concrete tunnel (vertical polarization).





Propagación en ductos: resultados en mina de “shotcrete”

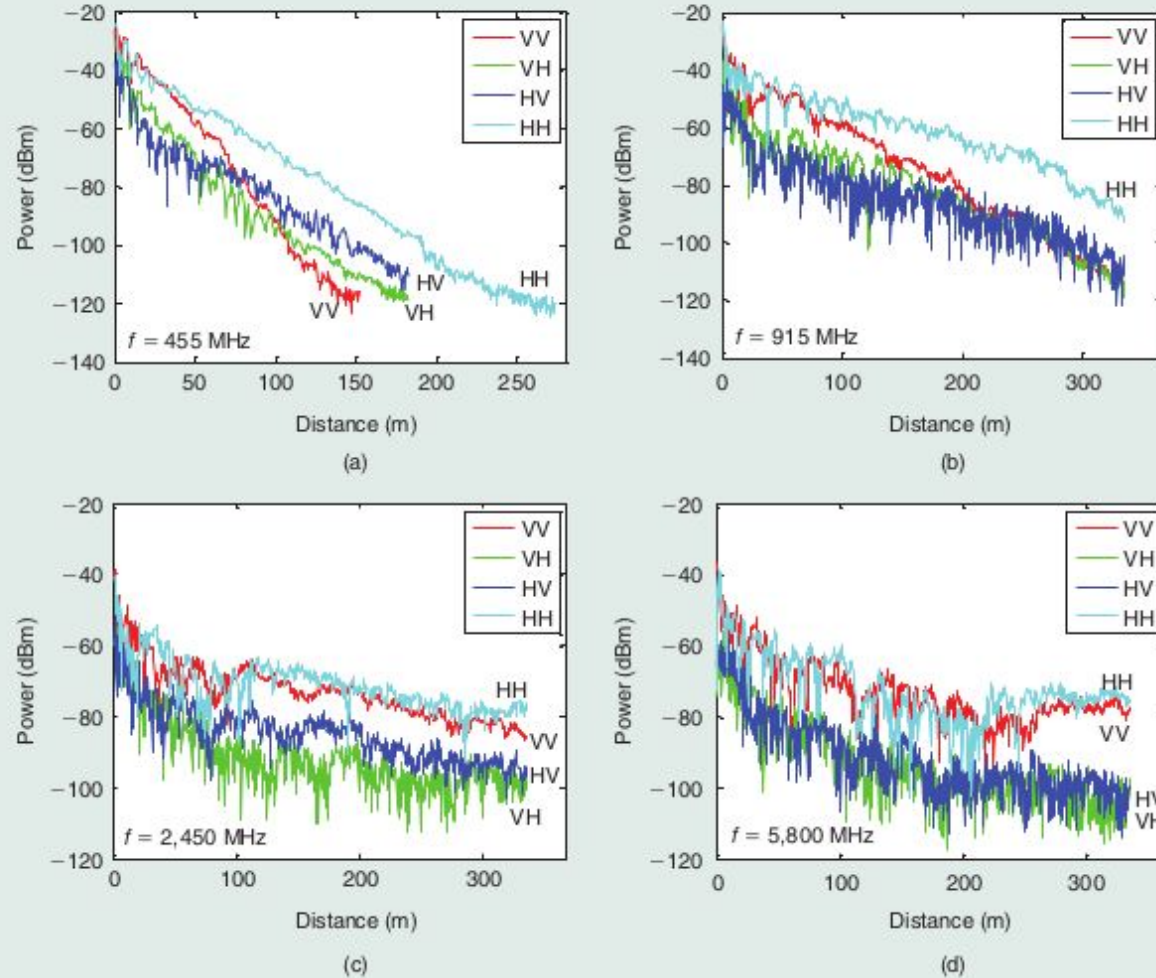
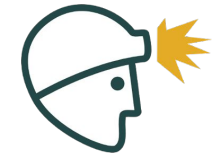


FIGURE 8. The propagation measurement results in the Pittsburgh experimental mine at (a) 455 MHz, (b) 915 MHz, (c) 2,450 MHz, and (d) 5,800 MHz.



Propagación en ductos

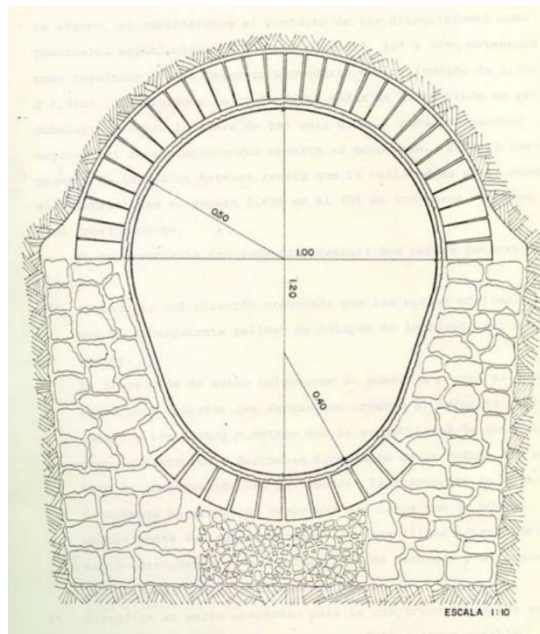
Resumen de resultados

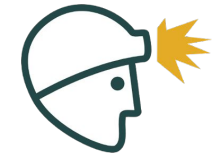
**TABLE 2. A SUMMARY OF THE MEASURED ATTENUATION SLOPES
IN DIFFERENT MINES/TUNNELS.**

Index	Testing Sites	$W \times H$ (m)	455 MHz		915 MHz		2,450 MHz		5,800 MHz	
			Vertical Slope dB/100 m	Horizontal Slope dB/100 m	Vertical Slope dB/100 m	Horizontal Slope dB/100 m	Vertical Slope dB/100 m	Horizontal Slope dB/100 m	Vertical Slope dB/100 m	Horizontal Slope dB/100 m
1	Concrete tunnel	1.8 × 2.4	56.48	77.83	14.16	25.06	2.03	3.67	1.86	1.49
2	Pittsburgh experimental coal mine	2.2–4.0 × 1.8–2.3	67.32	35.22	22.61	12.1	7.42	7.81	N/A	N/A
3	Hard-rock coal mine	3.0 × 2.4–2.7	50.7	55.7	28.45	26.8	6.44	5.21	3.56	2.18
4	Wide eastern coal mine	6.1 × 1.7–2.0	107.79	16.37	19.9	8.15	12.25	8.48	10.65	6.26
5	High-roof western coal mine	6.1 × 2.1–2.7	51.49	12.16	11.62	6.86	6.91	5.04	4.42	4.34



Caso de uso: saneamiento de Montevideo

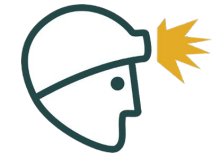




Propagación en ductos

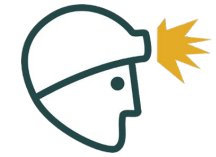
- Ducto FING.
- Relevamiento propio.
- Medidas basadas en
 - LoRa
 - WiFi 2.4 GHz
 - WiFi 5 GHz





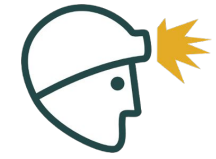
Elementos básicos de LoRa

- LoRa utiliza las bandas de radiofrecuencia de subgigahercios sin licencia 863-870/873 MHz en Europa; 915-928 MHz en Sudamérica; 902-928 MHz en Norteamérica; 865-867 MHz en la India; 915-928 MHz en Asia;y
- 2.4GHz y 4GHz en todo el mundo.
- LoRa permite transmisiones de largo alcance con bajo consumo de energía.
- La tecnología cubre la capa física, mientras que otras tecnologías y protocolos como LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) cubren las capas superiores.
- Puede alcanzar velocidades de datos entre 0,3 kbit/s y 27 kbit/s, dependiendo del factor de propagación.



Elementos básicos de WiFi

- Un esquema conocido como acceso múltiple en sentido de la portadora con evitación de colisiones (CSMA/CA) rige la forma en que las estaciones comparten los canales. Con CSMA/CA, las estaciones intentan evitar las colisiones iniciando la transmisión sólo cuando se detecta que el canal está "inactivo".
- No puede evitar completamente las colisiones.
- Una colisión se produce cuando una estación recibe varias señales en un canal al mismo tiempo. Esto corrompe los datos transmitidos y puede obligar a las estaciones a retransmitir. La pérdida de datos y la retransmisión reducen el rendimiento, en algunos casos gravemente.
- Se envían mensajes entre terminales modulando y demodulando las ondas portadoras.
- Las distintas versiones de Wi-Fi utilizan técnicas diferentes, 802.11b utiliza DSSS en una sola portadora, mientras que 802.11a, Wi-Fi 4, 5 y 6 utilizan múltiples portadoras en frecuencias ligeramente diferentes dentro del canal (OFDM).
- El Wi-Fi establece conexiones a nivel de enlace, que pueden definirse utilizando las direcciones de destino y de origen. Al recibir una transmisión, el receptor utiliza la dirección de destino para determinar si la transmisión es relevante para la estación o debe ser ignorada.
- Los canales se utilizan en halfduplex y pueden ser compartidos por varias redes. Cuando la comunicación se produce en el mismo canal, cualquier información enviada por un equipo es recibida localmente por todos, incluso si esa información está destinada a un solo destino.
- El uso del mismo canal también significa que el ancho de banda de los datos se comparte, de manera que, por ejemplo, el ancho de banda de datos disponible para cada dispositivo se reduce a la mitad cuando dos estaciones están transmitiendo activamente.

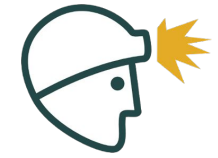


Elementos básicos de WiFi



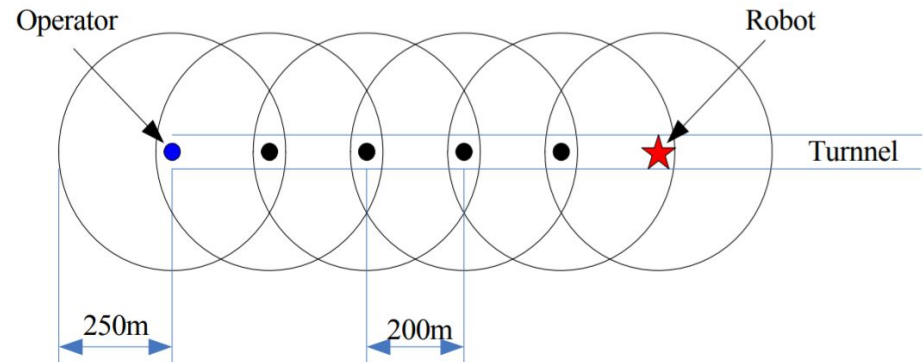
UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

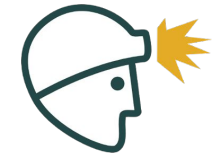
- El estándar 802.11 proporciona varios rangos de radiofrecuencia distintos para su uso en las comunicaciones Wi-Fi:
- Bandas de
 - 900 MHz, 2.4 GHz, 3.6 GHz, 4.9 GHz, 5 GHz, 5.9 GHz y 60 GHz.
- Cada rango se divide en multitud de canales.
- En las normas, los canales se numeran con una separación de 5 MHz dentro de una banda (excepto en la banda de 60 GHz, donde están separados por 2,16 GHz),
- Aunque los canales están numerados con una separación de 5 MHz, los transmisores suelen ocupar al menos 20 MHz, y las normas permiten unir canales para formar otros más amplios que permitan un mayor rendimiento.



Estrategias de comunicaciones para inspección de ductos

- AP solo en entrada al ducto.
 - La exploración puede intentar ir más allá de los cientos de metros.
- Agregar APs en los registros.
 - Se debe desarrollar una estrategia de handovers (como en las redes celulares).
 - puede tratarse de una mesh, o de una red ad hoc.
- Cadena de robots utilizando comunicaciones ad hoc.
 - Repetidores capa física, capa mac, capa de red.





Referencias

- 1 Dharma P. Agrawal, Qing-An Zeng, "Introduction to Wireless and Mobile Systems" 3rd Edition, 2010. ISBN-10:1439062056, ISBN-13:978-1439062050.
- 2 C. Zhou, T. Plass, R. Jacksha and J. A. Waynert, "RF Propagation in Mines and Tunnels: Extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels.," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 4, pp. 88-102, Aug. 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2453881.
- 3 Zhou C. Ray Tracing and Modal Methods for Modeling Radio Propagation in Tunnels With Rough Walls. IEEE Trans Antennas Propag. 2017;65(5):2624-2634. doi:10.1109/TAP.2017.2677398
- 4 Gerasimov, J.; Balal, N.; Liokumovitch, E.; Richter, Y.; Gerasimov, M.; Bamani, E.; Pinhasi, G.A.; Pinhasi, Y. Scaled Modeling and Measurement for Studying Radio Wave Propagation in Tunnels. Electronics 2021, 10, 53. <https://doi.org/10.3390/electronics10010053>.