

5. D. Schwabe, 'Formal Techniques for the Specification and Verification of Protocol', Ph.D Thesis, Univ. of California Los Angeles, Apr., 1981.
6. D. Kozan, 'Results on the Prepositional mu-calculus', Theoretical Computer Science, 27: 333-354, December 1983.
7. R. Cleaveland, 'Tableau-based Model-Checking in the Propositional Mu-Calculus', Acta Informatica 27 : 725-727, 1990.
8. O. Burkart and B. Steffen, 'Model Checking the Full Modal Mu-Calculus for Infinite Sequential Processes', LFCS Report ECS-LFCS-97-355, 1997.
9. P. V. Koppol and K. C. Tai, 'Conformance Testing Protocol specification as Labeled Transition system', International Workshop Protocol Test System, IWPTS95, pp.143-158, Eery, France, 1995.



열차무선시스템 최신 연구 동향

김백현, 신덕호 | 한국철도기술연구원 | 전기신호연구본부



1. 서론

최근에는 이동체 통신이나 컴퓨터 등의 정보통신기술이 현저하게 발전을 거듭하고 있으며, 열차의 고속화 고밀도화를 도모하기 위해 열차제어 분야에 무선을 이용하는 시스템의 개발이 프랑스, 독일, 영국, 이탈리아, 일본, 미국 등의 철도선진국에서 활발히 수행되어지고 있다. 무선을 이용한 열차제어시스템의 기술개발은 철도에 커다란 경제적 이득을 창출할 가능성을 지니고 있기 때문에, 전세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히, 유럽의 경우 통화 단일화와 회원국간의 비관세 교역 등의 경제적인 제도뿐 아니라, 철도분야에 있어서도 유럽횡단고속철도망(Trans-European High Speed Rail Network)의 구축을 위한 신호시스템의 표준화를 위해 유럽연합과 국제철도연합(UIC: Union Internationale des Chemins de fer)의 지원하에 ETCS 프로젝트가 수행되었다.

ETCS는 상호운용성(interoperability)을 목표로 하여 지상-차상간의 전송방식으로 현재의 기술 한계와 미래의 가능한 기술 개발 능력을 고려하여, 기능적인 측면에

의해 Level 1, Level 2, Level 3로 분류하여 추진되고 있다. 국제철도연합은 EIRENE(European Integrated Radio Enhanced NETwork) 프로젝트를 통해 철도에 적용하기 위한 무선통신 시스템의 표준화를 위한 요구 조건을 도출하였으며, 도출된 사양에 따르는 무선 시스템 프로토콜의 상세 기술, 개발, 시험 및 유효화를 위해 MO-RANE(MOBile RAdio for railway Networks in Europe) 프로젝트를 수행하였다. 그 결과, ETCS Level 2에서의 정보 전송 및 ETCS Level 3에서의 열차 감지 및 정보 전송에 적용하기 위한 무선통신 시스템으로서 GSM-R(Global System for Mobile communication - for Railways)을 채택하였다.

GSM-R은 유럽의 이동통신표준인 GSM을 기초로 하여 철도분야에서의 사용을 목적으로 별도의 주파수 대역(876~880/921~925 MHz)을 할당하고 그룹통화(VGCS: Voice Group Call Service), 방송통화(VBS: Voice Broadcast Service) 및 우선순위(eMLPP: enhanced MultiLevel Precedence and Preemption) 등의 기능을 추가한 무선통신 시스템으로 다음과 같은 이유로 GSM-R

특집

이 유럽의 철도 무선통신 시스템으로 선정되었다.

- ▶ ISDN을 통한 다양한 서비스들을 제공
- ▶ 유럽 철도의 기존 망들간의 상호 연동
- ▶ 통신 시스템 자원의 효율적인 활용
(무선 주파수, 케이בל)
- ▶ 설치 비용 감소
(기존 유럽 GSM 공급자들에게 부가적인 시장 형성)
- ▶ 유지 비용 절약
(단일 시스템을 통한 서비스 관리 및 계획)
- ▶ 공개된 표준안을 통한 기술 향상 용이성

2. GSM-R

ETCS 기반의 열차제어시스템에서는 GSM-R 인터페이스를 통해 ETCS 지상-차상 사이에 데이터의 송수신이 이루어진다. ETCS Level 2/3에서 차상의 열차제어 장치는 위치, 속도 및 차량 번호 등의 자동열차제어에 관련된 정보들을 RBC(Radio Block Center)에 전달하며, RBC는 해당 지역의 모든 열차들에 대한 정보들을 분석하여 각각의 열차들에게 적합한 속도 프로파일을 전송한다. GSM-R의 구조를 살펴보면 다음 그림 1과 같다. 기지국(BTS : Base Transceiver Station)은 이동국(MS: Mobile Station)인 열차와의 무선 접속 기능을 수행하며, 기지국 제어기(BSC : Base Station Controller)는 기지국의 관리 및 제어 기능을 수행한다. 이동통신 교환기(MSC: Mobile Switching Center)는 회선교환, 입출중계 처리, 핸드오프, 로밍 등의 기능을 수행하며, 홈 위치 등록기(HLR:

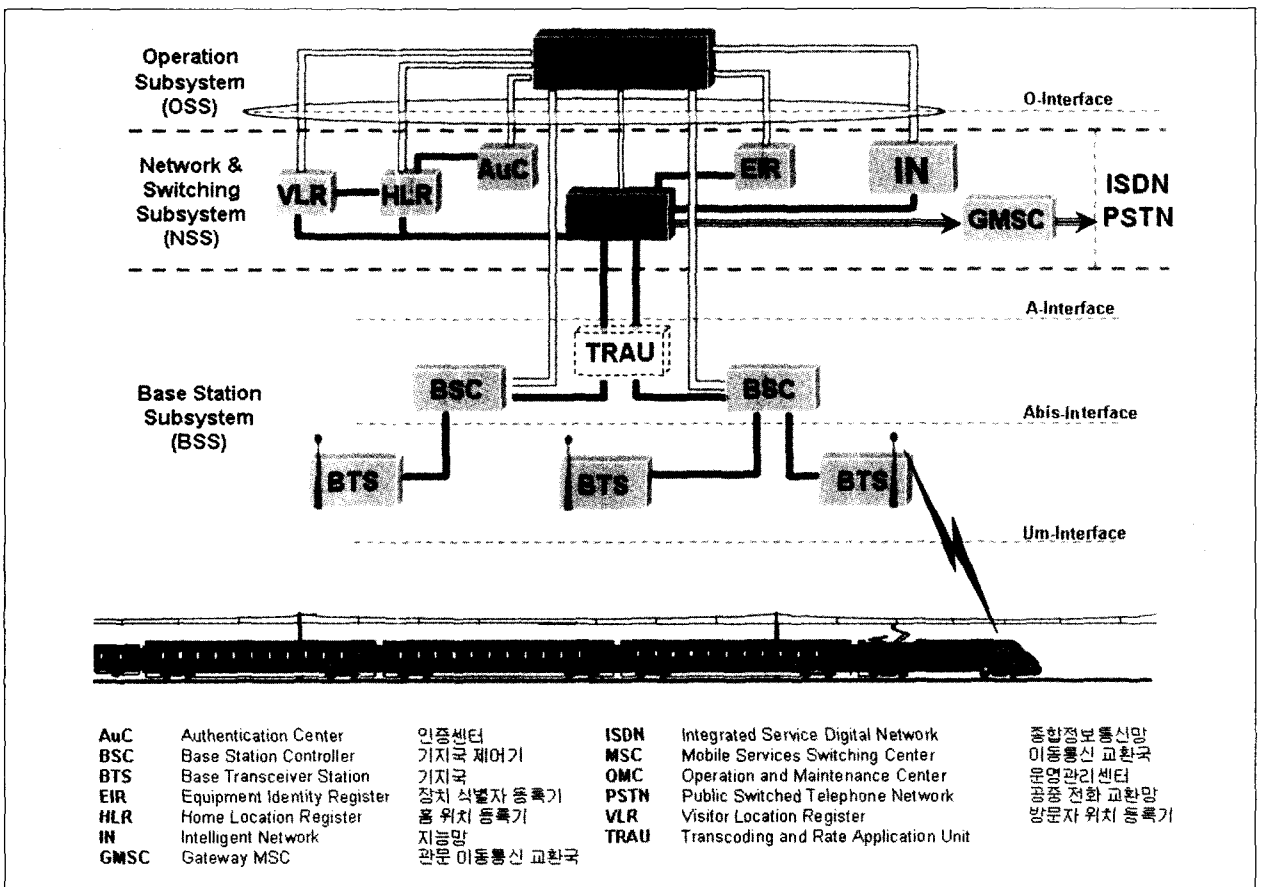


그림 1. GSM-R의 구조

Home Location Resistor)는 이동국이 위치하고 있는 기지국 정보를 비롯한 상태, 통계 및 각종 서비스 관련정보를 관리하는 데이터베이스이다. 그리고, 방문자 위치 등록기(VLR: Visitor Location Resistor)는 이동통신 교환기 지역 안에 있는 모든 이동단말기의 정보를 일시적으로 저장하고 관리하는 데이터베이스이며, 운영관리국(OMC: Operations Maintenance Center)는 운용 및 유지보수를 담당한다. 이외에도 통신 서비스의 허가를 인증하는 인증센터(AuC: Authentication Center), 이동국 장치의 식별자와 관련된 정보를 기록하고 있는 장치식별자 등록기(EIR: Equipment Identity Register)와 지능망(IN: Intelligent Network) 서비스를 제공하기 위한 장비들로 구성된다.

2.1 GSM-R의 기능

GSM 서비스 및 관련된 무선통신 신호 프로토콜의 정의는 GSM 및 GSM-R을 담당하고 있는 ETSI의 GSM 기술 위원회에 의해 작성된 사양서에 표준화되어 있으며, 그 밖의 철도분야에 적용되는 특수한 기능에 대해서는 EIRENE

표 1. ERTMS Class1을 위한 ETSI GSM phase 1/2/2+의 기능

요구되는 기능	- Transparent 데이터 베어러 서비스 - eMLPP(enhanced Multi-Level Precedence and Pre-emption)
Class1 에서는 요구되지 않는 기능	- GSM 부가 서비스 • 착신호 전환(Call forwarding) • GPRS(General Packet Radio Service)
요구되지 않는 기능	- RLP(Radio Link Protocol)를 이용한 Non-transparent • 데이터 베어러 서비스 - GSM 부가 서비스 • 회선 식별(Line identification) • 착신호 통보 및 보류(Call waiting and hold) • 집단통화(Multiparty) • 폐쇄 사용자 그룹(Closed user group) • 과금 통지(Advice of charge) • 착신호 차단(Call barring) - 단문 메시지(중단간 및 셀 방송 서비스) - 음성 방송 서비스(Voice Broadcast Service) - 음성 그룹호 서비스(Voice Group Call Service)

의 시스템 요구 사양서(SRS: System Requirement Specification)에 명시되어 있다. 그러나, 다음 표 1에 나타낸 바와 같이 GSM 표준 및 EIRENE의 시스템 요구 사양서의 모든 기능들이 ERTMS Class1 시스템의 기능 정의에 반영되는 것은 아니다.

표 2. ERTMS Class1을 위한 EIRENE에 의해 정의된 철도분야 기능

요구되는 기능	- 위치 기반 주소지정 (Location dependent address)
Class1 에서는 요구되지 않는 기능	- 기능적 주소지정 (Functional address)
요구되지 않는 기능	- 긴급 호출(Emergency calls) - 입환 모드(Shunting mode) - 복수 기관사간 통신 (Multiple driver communications)

2.2 GSM-R의 무선링크 파라미터

GSM-R의 무선링크 파라미터들은 EIRENE의 시스템 요구 사양서와 기능 요구 사양서에 정의되어 있다. 이들 사양서의 요구사항들은 MORANE 프로젝트를 통해 실험 및 검증이 되었고 추가적인 파라미터들은 하위 시스템 요구 사양서에 정의되었다.

표 3. GSM-R의 시스템 요구 사양서

항목	요 구 사 항		
통화영역	최소 요구 사항	음성 및 비안정성 데이터	통화영역 확률 : 95% 통화영역 레벨 : 38.5 dBmV/m (-98 dBm)
		ETCS 2/3 레벨, 220km/h 이하	통화영역 확률 : 95% 통화영역 레벨 : 41.5 dBmV/m (-95 dBm)
	권장 요구 사항	ETCS 2/3 레벨, 280km/h 이상	통화영역 확률 : 95% 통화영역 레벨 : 44.5 dBmV/m (-92 dBm)
		ETCS 2/3 레벨, 220km/h ~ 280km/h	통화영역 확률 : 95% 통화영역 레벨 : 41.5 dBmV/m ~ 44.5dBmV/m (-95 dBm ~ -92 dBm)
핸드오프	최소 핸드오프 성공률	99.5%	
	최소 핸드오프 시간	300 ms	
호 설정	외부에서 GSM-R로 호설정시 최소 시간	250 ms	
	빠른 호 설정시 최대 전송 비트수	12 digits	

표 4. GSM-R의 기능 요구 사항서

항목	요구 사항	
망의 요구사항	일반적인 데이터 서비스의 최소 전송 속도	2.4 kbps
다른 망으로 이동시 요구사항	최소 호 차단율	0.5%
호 설정 시간 요구사항	긴급 열차 호	2 sec
	같은 지역에서의 그룹 호	5 sec
	이동체에서 고정시스템으로의 호	5 sec
	고정시스템에서 이동시스템으로의 호	7 sec
	모든 이동체와 이동체간의 호	10 sec
	모든 최소 우선순위 호	10 sec
	호 설정 시간의 요구 성공확률	95%
호 설정시간의 99%는 요구 호 설정 시간의 1.5배 보다 짧아야 함		

표 5. MORANE, ETCS 요구 시스템 파라미터 비교

QoS 파라미터	EIRENE/MORANE	ETCS
TCH/F24	10-5	10-4
최대 단대단 지연	정의되지 않음	0.5 s(95%), 1.2 s(99%), 2.4s(99.99%)
평균 단대단 지연	222~340 ms	400~500 ms
호 차단율	정의되지 않음	10-3
데이터 속도	최소 2.4 kbps	최소 2.4 kbps
모든 이동체에서 고정 시스템으로의 호	5 sec (95%)	5 sec (95%)
가용율	정의되지 않음	99.95%
최대 핸드오프 시간	300 ms	300 ms
연결 실패 지시 시간	정의되지 않음	1 sec

2.3 GSM-R의 진화방향

사용자들이 요구하는 통신 서비스가 음성위주의 서비스에서 멀티미디어 서비스로 변화함에 따라, 현재 유럽의 이동통신 시스템으로 보편화된 GSM은 더욱 큰 대역폭과 더욱 빠른 전송 능력을 가진 시스템으로 변화가 필요하게 되었고, 이에 따라 3세대 이동통신, 즉, IMT-2000 시스템으로의 발전이 진행중이다. 현재 유럽 대부분의 국가들은 3세대 이동통신을 위한 중간 단계로 GSM의 향상된 시스템인 GPRS(General Packet Radio Service)를 표준화하여 서비스중이며, 최종 3세대 통신 시스템으로는 광대역 CDMA 방식인 UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)을 준비중이다.

2.3.1 GPRS

GSM-R은 UIC 주파수 대역으로 4MHz(회선교환 모드로 사용되는 20개의 TDMA채널)을 할당받아서 사용하고 있다. 수치상으로 알 수 있듯이 GSM-R은 20개의 채널로 한정되어 있기 때문에 주파수를 효율적으로 사용해야 한다. GPRS는 패킷 모드로 데이터를 전송하기 때문에 기존의 GSM의 주파수를 데이터 전송에 있어서 효율적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. GPRS에서는 최대 8명의 사용자가 하나의 패킷 데이터 트래픽 채널(PDTCH : Packet Data Traffic Channel)을 동시에 사용할 수 있다. 이는 저속의 버스트(burst)한 데이터 전송을 요구하는 철도 통신에 보다 적합할 수 있다. 그리고 향후 멀티 캐스팅을 지원함에 따라 그룹 호를 지원하는데 좀더 유리한 점을 가지고 있으며 실시간 서비스를 제외한 철도관련 데이터 전송 서비스(화일 전송, 전자우편시스템, 이동철도 인트라넷, 예약 등과 같은 고객 편의 서비스)를 효과적으로 지원할 수 있다. 반면에 ATP 장치와 RBC간에 HDLC 프로토콜을 사용할 수 없기 때문에 Safety-Critical한 데이터 전송을 보장할 수 없으며, 낮은 트래픽 부하와 높은 C/I (반송파 대 잡음비)에서조차도 ETCS의 최소 전송 지연시간인 450 ms를 보장할 수 없는 단점이 있다. 또한 데이터를 외부로부터 안전하게 보호하기 위해 보안 프로토콜을 추가해야 한다. 이와 같은 신뢰성 문제로 인해 열차 제어 시스템에 GPRS 시스템을 바로 적용하는 것은 문제가 있지만, 효율적인 주파수 사용과 멀티캐스팅 지원의 장점 때문에 ERTMS와 GPRS 통신 사업자들 간에 긴밀한 협력을 유지하고 있는 중이다.

2.3.2 UMTS

유럽 대부분의 국가들은 3세대 통신 시스템으로 UMTS를 채택하였다. 이것은 GPRS 및 GSM과는 완전히 다른 무선 인터페이스를 사용하는 시스템이다. 하지만 2003년 현재까지 UMTS 시스템을 완벽하게 설치하고 운영하는 국가가 없다. 그러므로 아직까지 GSM-R 시스템을 UMTS로 시스템을 변경하려는 단체나 국가는 없는 상태이다. 또한 UMTS가 보급되고 철도에 적용하기 위해서는

적어도 2~3년의 실제 운용데이터가 필요하기 때문에 철도에 적용까지는 아직 긴 시간이 필요하다. UMTS는 실시간으로 고속 데이터 전송을 보장하기 때문에 GSM과 GPRS에 비해 높은 전송율을 제공할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 철도 분야에 적용한다면 승객 서비스 측면에서 보다 향상된 서비스를 제공할 것으로 예상된다.

3. 유럽의 열차무선 성능 개선 연구

현재 무선 및 이동통신에 관한 연구의 대부분은 무선채널에 의한 성능 저하 및 시스템 용량 감소를 극복하기 위한 기술 개발에 초점이 맞추어져 있다. 특히, 무선채널 환경에서 페이딩 등에 의한 성능 저하를 극복하기 위하여 수신단 또는 송신단에 다이버시티 기법을 적용하는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다. 특히 ESCORT (Enhanced diversity and Space Coding for underground metro and Railway Transmission) 프로젝트는 다중 안테나 기술을 열차 전송 시스템에 적용하기 위한 대표적인 프로젝트이다. ESCORT 프로젝트는 GSM-R 시스템을 열차 제어에 적용할 경우 무선채널 환경이 열악한 지역 특히, 터널 및 지하철 환경에서 신호 품질 향상 및 높은 데이터 전송률을 얻을 수 있는 다이버시티 기법에 대한 연구 수행을 목적으로 하고 있다. 현재 ESCORT 프로젝트에서는 송·수신단에 다수의 안테나를 사용하는 방법에 대한 연구를 진행 중에 있으며, 최근의 연구 결과에 따르면 단일 안테나를 사용한 경우에 비하여 송·수신단에 각각 4개의 안테나를 사용한 경우 전송 용량을 기존의 단일 안테나를 사용한 경우에 비해 약 2.7배(3 bps/Hz에서 8 bps/Hz)로 성능을 개선시킬 수 있음을 보여주고 있다. MOSTRAIN (MOBILE communications Services for high speed TRAINS) 연구과제는 3세대 이동통신 시스템에서 특히 고속 운행중인 열차에서 가입자들이 요구하는 이동서비스를 효율적으로 제공하기 위한 연구과제로 고속 운행중인 열차와 기지국간의 무선채널 환경에 대한 측정 및 모델링을 수행하였다.

또한, TSUNAMI (Technology in Smart Antennas for UNiversal Advanced Mobile Infrastructure) 연구 과제는 적응형 안테나 (adaptive antenna)의 기술 개발을 연구 목표로 하고 있다. 현재의 셀룰러 시스템들은 각 기지국에서 해당 셀 내에서 전파를 방사한다. 그러나 대부분의 통신은 점-대-점으로 이루어지므로 이러한 방식은 효과적이지 못하다. 모든 방향으로 전파되는 신호 중 원하는 방향을 제외한 나머지 신호는 오히려 다른 사용자들에게 간섭으로 작용하기 때문에 시스템 용량을 저하시키는 요인이 된다. 용량을 증대시키기 위해서는 셀의 크기를 작게 하면서 기지국을 많이 증설하는 방법이 있으나, 이 경우 비용이 증대하게 되고 빈번히 발생하는 핸드오프를 처리하는 데 문제가 발생한다. 공간 분할 다중화 (Space Division Multiple Access: SDMA) 방식을 사용할 경우 기지국을 증설하지 않고 용량을 증대시킬 수 있다. TSUNAMI는 이와 관련하여 UMTS와 같은 3세대 시스템에 적용할 수 있는 저가격 적응형 안테나를 개발하는 과제로 테스트 베드를 구축하여 필드시험을 거쳐 개발될 계획이다.

4. 결론

현재 유럽 여러 국가들은 GSM-R 시스템을 구현하는 단계에 있다.

그러므로 아직까지는 GSM의 개량된 방식인 GPRS, 그리고 새로운 방식인 UMTS를 열차 통신에 적용하려는 단계는 아직 없다. GSM 시스템은 상용화된 지 약 9년이 되었고 그동안 경험을 통해 장비 및 망의 성능이 검증된 상태이기 때문에 열차제어를 위한 추가 기능에 대한 적용을 검토할 수 있었다. 따라서 GPRS나 UMTS 시스템이 실제 각 지역에 설치되어 운용하게 될 때 생기는 문제점들과 그 문제점에 대한 확실한 보완책을 통신 사업자들이 제시할 수 있는 시점에서야 GSM-R은 차기 시스템으로 발전할 수 있을 것으로 보인다.

이미 GSM-R 시스템을 구축하여 철도에서 사용하고 있고 열차 제어나 운용측면이 아닌 승객 서비스 차원에서 향상

된 서비스를 제공하고자 한다면 GPRS나 UMTS으로 발전할 수 있다. 이 경우 GSM-R 망에서 GPRS 또는 UMTS망으로 외부 접속만을 허용하던 기존의 GSM-R 인프라를 유지하면서 무선망을 추가할 수 있다. ERTMS에서 열차 운용 측면에서 고속 데이터 전송을 필요로 하는 응용분야(일례로 철로변 영상 전송을 통한 복구 작업 관제 시스템)를 인지하고 이것을 표준화한다면 UMTS시스템은 반드시 필요한 시스템이 될 것이다. 열차 제어 측면에서 데이터 전송 속도와 지연요구사항을 고려하면 GPRS를 제외한 GSM-R, UMTS는 충분히 만족할 만한 성능을 지니고 있다. 추후 승객 서비스 또는 열차 운용 서비스망이 고속데이터서비스를 요구하기 때문에 UMTS망으로 발전해야 할 경우 열차 제어 서비스를 위해 사용하는 GSM-R은 모든 서비스를 통합망으로 운용하기 위해서 UMTS로 발전할 것으로 예상된다.

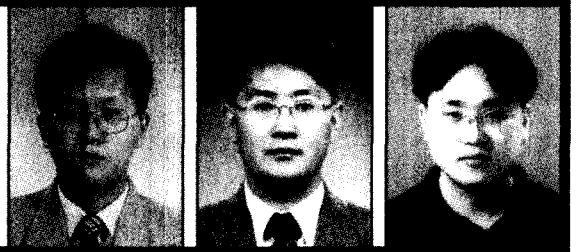
참고 문헌

1. Bernhard H. Walke, Mobile Radio Networks—Networking and Protocols, John Wiley & Sons Ltd., 1999.
2. EIRENE FRS version 6.0, Nov. 2003.
3. EIRENE SRS version 14, Nov. 2003.
4. <http://www.ceit.es/escort>
5. <http://www.cordis.lu/infowin/acts/rus/projects/ac104.htm>
6. IST 1999–20006 D6021 ESCORT Final Report.
7. Farrokh Abrishamkar, James Irvine, "Comparison of Current Solutions for the Provision of Voice Services to Passengers on High Speed Trains," IEEE VTS–Fall VTC 2000, 52nd, Volume: 4, pp. 24–28, Sept. 2000.



무선통신을 이용한 열차제어시스템

윤용기, 김용규, 신덕호
한국철도기술연구원 전기신호연구본부 | 열차제어연구그룹



1. 서론

1830년 영국의 리버풀 맨체스터철도(영국)의 개통으로 시작된 철도는 선로분기점의 파수꾼 배치, 열차신호표기를 위한 전주 사용, 모스전신기를 사용한 “공간간격법”, 1872년 펜실바니아철도(미국)에 최초로 도입된 궤도회로, 연동기 및 CTC 등의 도입으로 철도안전과 효율적인 수송에 크게 공헌하였고, 현재까지 매우 안전하고 정확한 교통수단의 위치를 확보하고 있다. 현재는 무선을 이용한 정보통신기술을 활용하여 새로운 철도를 개발하기 위한 사업

을 국내·외에서 추진하고 있어 철도의 경쟁력이 더한층 강화될 것으로 예상된다.

무선통신기술을 철도에 적용하는 것은 간선철도 및 도시철도가 현재 갖고 있는 열차의 속도향상 및 운행시격단축 등의 문제점을 해결하기 위한 것으로 판단된다. 궤도회로를 이용한 열차제어의 경우 열차속도향상과 함께 운행시격을 단축하기 위해서는 폐색구간(길이)을 줄이면 가능하지만 이는 지상신호설비증가에 따른 신뢰성 저하 및 유지보수비용 증가 등의 문제점을 갖고 있어 적절한 방법은 아니다.