

# 철도환경에서 에너지 할당에 따른 부분차등변조 방식을 이용한 중계 네트워크의 성능

조웅\* · 조한벽\*\*

Performance of Relay Networks with Partially Differential Modulation Scheme Depending on Energy Allocation in Railway Environments

Woong Cho\* · Han-Byeog Cho\*\*

요약

중계 네트워크에서는 중계기를 이용하여 송신기로 수신된 신호를 증폭 혹은 복조 후 재변조하여 수신기로 전송하는 역할을 수행한다. 수신기에서는 여러 중계기로부터 수신된 신호를 결합하여 신호를 복조함으로써 통신 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 철도환경에서 에너지 할당에 따른 중계 네트워크의 성능을 분석한다. 변조 방식은 중계기에서는 동기방식을 사용하고 수신기에서는 비동기 방식을 사용하는 부분차등변조 방식을 적용한다. 중계 네트워크에서 주어진 전체 에너지에 대해 수신기와 중계기의 다양한 에너지 할당에 따른 성능을 분석한다.

ABSTRACT

In relay networks, relay nodes amplify or demodulate/remodulate the received signal from the transmitter, and transmit that signal to the receiver. The received signals from several relays are combined and used for demodulation at the receiver, which enhances the performance of the overall system. Partially differential modulation scheme which uses coherent modulation at the relay and non-coherent modulation scheme at the receiver is adopted for modulation scheme. We analyze the performance of systems depending on various energy allocations of source and relays given the total energy in relay networks.

키워드

Relay Networks, Cooperative Communication, Energy Allocation, Railway Environments, Partially Differential Modulation  
중계 네트워크, 협력 통신, 에너지 할당, 철도 환경, 부분 차등 변조

## 1. 서론

중계 네트워크에서는 송신기에서 수신기로 신호를 전송할 때 중계기를 이용하여 신호를 전송한다. 중계기에서 신호를 처리하는 방식에 따라 2가지의 대표적인 프로토콜로 나누어진다. 첫 번째는 송신기로부터

수신된 신호를 단순히 증폭하여 송신기로 전송하는 증폭 후 전송 프로토콜이며, 두 번째는 수신기로부터 수신된 신호를 복조 후 재변조한다음 송신기로 전송하는 복조 후 전송 프로토콜이다. 이 때 중계기를 통해 전송된 신호들은 여러 개의 중계 신호 및 직접파의 신호들이 결합되어 복조시 사용됨으로써 전체적인

\* 중원대학교 컴퓨터시스템공학과(wcho@jwu.ac.kr)

• Received : Nov. 30, 2015, Revised : Jan. 13, 2016, Accepted : Jan. 24, 2016

\*\* 교신저자: 한국전자통신연구원, 스마트모빌리티연구부

• Corresponding Author : Hanbyeog Cho

• 접수일 : 2015. 11. 30

Smart mobility Dept., Electronics and Telecommunications Research Institute

• 수정완료일 : 2016. 01. 13

Email : hbcho@etri.re.kr

• 게재확정일 : 2016. 01. 24

시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다 [1-2]. 수신기에서 신호를 복조하는 방식은 동기방식과 비동기 방식으로 나눌 수 있다. 동기방식은 수신기에서 송신기와 수신기 사이의 채널상태정보(CSI: Channel State Information)를 이용하는 방식이고 비동기 방식은 채널상태정보 없이 수신된 정보를 복조하는 방식이다. 비동기 방식은 동기방식에 비해 성능이 저하되는 단점이 있으나, 채널상태정보를 이용하지 않기 때문에 복조시 시스템의 복잡도를 감소시키는 장점이 있다. 비동기방식을 이용한 중계 네트워크의 성능은 다양한 자원할당을 고려하여 분석되었다[3-5]. 또한 동기 방식과 비동기 방식의 장점을 결합한 부분차등변조기법이 소개되었다. 이 기법은 중계기에서는 송신기로부터 하나의 신호를 받아서 신호를 복조하는 동기방식을 이용하고 최종 수신기에서는 여러개의 중계기로부터 수신되는 신호를 비동기방식으로 이용하는 방식이다. 부분차등변조기법을 적용한 중계 네트워크의 기본적인 성능과 중계기의 다양한 위치를 고려한 성능이 분석되었으며, 중계 네트워크를 다양한 분야에 적용하는 방법이 소개되었다[6-9]. 본 논문에서는 부분차등변조기법을 이용한 중계 네트워크의 성능을 철도환경 하에서 분석한다. 에너지 할당은 정해진 전체 에너지 내에서 송신기와 중계기에 다양한 비율로 에너지를 각각 할당하는 것을 고려한다. 에너지 할당시 여러 개의 중계기가 동일한 위치에 있을 경우와 다른 위치에 있을 경우를 고려하여 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델에 대해서 소개하며 III장에서는 에너지 할당에 따른 성능분석 결과를 보인다. IV장에서는 성능분석 결과에 따른 실제 시스템 적용 시나리오에 대해 논의하며, V장에서 결론을 제시한다.

## II. 시스템 모델

이장에서는 전체적인 시스템 모델을 포함한 신호의 변복조 기법에 대해 소개한다.

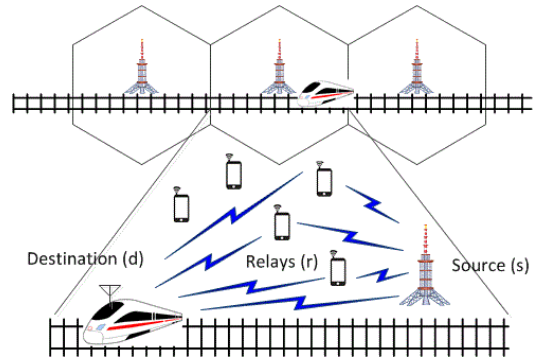


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1 System model

### 2.1 중계 프로토콜 및 채널모델

그림 1은 철도환경에서의 중계 네트워크 시스템 모델을 나타낸다. 송신기(s: source)에서 수신기(d: destination)로 신호를 전송할 때 중계기(r: relay)를 이용하여 신호를 전송하고, 수신기에서는 하나 혹은 여러개의 중계기로부터 수신된 신호를 결합하여 신호를 복조한다. 이때 중계기는 복조 후 전송 프로토콜을 사용하며, 송신기와 중계기 사이에서는 동기 변조 방식을 적용하고, 중계기와 수신기 사이에서는 비동기 변조 방식인 차등변조 방식을 이용한다.

송신기에서 동기 방식으로 전송되는  $n$ 번째 위상변조 심벌신호는  $s_n = e^{j2\pi m/M}$ ,  $m \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 으로 나타내고, 차등변조 방식으로 전송되는 신호는  $x_n^s = x_{n-1}^s s_n$ ,  $n \geq 1$  ( $x_n^s = 1, n = 0$ )이라 하면 송신기로부터 중계기로 전송되는 신호  $y_n^{s,r_k}$ 와 수신기로 전송되는 신호  $y_n^{s,d}$ 는 각각 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$y_n^{s,r_k} = \sqrt{E_s} h_n^{s,r_k} s_n + z_n^{s,r_k} \quad (1)$$

$$y_n^{s,d} = \sqrt{E_s} h_n^{s,d} x_n^s + z_n^{s,d} \quad (2)$$

여기서  $r_k, k \in \{1, \dots, L\}$ 는  $k$ 번째 중계기를 나타내며, 중계기에서는 송신기로부터 수신된 신호를 재변조 후 수신기로 전송하는데,  $k$ 번째 중계기에서 재변조된 신호는  $x_n^{r_k} = x_{n-1}^{r_k} \hat{s}_n^k$ ,  $n \geq 1$  ( $x_n^{r_k} = 1, n = 0$ )로 나타낼 수 있다. 따라서 중계기에서 수신기로 전송되는 신호  $y_n^{r_k,d}$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n^{r_k,d} = \sqrt{E_{r_k}} h_n^{r_k,d} x_n^{r_k} + z_n^d \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)에서  $E_i, i \in \{s, r_k\}$  는 송신기와 중계기에서 전송되는 심벌당 에너지,  $h_n^{i,j}, i, j \in \{s, r_k, d\}$  는 i-j링크 상의 페이딩계수를 나타내는데, 평균이 0이고 분산이  $\sigma_{i,j}^2$ 인 복소 가우시안 분포로 가정한다.  $z_n^{i,j}, i, j \in \{s, r_k, d\}$  는 i-j링크 상의 잡음을 나타내며 평균이 0이고 분산이  $N_{i,j}, i, j \in \{s, r_k, d\}$  인 복소 가우시안 분포를 가진다고 가정한다. 그러면, i-j링크상의 순간 신호대잡음비 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) 및 평균 신호대잡음비는 각각  $\gamma_{i,j} = |h_n^{i,j}|^2 E_i / N_{i,j}$  및  $\bar{\gamma}_{i,j} = \sigma_{i,j}^2 E_i / N_{i,j}$  로 나타낼 수 있다.

## 2.2 복조원칙

이 절에서는 중계기와 수신기에서의 복조원칙에 대해 소개한다. 수신기와 중계기사이에서는 동기방식을 이용하므로 수신기와 중계기사이의 채널상태정보를 이용해서 신호를 복조한다. 그러면, k번째 중계기에서의 신호는 아래 식 (4)를 이용하여 복조할 수 있다.

$$\hat{s}_n^{r_k} = \arg \max_m R\left\{\left(h_n^{s,r_k}\right)^* s_n y_n^{s,r_k}\right\} \quad (4)$$

여기서  $R\{\cdot\}$  은 실수부신호를 나타내며  $(\cdot)^*$  는 신호의 켈레복소수를 나타낸다. 수신기에서는 중계기로부터 수신된 L개의 신호 및 직접파를 이용하여 신호를 복조할 수 있으며, 수신되는 신호는 차등변조방식을 이용하므로 하나의 심볼 이전에 전송된 신호와 현재신호를 이용하여 신호를 복조할 수 있다. 차등변조방식을 이용하는 신호의 복조방식은 자세한 수식을 포함하여 [6][7]에 나타나 있다. 직접파를 이용하는 경우는 L개의 중계기신호를 이용하여 신호를 복조하며, 직접파가 있는 경우는 L+1개의 신호를 이용하여 신호를 복조한다. 이는 각각 아래 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

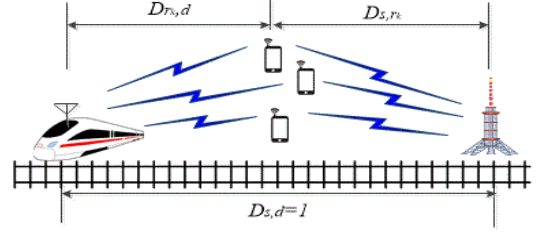


그림 2. 네트워크 형상

Fig. 2 Network topology

$$m' = \arg \max_m \sum_{k=1}^L R\left\{\left(y_n^{r_k,d}\right)^* y_{n-1}^{r_k,d} s_n\right\} \quad (5)$$

$$m' = \arg \max_m \sum_{k=1}^L R\left\{\left(y_n^{s,d}\right)^* y_{n-1}^{s,d} s_n + \left(y_n^{r_k,d}\right)^* y_{n-1}^{r_k,d} s_n\right\} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 중계기로부터 수신된 차등변조신호는 송신기와 중계기의 오류를 포함하고 있는 신호이며, 직접파는 오류를 포함하고 있지 않은 신호이다.

## III. 성능분석

성능분석은 송신기와 수신기 사이에서의 평균심볼 오류율을 이용한다. 각 통신장치 간의 거리( $D_{i,j}$ )와 채널 페이딩계수( $\sigma_{i,j}^2$ )의 사이에는 아래 식 (7)과 같은 관계를 가진다고 가정한다.

$$\sigma_{i,j}^2 = C \cdot D_{i,j}^{-\nu}, i, j \in \{s, r_k, d\} \quad (7)$$

여기서  $\nu$ 는 경로 손실 상수를 나타내는데 본 논문에서는 이동통신 환경을 고려하여 4를 사용하며, C는 상수이므로 전체시스템의 성능분석에 영향을 주지 않게 1로 둔다. 그림 2에 본 논문에서 사용하는 네트워크 형상을 나타낸다. 철도환경을 고려하여 송신기는 철로 가까이 위치한다고 가정하여, 송신기와 수신기 사이의 거리( $D_{s,d}$ )는 1로 둔다. 송신기와 중계기의 거리( $D_{s,r_k}$ ) 및 중계기와 수신기의 거리( $D_{r_k,d}$ )는 0에서 1사이의 값을 가진다고 가정하여 각 노드간은 아래의 수식 (8)을 만족한다고 가정한다.

$$D_{s,d} = D_{s,r_k} + D_{r_k,d} \quad (8)$$

$$E = E_s + L E_{r_k} \quad (9)$$

$$E = E_s + (L+1) E_{r_k} \quad (10)$$

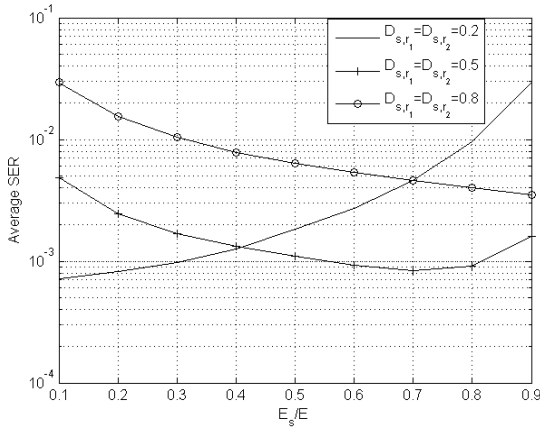


그림 3. 직접파가 없는 경우 동일한 중계기 위치에서의 평균오류율

Fig. 3 Average SER for the same location of relays without direct link

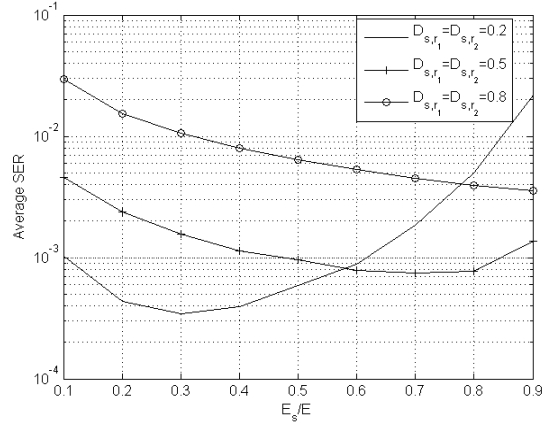


그림 5. 직접파가 있는 경우 동일한 중계기 위치에서의 평균오류율

Fig. 5 Average SER for the same location of relays with direct link

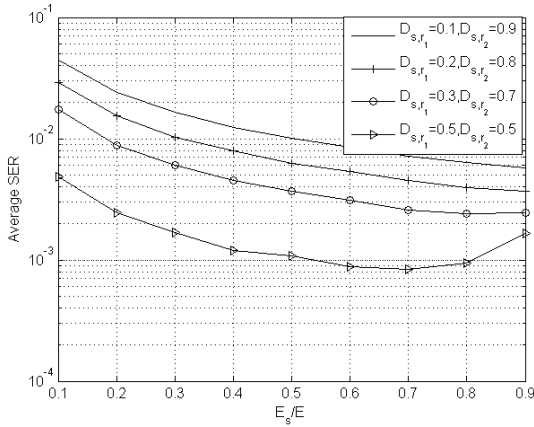


그림 4. 직접파가 없는 경우 다양한 중계기 위치에서의 평균오류율

Fig. 4 Average SER for the various location of relays without direct link

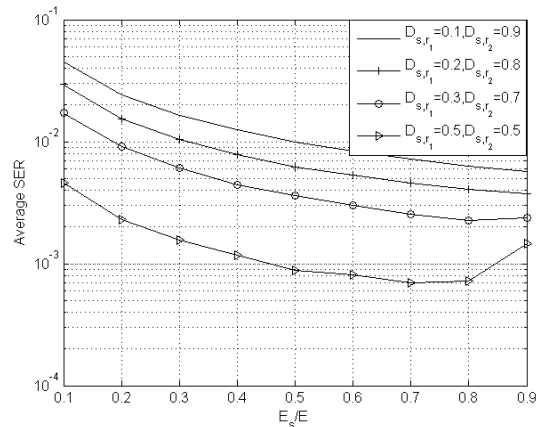


그림 6. 직접파가 있는 경우 다양한 중계기 위치에서의 평균오류율

Fig. 6 Average SER for the various location of relays with direct link

에너지 할당에 따른 성능을 분석하기 위해 전체 에너지( $E$ )는 정해진 값을 사용하고 직접파가 있는 경우와 없는 경우에 전체 에너지는 각각 아래 식 (9), (10)과 같은 조건을 만족 한다고 가정한다.

여기서  $L$ 은 중계기의 개수를 나타낸다. 따라서, 정해진 전체 에너지에서 직접파가 있는 경우는 중계기에서 전송하는 에너지가 직접파가 없는 경우에 비해 작은 에너지 값을 가진다.

그림 3와 4는 직접파가 없는 경우 중계기의 개수가 2일 경우에 다양한 에너지 할당에 따른 평균오류율을 나타내었다. 여기서 전체에너지는 15dB를 사용하였다. 중계기가 동일한 위치에 있을 경우에는 송신기에 할당되는 에너지가 작으면 중계기가 송신기에 가까이 위치할수록, 송신기에 할당되는 에너지가 많을 경우에는 중계기가 송신기와 수신기의 중간지점에 위치할수록 성능이 좋아짐을 확인 할 수 있다. 전반적으로 중계기가 모두 동일한 위치에 있을 경우의 성능이 다양한 위치에 있는 경우보다 좋음을 확인할 수 있다.

그림 5와 6은 직접파가 있는 경우 다양한 에너지 할당에 따른 평균오류율을 나타내었다. 직접파가 없는 경우와 동일하게 중계기의 개수는 2이고 전체에너지는 15dB를 사용하였다. 직접파가 있는 경우에는 송신기에 전체에너지의 10~50%정도의 에너지가 할당되는 경우에는 중계기가 송신기와 가까이 위치할 경우가 성능이 좋으며, 많은 에너지가 송신기에 할당되는 경우에는 중계기가 동일한 위치에 있을 경우 좋은 성능을 보였다. 이는 직접파의 다이버시티 이득 제공으로 인한 성능향상 때문인 것으로 판단된다. 중계기가 다양한 위치에 있는 경우에는 전반적으로 동일한 위치에 있는 경우보다 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 이 결과는 직접파가 없는 경우와 동일하다.

#### IV. 실제 시스템 적용 시나리오

본 논문에서는 부분차등변조방식을 적용한 중계네트워크의 성능을 철도통신환경을 가정하여 분석하였다. 성능분석은 정해진 전체 에너지 하에서 송신기 및 중계기에 할당되는 에너지에 따라 분석하였다. 전반적인 성능은 중계기 동일한 위치에 있을 때 향상됨을 보였다. 중계기가 동일한 위치에 있다고 가정하고 중계기가 송신기 가까이 위치해 있을 때 송신기에 적당량(직접파가 없을 경우에는 약 10~30% 및 직접파가 있을 경우에는 약 10~50%)의 에너지를 할당하고 나머지는 중계기에 할당하는 경우에 최적의 성능을 나타내었다. 부분차등변조방식을 적용하여 위치에 따른 성능을 분석하였는데[7], 본 논문의 결과와 결합하여 조합하여 보면 중계기들이 동일한 위치에 있고 송신기 가까이 위치할수록 좋은 성능을 획득할 수 있고,

할당되는 에너지는 동일한 양이 아닌 위치에 따라 적정량을 할당함으로써 최적을 성능을 획득함을 확인할 수 있다. 또한 위치와 에너지할당 두 가지를 모두 고려하여 정해진 위치에서 에너지할당을 적용하거나 에너지할당을 고려하여 위치를 선택하는 반복적인 할당 알고리즘을 이용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 실제 시스템 적용 시에는 기지국이 중계기로 사용되는 단말기 같은 장치의 정보를 있다고 가정하면, 최적의 성능을 획득할 수 있는 중계기를 선택하여 신호를 전송함으로써 시스템전체의 성능을 향상시킬 수 있다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 부분차등변조방식을 이용한 협력통신 시스템의 성능을 다양한 에너지 할당을 고려하여 분석하였다. 전반적으로 중계기가 동일한 위치에 있는 경우가 다양한 위치에 있는 경우보다 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 송신기에 작은 에너지가 할당되면 중계기가 송신기에 가까이 위치시키고, 송신기에 에너지가 많이 할당되면 중간지점에 위치시켜서 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 위치에 따른 중계네트워크의 성능분석과 결합하여 중계네트워크에서 최적의 성능을 획득하는 방안에 대해서도 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 2015년도 한국전자통신학회 추계 종합학술대회 우수논문을 확장한 논문입니다.

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받은 철도기술연구사업(15RTRP-B089552-02)의 일환으로 수행하였음.

References

- [1] J. Laneman and G. Wornell, "Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks," In *Proc. Wireless Commun. Netw. Conf.*, Chicago, IL, Sept. 23 - 28, 2000, vol. 1, pp. 7 - 12.
- [2] A. Ribeiro, X. Cai, and G. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 4, no. 3, May 2005, pp. 1264 - 1273.
- [3] W. Cho and L. Yang, "Optimum resource allocation for relay networks with differential modulation," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 56, no. 4, Apr. 2008, pp. 531-534.
- [4] W. Cho, R. Cao, and L. Yang, "Optimum resource allocation for amplify-and-forward relay networks with differential modulation," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 56, no. 11, Nov. 2008, pp. 5680-5691.
- [5] R. Cao and L. Yang, "The affecting factors in resource optimization for cooperative communications: A case study," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 11, no. 12, Dec. 2012, pp. 4351 - 4361.
- [6] W. Cho, "Cooperative communication transmission scheme using partially differential modulation," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 7, 2014, pp. 805-810.
- [7] W. Cho and H. Cho, "Effective of relay location in cooperative networks with partially differential modulation scheme," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 6, 2015, pp. 671-676.
- [8] W. Cho, "Physica layer issues in vehicular communications," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 5, 2012, pp. 1229-1234.
- [9] R. Cao and L. Yang, "Decomposed LT codes for cooperative relay communications," *IEEE J. on Selected Areas in Comm.*, vol. 20, no. 2, Feb. 2012, pp. 407 - 414.

저자 소개



**조웅(Woong Cho)**

1997년 울산대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1999년 한양대학교 대학원 전자통신공학과학과 졸업(공학석사)

2003년 Univ. of Southern California 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사)

2007년 Univ. of Florida 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사)

2008년 2월 ~ 2011년 2월 한국전자통신연구원

2012년 3월 ~ 현재 중원대학교 컴퓨터시스템공학과 교수

※ 관심분야 : 무선통신, 협력통신, ITS



**조한벽(Han-Byeog Cho)**

1981년 아주대학교 산업공학과 졸업(공학사)

1983년 한양대학교 대학원 산업공학과 졸업(공학석사)

1992년 한양대학교 대학원 산업공학과 졸업(공학박사)

1984년 3월 ~ 현재 한국전자통신연구원 책임연구원

※ 관심분야 텔레매틱스/ITS 서비스 및 표준화, 차량간 통신기술, 차량-인프라통신기술, 협력주행 기술, 철도무선통신기술