

Premio ONO al Mejor Proyecto Fin de Carrera en Redes y Servicios de Banda Ancha

Resumen del Proyecto Fin de Carrera:

“Sistema de Comunicaciones de Banda Ancha en Entorno de Túneles”

Autor:

Ricardo Saiz Villoria

Índice

Introducción.....	3
Objetivo.....	3
Prestaciones exigibles.....	4
Líneas generales.....	4
Nivel físico.....	5
Estándares de WLAN.....	5
Sistema radiante.....	5
Conversión de frecuencia.....	6
Características del canal.....	8
Definición y despliegue.....	9
Resultados de las pruebas.....	10
Nivel de enlace.....	11
Nivel de red.....	11
Nivel de aplicación.....	12
Conclusiones.....	12
Líneas futuras.....	13
Referencias y aplicación.....	13

Introducción

En los últimos años se han popularizado entre particulares y empresas las comunicaciones móviles y de banda ancha. Cabría pensar que todos los entornos profesionales estén haciendo uso de una tecnología al menos tan avanzada, pero sin embargo en muchos casos no es así. Debido a exigencias de movilidad o máxima fiabilidad puede ocurrir que sólo se empleen sistemas analógicos, o digitales de baja velocidad, de una estabilidad y eficacia acreditadas.

Si confluyen factores como trenes, y por tanto movilidad, y túneles, donde las ondas de radio se propagan con dificultad, con requisitos de banda ancha y fiabilidad profesional, se podría pensar que el diseño y la implantación de una nueva solución fuesen procesos largos y costosos. En este proyecto se propone un sistema que adapta tecnologías modernas a las particularidades del entorno ferroviario: un estudio detallado del cable radiante instalado en los túneles demuestra que es un medio apto para la transmisión de señales de redes locales inalámbricas o WLAN. El resultado ofrece unas prestaciones que suponen un salto cualitativo respecto a los sistemas de comunicaciones existentes. Esto se consigue dentro de un plazo y coste bajos.

Objetivo

El objetivo del proyecto es diseñar un sistema de comunicaciones para trenes que circulan por una red de metro. El propósito inicial es extender a los trenes el sistema de videovigilancia, basado en vídeo digital MPEG sobre TCP/IP, que está actualmente implantado en las instalaciones fijas. Una vez instalada la red se abre todo un abanico de servicios a ofrecer: telemedida y control, envío de información para avisos a viajeros o de vídeo para entretenimiento, centralización e integración de la telefonía, etc.

Se requiere transmitir vídeo en tiempo real desde las cámaras del tren a la cabina del conductor y al puesto de mando centralizado de Metro y también, para prever posibles situaciones de riesgo, desde el andén hasta la cabina del conductor. Por lo tanto se necesita un sistema móvil de banda ancha bidireccional y además una red de alta capacidad que comunique todo el tren.

Prestaciones exigibles

- **Movilidad:** Lógicamente la transmisión deberá ser por radio puesto que los terminales son móviles (trenes).
- **Banda ancha:** Si bien ya están implantadas soluciones de banda estrecha, como la radiotelefonía analógica, el objetivo propuesto es proporcionar un acceso de banda ancha a una red digital.
- **Compatibilidad:** El protocolo de la red será compatible con la red terrestre y se integrará en ésta para una mayor versatilidad y eficiencia.
- **Reproducibilidad y modularidad:** Las tecnologías empleadas y el proceso de diseño deberán facilitar la implantación del sistema en cualquier lugar, así como la sustitución de alguno de sus elementos manteniendo la interfaz con los niveles adyacentes.

Líneas generales

De entre las diversas opciones de sistemas para comunicaciones digitales nos centraremos únicamente en los populares equipos de redes locales inalámbricas (WLAN o wireless). No son la única solución posible para este proyecto, ni tampoco la mejor técnicamente, pero por otro lado son versátiles y fácilmente integrables, su tecnología es conocida y están disponibles comercialmente por un precio competitivo.

Debido a la difícil propagación de las ondas de radio en túneles la señal es emitida desde cable radiante en lugar de antenas. Este cable está dispuesto a lo largo de los túneles aproximadamente a la altura de la catenaria. La señal original de wlan debe adecuarse a las características del cable para obtener unos alcances aceptables.

La mayor parte de la extensión de este proyecto se dedica a esos dos temas, redes wlan y cable radiante.

Nivel físico

Estándares de WLAN

El primer estándar de WLAN aprobado por el IEEE, en 1997, fue 802.11. La capa de enlace (MAC) es muy similar al 802.3 de LAN ethernet cableada. Ofrece unas velocidades de 1 y 2 Mb/s con modulaciones ensanchadas por espectro expandido. Hoy en día se considera obsoleto y superado por 802.11b, una extensión aprobada en 1.999 que emplea modulación CCK para aumentar la velocidad física a 5,5 y 11 Mbps. En todos los casos la velocidad efectiva de transferencia a nivel IP es aproximadamente la mitad de la velocidad binaria en el aire. Estos dos estándares transmiten en la banda ICM de 2.400 a 2.483,5 MHz centrados en 11 canales espaciados 5 MHz (sólo 3 no solapados). En recepción se requiere un nivel de aproximadamente -84 dBm para 11 Mbps y -90 dBm para 1 Mbps.

En 1.999 también se publicó el 802.11a, que superaría los problemas de congestión de espectro y velocidad insuficiente. Tiene 15 canales no solapados entre 5,15 y 5,825 GHz. Las tasas binarias posibles son 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps. Para evitar interferencia multitrayecto se optó por modulación OFDM de 52 portadoras.

Posteriormente vio la luz 802.11g, que puede resumirse como el traslado de la modulación de 11a a la banda de 2,4 GHz. Soporta también las tasas de 11b para compatibilidad con equipos más antiguos.

La dificultad de procesar la modulación OFDM y la reducida oferta de equipos de 802.11a y g nos llevan a decidimos por 802.11b, valorando la alternativa de 11g para futuras ampliaciones de ancho de banda.

Sistema radiante

Las técnicas convencionales de radiocomunicación mediante antenas tienen tres grandes desventajas en entornos cerrados como túneles, edificios subterráneos o garajes:

- Debido a los obstáculos y las elevadas pérdidas por absorción el alcance de la antena se reduce a una fracción del que habría en espacio libre.
- Las múltiples reflexiones se suman con desfases arbitrarios dando lugar a una cobertura muy desigual, con desvanecimientos al desplazarse.
- Las contribuciones procedentes de reflexiones poseen retardos aleatorios que originan desvanecimiento selectivo en frecuencia, y, si se trabaja con señales digitales, interferencia entre símbolos.

Para garantizar una comunicación fiable en espacios cerrados se puede recurrir a una serie de antenas distribuidas o a cable radiante. Una ventaja universalmente reconocida de éste es la mayor uniformidad de su radiación. Se recomienda en general para entornos cerrados (interior de edificios, almacenes, o túneles) y se usa masivamente en redes de metro de todo el mundo.

La alternativa de antenas requiere instalar equipos en los túneles. La instalación es costosa y difícilmente reproducible. Si funcionan como repetidores la capacidad se divide entre el número de equipos en la cadena hasta la infraestructura, y si son puntos de acceso a la red necesitan un tendido de UTP o fibra óptica. Por el contrario, el cable radiante ofrece una solución fiable y su implementación es sistemática. Mientras que la propagación de una onda TEM en túneles es difícil de caracterizar y depende de su curvatura, el alcance con cable se calcula fácilmente y con un margen de error mínimo. Si el espacio de interestación no supera esa distancia no hay que instalar nada ni realizar ninguna actuación de mantenimiento en túnel.

Las dos principales características del cable radiante son la atenuación longitudinal y las pérdidas de acoplamiento (*coupling loss*). La primera se expresa en dB por 100 m o por km y se debe a la disipación de potencia en el conductor y el dieléctrico y a la radiación. Los valores típicos están entre 1 y 5 dB por cada 100 m, aunque pueden llegar superar los 20 dB en frecuencias de GHz sobre cables delgados. El factor *coupling loss* se define como el cociente entre la potencia que viaja por la sección del cable y la recibida en una antena dipolo de media onda situada a 2 m de distancia de aquel. Su valor oscila entre 50 y 80 dB, dependiendo del modelo de cable y de la frecuencia. El acoplamiento entre cable y antena no se mantiene fijo al desplazarse sino que sigue una variable aleatoria y debe caracterizarse estadísticamente. Para dimensionar el sistema se suele tomar la pérdida de acoplamiento no superada con 95% de probabilidad.

Conversión de frecuencia

El cable radiante existente en Metro no es apto para señales superiores a 1 GHz. Incluso otros modelos que sí lo son tienen una atenuación longitudinal elevadísima en 2,4 GHz, que obligaría a reinyectar señal cada poca distancia. Siendo muy interesante la tecnología wlan y el aprovechamiento del cable radiante ya tendido, se toma la opción de desplazar las señales a una frecuencia más baja. Se ha elegido el segmento 650-750 MHz por ser compatible con las otras señales de comunicaciones con trenes (radiotelefonía de trenes, en adelante RTT, analógica en 150 MHz y digital Tetra en 390 MHz) y tener una atenuación moderada. Aunque está asignado a televisión analógica terrestre no existirán interferencias en ninguno de los sentidos porque el tren viaja siempre en túneles.

El traslado de banda lo realiza un conversor de frecuencia bidireccional. Se especifican estos requisitos:

Potencia de entrada en 2.400 (tx)	10 dBm
Potencia de salida en 700	22 dBm*
Ganancia de conversión 2.400->700	12 dB
Ganancia de conversión 700->2.400	20 dB
Oscilador local	1.536 MHz (ajustable)
Tensión de alimentación	12V dc
Consumo	400 mA

* se alcanza una mayor potencia con amplificadores modulares externos

Ya que el desarrollo de un conversor específico para 700 MHz lleva un tiempo, se realizarán unas pruebas previas aprovechando conversores comerciales que trabajan en 900 MHz. Sus características son:

General	
Banda de salida	902 - 928 MHz
Banda de entrada	2.438 - 2.464 MHz
Frecuencia del oscilador local	1.536 MHz
Estabilidad de frecuencia	+2,5 ppm
Alimentación	12V dc 2,2A por coaxial
Conversión descendente (2.400 -> 900)	
Potencia de salida (900 MHz)	4 w (36 dBm)
Potencia de entrada (2,4GHz)	10 - 50 mW (10 - 17 dBm)
Ganancia de conversión	hasta 22 dB
Conversión ascendente (900 -> 2.400)	
Figura de ruido	4 dB máximo
Máximo nivel de entrada	-20 dBm
Ganancia de conversión en recepción	12 dB

Características del canal

Hay que tener en cuenta que se trabaja con una señal de banda ancha y que el entorno de propagación no es una fuente puntual en espacio libre. La suma de múltiples fuentes (ranuras del cable) da lugar a interferencia entre símbolos (ISI) en un grado que debe calcularse.

Se parte de un modelo de radiación continua desde ranuras infinitesimales en el cable con diagrama cosenoidal. Cuanto más se aleja la antena más dispersas en el tiempo llegan las contribuciones: para 2 m de separación se obtiene una cifra de 8 ns de retardo cuadrático medio, que asciende a 15 ns para 5,5 m (la máxima separación en túnel). Según distintos estudios publicados esos valores no suponen ninguna amenaza para las señales de 802.11b, a lo sumo una degradación equivalente a 1 dB.

El comportamiento impulsivo del canal también puede expresarse en el dominio espectral como la transformada de Fourier del perfil de potencia retardo. Obtenemos un resultado de 26 MHz de ancho de banda de coherencia para el caso de 5,5 m de separación. Esto es mayor que el ancho de la modulación de 802.11b y confirma que no habrá problemas significativos debidos a multitrayecto.

La distribución de las ranuras en el blindaje del cable radiante, así como el entorno en el que éste está instalado, ocasionan que el campo inducido en la antena no sea siempre el mismo. Incluso manteniendo la distancia del cable a la antena se observan fluctuaciones a lo largo del recorrido longitudinal.

Si el receptor o el transmisor es móvil el desplazamiento traduce esa variabilidad espacial en temporal. La respuesta del canal está por tanto modulada y su espectro ensanchado. Se denomina espectro Doppler, del que el desplazamiento en frecuencia es un caso particular.

El tiempo de coherencia del canal es el inverso del ensanchamiento Doppler y es una medida del tiempo durante el cual el canal permanece estable. Si la velocidad a la que tienen lugar los desvanecimientos es mayor que la tasa de símbolo se habla de desvanecimiento rápido, y es muy perjudicial porque no se puede contrarrestar con igualación de canal.

El canal varía espacialmente con desplazamientos del orden de una longitud de onda. Conociendo ésta y la velocidad del móvil se calcula el ensanchamiento espectral como $f \cdot v/c$, siendo f la frecuencia de la portadora, v la velocidad del móvil y c la de la luz. En nuestro caso resulta en 26 ms, un tiempo mucho mayor que la duración de un paquete.

Definición y despliegue

En todas las líneas de metro existe un tendido de cable radiante que es compartido por RTT y Tetra. Actualmente se hace uso de un sencillo duplexor que divide el espectro con filtros paso bajo y paso alto. Su salida, en lugar de conectarse al cable radiante, se dirigirá ahora a un nuevo filtro combinador que suma la banda de 900 MHz.

Este combinador consta en realidad de dos grupos de filtros iguales, uno para cada ramal del cable. Debe aislar las bandas no menos de 45 dB y ofrecer una pérdida de inserción máxima de 0,5 dB. La ROE vista en cada puerto no superará 1:1,5. Además debe soportar perfectamente potencias de RF de 20w.

La antena del tren debe elegirse teniendo en cuenta dos aspectos, primero el rendimiento como elemento radiante, y segundo su robustez y facilidad de instalación. De entrada se descartan las de alta ganancia porque el cable radiante no es una fuente puntual y en general las antenas de baja ganancia se comportan mejor. En la fase de pruebas se comparan cuatro tipos: vertical con plano de tierra, colineal, perfil bajo con radomo y panel.

En Metrosur se cuenta con cable RLF114-50 de RFS. Se toman sus características de catálogo a la frecuencia más cercana, 800 MHz: pérdida longitudinal 3,34dB/100m y pérdida de acoplamiento con 95% de probabilidad 77 dB. Con 4 w (36 dBm) de salida y -84 dBm de sensibilidad para 11 Mbps, tomando una separación de 5,5 m entre antena y cable y respetando un factor de protección de 10 dB se obtiene un alcance teórico de 725 m:

$$36 - 3,34 \cdot 725/100 - 77 - 20 \cdot \log_{10}(5,5/2) - 10 = -84 \text{ dBm}$$

No se tiene la garantía de que el alcance real sea éste puesto que pueden existir obstáculos, como un tren que cruce en sentido contrario.

Resultados de las pruebas

Se realiza una primera prueba con un tendido de cable radiante en exteriores. Se examinan diferentes tipos de antenas y se realizan comunicaciones de wlan. El resultado es que se obtienen las señales más fuertes empleando una antena de baja ganancia con plano de tierra y especialmente si se orienta perpendicularmente al cable, es decir, apuntando en su dirección radial. En todos los casos se recibía una potencia superior a la calculada con el valor de acoplamiento C50. El enlace de red wlan a través del cable funciona correctamente, sin acusar problemas de desvanecimiento o multitrayecto severo, únicamente los debidos a las interferencias ambientales en banda de 900 MHz.

El siguiente paso tiene como escenario una vía de pruebas de Metro de 1 km de longitud. Los objetivos son comprobar el alcance de las comunicaciones, determinar el rendimiento de la antena instalada sobre el tren, caracterizar potenciales problemas como el desvanecimiento y observar el efecto en las comunicaciones del cambio de asociación del equipo entre las estaciones base de cada extremo del cable. La prueba dio como resultado un alcance superior al calculado, a pesar del ruido ambiental. Se eligió la antena radomizada de perfil bajo y no se observó ninguna pérdida por el hecho de que el tren obstaculizase en cierta medida la visibilidad entre el cable y la antena. Tras las medidas de RF se caracterizaron las comunicaciones en movimiento: ni los desvanecimientos de señal ni el cambio de celda (*roaming*) supusieron ninguna degradación.

La tercera fase de pruebas es la definitiva y concluyente porque tiene lugar en el mismo entorno en el que se piensa desplegar el sistema, es decir, estaciones y túneles. Las diferencias con la prueba anterior son una mejor visión entre antena y cable (salvo en andenes, donde el cable pasa por debajo), el efecto de las paredes del túnel en la propagación, velocidades de hasta 100 km/h, y posibles problemas de *roaming* por niveles de señal bajos. El resultado más importante es que se logra un alcance muy superior al esperado. A 900 m de distancia las comunicaciones son excelentes y a 1.200 m todavía se tiene una conectividad, aunque con menor capacidad. En la práctica no es necesario respetar factores de protección tan fuertes como 10 dB ni tampoco parece imprudente basarse en valores de acoplamiento de 50% de probabilidad. Incluso en andenes la potencia recibida es sólo algo menor que en el túnel pero aun así superior al caso peor previsto. Los *roamings* son casi transparentes para las comunicaciones.

Nivel de enlace

Todos los equipos en la red inalámbrica trabajan en el mismo canal radio. El esquema de acceso al medio en redes wlan es CSMA/CA con una división de tiempos muy flexible. Pueden darse colisiones, especialmente cuando hay equipos que no se oyen entre sí. Esto, unido a las condiciones de ruido y desvanecimiento inherentes a la radio, hacen necesaria la confirmación de paquetes (ACK) entre terminales.

Las redes wlan pueden ser esencialmente de dos tipos, estructuradas y ad-hoc. El segundo tipo se descarta para nuestro propósito porque consisten en la comunicación directa entre todos los equipos (por ejemplo ordenadores portátiles en una sala de reuniones).

Una red estructurada siempre tiene un punto de acceso o AP que se comunica con los clientes. El *bridging* en redes wlan es una extensión propietaria de los fabricantes que supera las restricciones originales de 802.11a/b/g, que sólo contemplan puntos de acceso y clientes, para poder interconectar dos LAN a nivel 2. En cualquier caso es necesario que en la red exista un bridge *root* al que se conecten otros *non-root*. Todos los equipos de cable radiante instalados en estaciones serán *root* y los *bridges* embarcados en trenes serán *non-root*. El equipo del tren busca la mejor señal de entre los *root* disponibles y permanece asociado a esa celda hasta que la señal se degrada y pasa a asociarse a otro equipo; ese evento se denomina *roaming*. Siempre existe un breve corte durante ese cambio pero las pruebas confirmaron que con un adecuado solape de coberturas las comunicaciones de extremo a extremo no se degradan durante más de 1 segundo. Un flujo de vídeo digital apenas muestra una breve congelación de la imagen.

Nivel de red

Se requiere que exista conectividad global entre todos los equipos (servidores, PCs, etc) de la red, tanto móvil como terrestre. Los bridges de WLAN están conectados a switches que extienden la red local a un área más extensa, de forma que aunque un tren se desplace y se asocie a otra celda inalámbrica permanece en el mismo dominio de difusión.

Los equipos embarcados tienen asignadas direcciones IP fijas dentro de una subred de clase B. La comunicación con las máquinas de esa misma subred no tiene saltos a nivel IP. Para alcanzar máquinas fuera de ella debe emplearse un router.

Nivel de aplicación

El objetivo inmediato de esta red es el transporte de video digital en tiempo real con el mismo sistema de videovigilancia empleado en estaciones de Metro. La señal analógica de vídeo es digitalizada y comprimida mediante el algoritmo MPEG; una vez en este formato puede ser grabada en soporte digital o transmitida por una red TCP/IP. Los parámetros de calidad son configurables, pudiendo ajustarse independientemente la definición de la imagen y la fluidez del movimiento. El ancho de banda consumido es función de la calidad, y oscila entre 0,5 y 5 Mbps. Típicamente se busca un compromiso en torno a 1 Mbps.

Conclusiones

El despliegue de una red WLAN basada en cable radiante en lugar de antenas ha demostrado varias ventajas. Proporciona una superior fiabilidad y disponibilidad, un canal radio más estable y en definitiva una comunicación más rápida y segura. Mediante una adecuada planificación del espectro es posible compartir las infraestructuras existentes de cable radiante con otros servicios, por lo que el coste de instalación en tierra prácticamente se reduce a sustituir los combinadores por otros que incluyan la nueva banda de trabajo.

No menos importante es evitar la existencia de sistemas activos en el interior de los túneles. Todos los equipos electrónicos se ubican en los cuartos de comunicaciones de las estaciones.

Ha quedado acreditada la validez del cable radiante para transmitir señales de comunicaciones de banda ancha, así como para proporcionar una cobertura amplia y uniforme.

También se ha comprobado la versatilidad de los equipos de WLAN, que prestan un excelente servicio incluso en condiciones no garantizadas por el fabricante.

Líneas futuras

Las siguientes etapas de trabajo se resumen en implantación de la red, gestión integral, aumento del ancho de banda y ampliación de los servicios soportados.

Tras demostrar la viabilidad del proyecto se trazará un plan de despliegue que comenzará por una línea piloto para extenderse a todas las demás en un plazo breve.

El gran número de puntos de acceso instalados imposibilita el control, configuración y monitorización individual, por lo que se deberá emplear un sistema de gestión adecuado.

Tarde o temprano surgirá la necesidad de un mayor ancho de banda. Además de introducir más canales de 802.11b sería posible utilizar bridges del estándar 802.11a y 802.11g. Aparte de que tienen un umbral de sensibilidad más alto los requisitos de amplificación lineal y estabilidad y pureza de los osciladores también son mayores.

La implementación de otros servicios como telemedida, telecontrol, multimedia o telefonía digital, ya comentados en la introducción, se demuestra factible sobre una red que ofrece alta capacidad y disponibilidad, bajo retardo y cobertura continua en túneles y estaciones.

Referencias y aplicación

Este proyecto fin de carrera comprende las pruebas piloto realizadas en tres estaciones de la línea 12 (Metrosur) de Metro Madrid.

Posteriormente se realizó el despliegue de una red similar en la línea 8. Se incorporaron mejoras tecnológicas como mayor ancho de banda o el uso de la frecuencia de 700 MHz para evitar interferencias. Actualmente en los 14 km de esta línea los trenes tienen conectividad permanente en banda ancha, pudiendo visualizarse sus cámaras de vídeo en monitores de tierra.

Este sistema de comunicaciones continuará extendiéndose gradualmente a otras líneas de Metro Madrid y soportará otras aplicaciones además de videovigilancia.