

열차제어를 위한 무선통신 시스템의 생존성 검토

An Investigation on Survivability of Wireless Communication System for Train Control

김백현* 김종기** 이영훈* 신덕호*** 백종현***
Kim, Baek-Hyun Kim, Jong-Ki Lee, Yung-Hoon Shin, Duk-Ho Baek, Jong-Hyun

요 약

최근의 무선통신 시스템은 유지, 보수 및 구축이 유선통신 시스템에 비해 용이하고 이동성을 제공할 수 있다는 장점에 의해, 열차, 차량, 미사일 등의 이동체 제어와 관련된 분야에서의 연구가 활발히 진행되고 있다.

열차 또는 차량 제어와 같이 안전성이 중요시되는 분야에 있어서 전파에 의한 무선 링크는 가장 문제가 되는 부분으로서, 일반적으로 통신시스템은 어느 한 경로에서 고장이 발생하더라도 설계시 정해진 일정수준의 기능을 제공하는 생존성(survivability)을 지니도록 설계되어진다. 이와 관련한 연구와 개발은 대부분 공중 전화망과 고속 데이터 통신망을 대상으로 수행되었다.

본 논문에서는 유럽의 차세대 열차제어시스템에 적용하기 위해 기존의 유럽 표준 이동통신 시스템인 GSM(Global System for Mobile Communications)을 철도분야의 특수성에 맞도록 보완한 GSM-R(GSM-Railway)을 사례로 무선통신 시스템의 생존성을 검토한다.

1. 서론

무선 통신 시스템은 최근 급격한 발전을 이루어, 최근에는 주로 유선망에서 제공되어지던 서비스를 이동중인 사용자에게도 제공하기에 이르렀다. 일반적으로 현재의 이동 통신 시스템은 유선 통신 시스템에 비해 낮은 품질 및 제한된 서비스를 제공함에도 불구하고, 이동성 제공에 따른 유연성의 장점으로 인해 많은 가입자를 유치하고 있다. 그러나, 안전을 최우선으로 하는 열차제어 시스템에서의 무선 통신 시스템은 유선 통신 시스템에 근접한 신뢰성이 요구되어진다. 즉, 통신 절단 및 중요 데이터의 누설과 같은 고장이 허용되지 않는다.

생존성(survivability)은 고장이 발생하더라도 설계시 정해진 일정수준의 성능 제공이 가능함을 의미한다. 생존성 해석은 고장이 발생된 상황에 있어서 시스템내에 잔재하는 기능성을 측정하는 것으로서, 정상적인 동작 환경뿐만 아니라 고장이 발생한 상황에서의 망 성능 척도를 평가한다. 고장이 발생한 망 구성 성분 및 고장이 발생한 위치에 따라 다양한 시나리오가 정의될 수 있다. 예를 들어 셀룰라 또는 개인이동통신시스템(PCS: Personal Communication System)의 경우, 기지국(BS: base station) 및 이동교환국(MSC: mobile switching center)에서 고장이 발생하여 기지국과 이동교환국간의 링크가 손실될 수 있다. 일반적으로 생존성 해석에 의해 얻어진 결과는 결함-허용(fault-tolerance) 기능을 제공하는 망 설계 및 프로토콜 개발에 활용된다.

생존성을 지니는 망의 설계란 고장에 따른 영향을 완화시킬 수 있는 전략의 구체화를 의미하며, 무선통신 망의 생존성을 향상시키기 위한 전략은 예방, 망 설계 및 용량 할당, 트래픽 관리 및 복구로

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

분류할 수 있다. 예방 기술은 시스템 및 구성 요소의 신뢰성 향상에 초점을 두고 있으며, 결합-허용 구조의 망 교환기 및 백업 전원의 사용 등이 이에 해당한다. 망 설계 및 용량 할당 기술은 망의 토폴로지(topology)를 구성함에 있어서 적절한 다이버시티(diversity)와 용량(capacity)을 활용하여 링크 손실 등과 같은 시스템 레벨의 고장을 완화시키는 방안이다. 트래픽 관리 및 복구 절차는 고장의 발생에 따른 영향을 최소화하도록 망 부하를 조절하며, 고장에 따른 연결을 복구하는 동안 망을 안정된 상태로 유지하는 것으로서, 고장 발생후 남아있는 여분의 용량을 활용하는 능동 결합 복구 라우팅 알고리즘(dynamic fault recovery routing algorithm)을 예로 들 수 있다.

통신 시스템의 생존성과 관련하여 이상적인 목표는 연속적인 서비스의 유지 및 망 혼잡의 최소화에 의해 망 고장을 사용자측에서 인지하지 못하도록 하는 것이다. 생존성과 관련된 기술은 누설(outage) 발생이 일반적으로 알려져 있는 회선교환 방식의 유선통신망과 고정 인프라를 없이 열악한 지형에서의 통신을 지원하는 군사용 ad-hoc 망에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 이동통신망의 경우 지속적인 변화를 가지는 환경에서 고정 인프라를 통해 이동하는 사용자에게 서비스를 제공하게 되므로, 유선통신 및 ad-hoc과 관련된 생존성 기술을 그대로 적용하는 것은 적합하지 않다.

2. 무선통신 시스템의 구조

무선통신 시스템의 생존성 검토를 위하여 ETCS(European Train Control System)에서 통신 기능을 담당하는 GSM-R(Global System for Mobile communication-Railway)의 구조를 살펴보면 다음 [그림 1]과 같다. 기지국(BTS : Base Transceiver Station)은 이동국(MS: Mobile Station)인 열차와의 무선 접속 기능을 수행하며, 기지국제어기(BSC : Base Station Controller)는 기지국의 관리 및 제어 기능을 수행한다. 이동통신교환기(MSC: Mobile Switching Center)는 회선교환, 입출중계 처리, 핸드오프, 로밍 등의 기능을 수행하며, 홈 위치등록기(HLR: Home Location Register)는 이동국이 위치하고 있는 기지국 정보를 비롯한 상태, 통계 및 각종 서비스 관련정보를 관리하는 데이터베이스이다. 그리고, 방문자 위치등록기(VLR: Visitor Location Register)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.

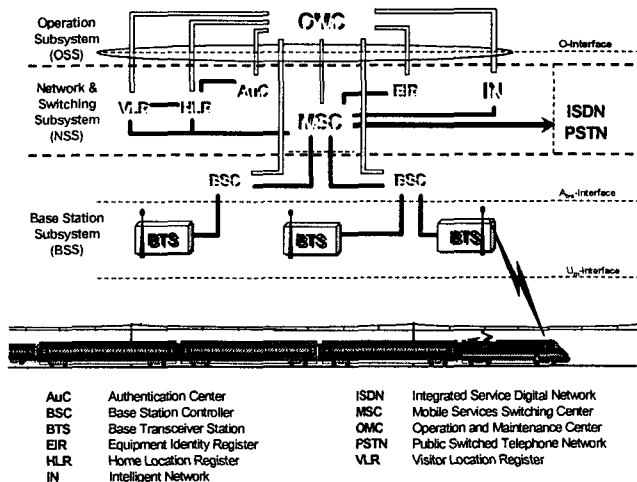


그림 1. GSM-R 시스템의 구조

앞서 살펴본 무선통신 시스템의 구조는 생존성과 관련하여 다음 표 1과 같이, 4개의 계층(무선레벨 접속계층, 링크레벨 접속계층, 전송계층, 지능계층)으로 분류하여 고려할 수 있다. 무선레벨 접속계층(radio level-access layer)은 셀내에서의 무선통신을 위한 물리-인터페이스로서, 이동국(MS)로부터 기지국(BTS)까지의 연결링크를 의미하며, 상향 및 하향 채널의 변조 및 다중접속에 사용되는 기법들을 포함한다. 링크레벨 접속계층(link level-access layer)는 다수의 기지국(BTS)과 기지국제어기(BSC)의 통신을 위한 물리-인터페이스로서, 기지국제어기(BSC) 레벨에서의 유선연결에 대한 서비스 및 관리와 무선 채널 관리가 이에 해당된다. 전송계층(transport layer)은 구성요소간의 중단간 레벨에 대한 인터페이스가 이에 해당하며, 프로토콜 변환, 교환 및 전송의 기능을 가진다. 지능계층(intelligent layer)에서는 위치추적, 핸드오프, 호전달 등과 같은 제어 기능이 수행된다. 위의 4가지 계층의 결합에 의해서 단말장치, 사용자, 서비스의 망 이동성(network mobility)을 제공한다.

표 1. 무선통신 시스템의 생존성에 따른 계층 구분

계층	구성 요소	통신 링크	기능
무선레벨 접속계층	MS, BTS	FDMA, TDMA, CDMA 등의 디지털 무선 채널	무선 통신을 위한 물리-인터페이스의 정의
링크레벨 접속계층	BTS, BSC	유선링크 또는 지상파(terrestrial microwave)-T1	BS 클러스터 관리, 무선채널관리
전송계층	BTS, BSC, MSC, 신호망	유선링크 또는 지상파(terrestrial microwave)-SS7	호/연결 관리, 이동성 관리
지능계층	MSC, HLR, VLR, EIR, AuC, 신호망	유선링크 또는 지상파(terrestrial microwave)-SS7	서비스 관리, 이동성 관리

이와 같은 무선통신 시스템 구조에 있어서, 셀의 생존성과 셀과 고정 유선 인프라망을 연결하는 고정망의 생존성이 본 논문에서 검토하고자 하는 주요 대상이다. 여기에는 HLR, VLR, AuC, EIR 데이터 베이스의 무결성 및 SS7 신호망에 대한 요구와 사용자의 이동에 따른 고정 유선 인프라망에 대한 생존성의 영향 등이 이에 해당한다.

3. 무선통신 시스템의 생존성

3.1 생존성 척도

망의 무결성을 기술하기 위한 생존성 분석을 위해 생존성 척도가 사용되며, 앞서 구분한 계층에 따라 각각 정의될 수 있다. 무선 및 유선에 의해 구분된 접속계층을 하나의 접속계층으로 통합하여 다음의 표 2에 각 계층에서의 결합 조건 및 결합에 따른 영향과 생존성 척도에 대한 예를 나타내었다.

접속계층에 있어서, 기지국(BTS)의 손실이 가장 일반적인 고장이라 할 수 있으며, 이와 관련된 생존성 척도는 채널자원의 부족으로 통화요청이 거부될 확률인 호 차단 확률(call blocking probability)과 핸드오프 및 채널 열화 등에 의해 통화 도중에 연결이 끊기게 될 강제 호 차단 확률(forced call termination probability)을 들 수 있다. 전송계층에 있어서, 일반적인 고장은 기지국제어기(BSC)와 이동통신교환기(MSC)간의 링크 손실이며, 클러스터내의 서비스 손실이 발생한다. 전송계층의 생존성 척도는 앞서 접속계층과 마찬가지로 호 차단 확률과 강제 호 종료 확률을 들 수 있으며, 이와 더불어 영향을 받은 다수의 사용자가 재연결을 시도하므로 호 설정 지연(call setup delay), 호 해제 지연(call release delay), 호출/위치갱신/등록 지연(paging/location update/registration delay) 등의 척도가 포함된다. 마지막으로 지능계층에 있어서 고장은 방문자 위치등록기(VLR)의 손실이 일반적이며, 이와 같은 경우 부분 또는 전체적인 로밍 서비스의 손실이 발생한다. 지능계층의 생존성 척도는 사용자 부하 손실 및 홈 위치등록기(HLR)에서의 정보 정확도이다. 이와 같은 생존성 척도들은 간략화된 시스템

모델에 대해 대기체제이론(queueing theory)을 적용하여 수학적으로 해석이 이루어지나, 복잡한 모델은 수학적 해석이 거의 불가능하며 일반적으로 시뮬레이션을 통해 해석이 이루어진다.

표 2. 전형적인 고장 시나리오와 각 계층에서의 생존성 척도

계층	고장 시나리오	잠재적 영향	척도
접속계층	BTS의 손실	- 셀내에서의 부분 또는 전체적인 서비스 손실 - 고장이 발생한 셀의 이웃셀에서의 트래픽 증가	- 호 차단 확률 - 강제 호 종료 확률
전송계층	BSC와 MSC간 링크의 손실	- 클러스터내에서의 부분 또는 전체적인 서비스 손실 - 고장 장비 주변의 이웃셀들에서의 트래픽 증가	- 호 차단 확률 - 강제 호 종료 확률 - 호 설정 및 해제 지연 - 호출, 위치갱신, 등록 지연
지능계층	VLR의 손실	- MSC 범위내에서의 로밍 서비스 불가	- 사용자 부하(얼랑; Erlang) 손실 - DB 접속 지연 - 정보 정확도

3.2 생존성 전략

무선통신 시스템에 있어서 단말장치의 이동성을 보장하는 동시에 시스템의 생존성 확보를 위해 적용되는 전략을 각 계층별로 살펴보면 다음 표 3과 같다.

표 3. 일반적인 생존성 전략

계층	여분 및 견고성	트래픽 복구
무선레벨 접속계층	- 예비 RF 요소 - 중첩 및 확장이 가능한 셀 구조	- 부하 분할 프로토콜 - 능동 채널 할당 - 적응형 채널 프로토콜
링크레벨 접속계층	- 예비 BS-BSC 링크 - BS-BSC의 링 구조 연결	- 자동 보호 교환기 - 능동 재경로 설정 프로토콜 - 자가 복구 링
전송계층	- 예비 BSC-MSC 링크 - BSC-MSC의 링 구조 연결	- 자동 보호 교환기 - 능동 재경로 설정 프로토콜 - 자가 복구 링
지능계층	- 신호망 연결의 다중계화 - DB의 다중계화	- 능동 경로 설정 프로토콜 - 체크포인트 프로토콜

무선레벨 접속계층에 있어서 억제되어야 할 주요 고장은 이동국과의 무선 링크의 고장이다. 규정된 주파수 대역이 제한되어 있으므로 고장에 대비하여 예비의 무선 채널을 할당하는 것은 정상적인 상황에서 있어서 사용가능한 무선 채널의 용량을 감소시킨다. 무선레벨 접속계층과 관련하여 가능한 생존성 전략으로는 주파수 재사용, 능동 채널 할당 알고리즘 및 적응형 전력제어를 적용하여 중첩된 셀 구조를 구성하여 이동국이 다수의 기지국과 연결하도록 하는 방법이 있다. 즉, long-haul 채널과 short-haul 채널을 중첩하여 사용하여, 이동국이 2곳의 기지국과 long-haul 채널을 사용하여 접속하거나, 동일 기지국의 long-haul 채널과 short-haul 채널을 사용하여 최소한 2 채널 그룹을 사용할 수 있도록 하는 것이다.

링크레벨 접속계층과 전송계층에 있어서 주로 고려해야 할 대상은 유선망의 소자 및 링크의 고장이다. 이와 같은 고장을 극복하기 위해, 기존 유선망에서 적용되던 생존성 전략인 그룹형 구조

(mesh-type architecture), 자동 보호 교환(automatic protection switching), 자기 복구 링(self-healing ring) 등과 같은 기법을 사용자의 이동성과 같은 무선통신 시스템의 고유의 특성을 수용할 수 있도록 수정하여 적용할 수 있다. 예를 들어, 링크레벨 접속계층에 있어서 클러스터내의 모든 기지국(BTS)들을 해당 기지국제어기(BSC)와 자기 복구 링을 사용하여 연결시킬 수 있다. 마찬가지로, 전송계층에서 다수의 기지국제어기(BSC)와 이동통신교환기(MSC)간의 연결에 대해서도 자기 복구 링을 적용할 수 있다. 마지막으로 지능계층의 주요 요소는 HLR 및 VLR와 같은 시스템 데이터베이스이며, 데이터베이스의 고장에 대한 견고성을 제공하기 위해 체크포인트 프로토콜 또는 예비 데이터베이스에 의한 데이터베이스 디이버시티와 같은 생존성 전략을 적용할 수 있다.

3.3 생존성 전략을 적용한 열차제어 무선통신 시스템

앞서 살펴본 생존성 전략을 통합하여 반영한 열차제어 무선통신 시스템의 구성을 다음 그림 2에 제시하였다. 접속계층에 대해서는 long-haul 채널과 short-haul 채널을 중첩한 구조를 가지며, 전송계층에 속하는 기지국제어기(BSC)들과 이동통신교환기(MSC)간의 연결은 자기 복구 링 구조를 가진다. 또한, 지능계층에 속하는 HLR과 VLR에 대해서는 복사본을 저장하고 있는 예비의 데이터베이스를 사용하여 견고성을 확보하도록 한다.

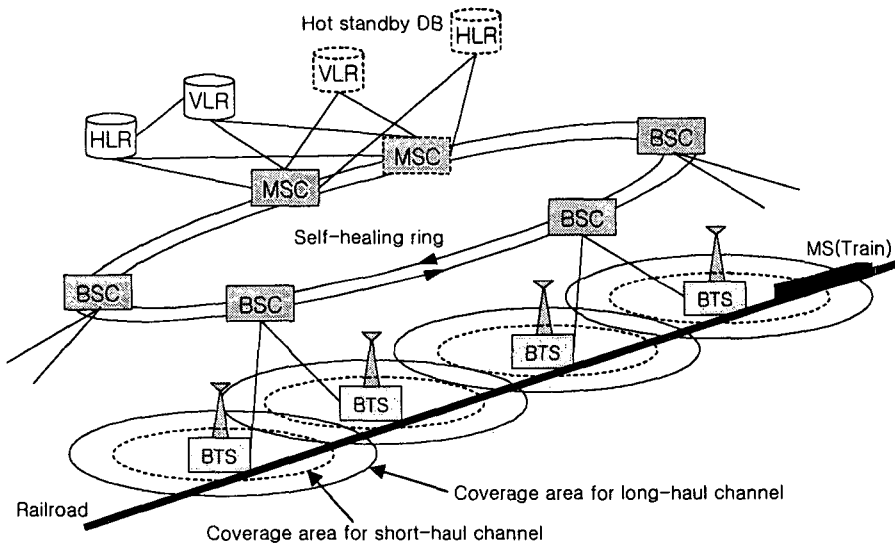


그림 2. 생존성 전략을 반영한 열차제어 무선통신 시스템의 구조.

4. 결론

본 논문에서는 열차제어를 위한 무선통신 시스템의 생존성에 대해 살펴보았다. 무선통신 시스템의 고유한 특성인 이동성은 고장에 따른 네트워크의 성능을 더욱 악화시킬 수 있다. 유선망과는 달리 무선통신 시스템에서의 고장은 결합이 발생한 영역의 위치, 사용자의 이동성 등과 같은 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 본 논문에서는 생존성의 지니는 무선통신 시스템의 설계를 위해 생존성과 관련된 성능 척도 및 생존성 확보 전략을 무선레벨 접속계층, 링크레벨 접속계층, 전송계층, 지능계층으로 구분하여 살펴보았으며, 이를 바탕으로 각 계층에 따른 생존성 전략을 반영한 무선통신 시스템의 구조를 제시하였다.

무선통신 시스템의 생존성과 관련한 연구는 아직까지 미약한 단계로써, 앞서 살펴본 음성 서비스 위주의 생존성 척도 및 전략이외에도 패킷 손실을 및 패킷 재전송 지연 등과 같은 척도를 바탕으로

한 열차제어를 위한 데이터 서비스의 생존성 연구가 절실히 필요하다.

참고문헌

1. M. F. Chang, Y. B. Lin, and S. C. Su, "Improving the Fault Tolerance of GSM Networks," IEEE Network, Jan./Feb., 1998.
2. D. Tipper, T. Dahlberg, and H. Shin, "Providing Fault Tolerance in Wireless Access Networks," IEEE Communication Magazine, Jan., 2002.
3. A. Snow, U. Varshney, and A. Malloy, "Reliability and Survivability of Wireless and Mobile Networks," IEE Comp., July, 2000.
4. D. Alevras et al., "Survivable Mobile Phone Network Architectures: Models and Solution Methods," IEEE Communication Magazine., Mar., 1998.
5. D. Tipper, S. Ramaswamy, T. Dahlberg, "PCS Network Survivability," IEEE WCNC '99, 1999.