

# 철도 통신 시스템에서의 도플러 보상기법의 성능

박재정\*, 김윤현\*, 김진영\*, 양재수\*\*

## Performance of Doppler Compensation Technique for Railway Communication System

Jae Jung Park\*, Yoon Hyun Kim\*, Jin Young Kim\*, and Jae Soo Yang\*\*

### 요 약

한국형 고속철도인 KTX가 2004년 개통된 이후, 우리나라에서도 철도의 이용도가 급증했다. 개선되는 철도 기술과 함께, 예전에 비해 열차의 속도 또한 빠르게 발전하였다. 그러나 이러한 열차속도의 발전은 철도 통신에 있어서 열차 속도 증가로 인한 도플러 효과와 이에 대한 보상이라는 새로운 이슈를 제기하였다. 이러한 도플러 효과는 통신하는 대상의 속도에 따라 주파수 변이를 일으키며, 이는 신호의 왜곡으로 이어져, 통신성능에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 이러한 도플러 효과에 대한 문제는 철도 무선 통신에 있어서, 반드시 해결해야 할 문제이다. 본 논문에서는 앞으로 발생할 고속의 철도 통신에서 발생하는 도플러 효과와 발생하는 도플러 효과에 대한 보상기법 및 이에 대한 모의실험 결과를 소개하고자 한다.

**Key Words** : doppler shift, compensation technique, railway system, bit error rate

### ABSTRACT

Since the opening of Korean high-speed rail, KTX in 2004, the use of trains in Korea soared. Improved rail technology, as well as the speed of the train was developed. However, the development of the train speed raised new issues of Doppler effect and this effect compensation. Depending on the speed of communication target, Doppler effect generates frequency shifting and this effect leads to a distortion of the signal. For this reason, the Doppler effect adversely affect the communication performance. Therefore, the Doppler effect problem must be solved for the railway wireless communication. In this paper, we present technique of compensation for the Doppler effect that occurs in high-speed railway communication and simulation result.

## I. 서 론

기본적으로 도플러 효과는 이동하는 속도에 따른 주파수 변화로 인한 문제로서, 이는 이동통신을 하는데 있어 심각한 성능 열화를 가져올 수 있는 문제이다.

이러한 도플러 효과에 관련된 문제는 일반적으로 통신이 이루어지는 디바이스가 대기권 밖에서 수 천 킬로미터 단위의 엄청난 빠른 속도로 이동하고 있는 위성 통신에서 주로 제기되는 문제로서, 휴대폰 등의 대기권 안에서 일반적으로 이루어지는 무선통신에서는 그렇게 심각하게 고려되지 않는 문제였다. 그러나 2004년 우리나라에 한국형 고속철도인 KTX가 도입된 이후, 열차의 속도가 기존의 열차에 비해 2배 이상 훨씬 빨라지면서, 기존에 그렇게 심각하게 고려하지 않

아도 되었던 수준의 도플러 효과로 인한 주파수 변이 문제가 무선 통신에 있어서 성능열화의 한 요인이 될 정도의 수준으로 접근하고 있다. 이에 따라 철도 무선 통신에서도 이러한 도플러 효과에 관한 문제와 해결 방안이 제기되고 있다.

일반적으로, 철도에서 이루어지는 무선통신은 기존의 무선통신 방식과 크게 차이가 없으며, 이에 따른 효율성 확보를 위해 기존의 무선통신 기술을 적용하여 효율성을 높이고 있다. 그러나 이러한 주파수 변이로 인한 신호 변화에 대한 논의는 아직까지 많이 논의 되지 않은 사항이다. 그리고 철도의 특성상, 철도 무선통신에서 오고가는 정보들은 열차의 운행 및 운영 정보뿐만 아니라, 재난이나 사고 등의 긴급 상황에서 인명 구조를 위해 이루어지는 통신 등의 중요한 정보를 포함 하고 있다. 따라서 열차의 운행 정보가 이러한 도

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2012-(H0301-12-1005))

\*광운대학교 전파공학과 ([parkjajang@naver.com](mailto:parkjajang@naver.com)).

\*\*단국대학교 전기전자공학부

접수일자 : 2012년 11월 5일, 수정완료일자 : 2012년 11월 12일, 최종 게재확정일자 : 2012년 12월 3일

플러 효과로 인한 송신 장애로 인해 왜곡되어 전달이 되지 않거나, 그 정보가 잘못 전달된다면, 철도 출발이나 도착 시간. 현재의 열차 위치, 열차의 운영 상태 등의 열차 정보가 잘못 전달됨에 따라, 철도 운영상에 상당한 차질을 빚을 것이며, 특히 자연재해나, 탈선 등의 긴급 상황에서의 통신에서도 이러한 송신 장애가 발생하게 된다면, 많은 승객을 한꺼번에 수송하는 철도의 특성상 많은 인명 피해를 초래할 수도 있는 것이다. 따라서 이러한 도플러 효과로 인한 송수신의 장애 및 성능 저하 문제는 반드시 극복해야 할 문제이다.

이러한 도플러 효과로 인한 성능 열화를 극복하기 위하여, 많은 노력을 기울여 왔으며, 현재 많은 기법들이 연구 진행 중에 있다. 본 논문에서는 이러한 도플러 효과에 관한 정의 및 도플러 효과에 대한 내용과 철도 통신에서 적용될 수 있는 도플러 효과 및 이에 대한 도플러 보상기법을 소개한다.

## II. 도플러 효과

도플러 효과란. 기지국과 같은 고정된 수신단이 아닌, 이동하는 수신단과 이에 따른 속도에 의해 주파수 변이가 일어나는 것으로, 일반적인 이동 중의 통화 등에서도 도플러 효과가 발생할 수 있다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 사람의 걷는 속도 등의 미세한 효과는 통신에 있어서 크게 장애를 주지는 못하나, 대기권 밖에서 엄청난 속도로 움직이는 위성뿐만 아니라, 고속으로 달리는 차량 등에서도 이러한 도플러 효과로 인한 성능 저하는 문제가 될 수 있다.

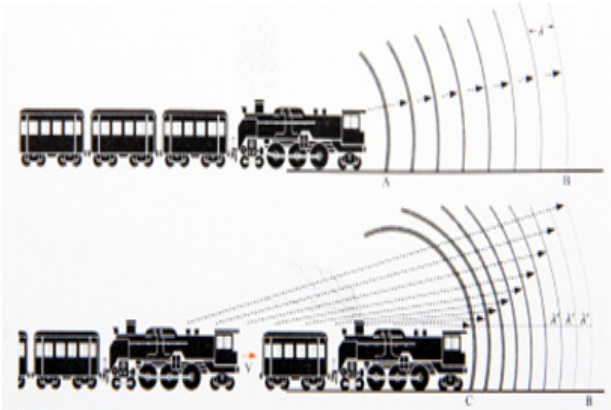


그림 1. 열차에서의 도플러 효과

일반적으로, 움직임이 없는 상태에서의 송신단에서 수신단으로 k번째 전달되는 파형은  $A_1 \cos 2\pi(f_0 + k\Delta f)$ 로 표현할 수 있다. 그리고 R의 거리만큼 떨어진 목표의 산란 위상 출력은  $A_2 e^{-j\phi_k}$ 이다. 그리고 여기서  $\phi_k$ 의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3-4].

$$\phi_k = 2\pi(f_0 + k\Delta f) \frac{2R_k}{c}$$

여기서  $f_0$ 는 일반적인 반송파 주파수 혹은 기본적인 주파수이고,  $\Delta f$ 는 증가하는 주파수의 크기,  $R_k$ 는 k번째 펄스가 도착할 때, 안테나와 대상사이의 거리를 나타낸다. 만약 안테나가 대상의 움직임을 포착하고, 그 움직임을 속도가  $v_t$ 인 경우, k번째 펄스의 거리는 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_k = R_0 - v_t k T_r$$

위의 식에서  $R_0$ 는 원래 거리,  $T_r$ 은 펄스의 반복 시간을 의미한다. 위의 식을 적용하여  $\phi_k$  값을 다시 정리하면,

$$\phi_k = 2\pi(f_0 + k\Delta f)(R_0 - v_t k T) \frac{2}{c}$$

으로 정리할 수 있다. 여기서 T는 펄스 폭이다. 편의상 위의 식을 다시 풀어 쓰면,

$$\phi_k = \frac{4\pi f_0 R_0}{c} + 2\pi \frac{\Delta f}{T} \frac{2R_0}{c} k T - 2\pi \frac{2v_t}{c} f_0 k T_r - 2\pi \frac{\Delta f}{T} \frac{2v_t k T_r}{c} k T$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 처음과 두 번째 구간은 상수이며, 3번째 구간은 기본 주파수  $f_0$ 에 의해 구성되는 위상, 4번째 구간은  $k\Delta f$ 에 의해 발생하는 위상이다. 이 주파수들은 각기 다른 펄스 반복 시간 안에서 도플러 시프트를 발생시킨다 [5]. 이러한 속도에 따른 주파수 천이는 신호의 왜곡으로 인해, 무선 통신에 있어서 부정적인 영향을 끼칠 수 있으며, 이는 무선 통신에서 성능 열화의 한 원인이 되기도 한다.

## III. 도플러 효과 보상기법

이러한 도플러효과로 인한 통신 성능 감소를 위해, 본 논문에서는 등화기 필터를 이용한 보상기법을 제안하였다. 이는 도플러효과에 의한 주파수 천이로 인한 성능 열화를 등화기를 이용하여 열화 된 성능을 보상하는 방법이다.

이 때, 사용된 등화기 필터의 종류는 LMS(Least Mean Square) 필터를 사용하였다. 일반적으로 MMSE 등화기를 사용하면 가장 좋으나, 구조의 간단성과 안전성을 위해, 가장 널리 사용되는 LMS 필터를 이용하였다.

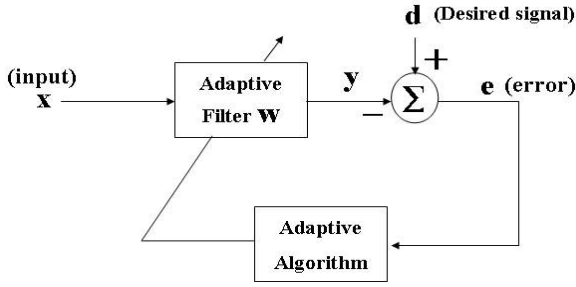


그림 2. 필터 시스템 블록도

위의 블록도는 필터의 시스템 블록도로써, x는 입력, y는 필터 출력, d는 원하는 신호, 그리고 e는 원하는 신호 d와 필터 출력 y와의 오차를 나타낸다. 이때, j번째 출력과 오차 값은 다음과 같이 표현 가능하다.[8]

$$y_j = x_j^T w_j = w_j^T x_j$$

$$e_j = d_j - y_j = d_j - x_j^T w_j = d_j - w_j^T x_j$$

그리고 이때의 square error 값은

$$(e_j)^2 = d_j^2 - 2d_j x_j^T w_j + w_j^T x_j^T w_j$$

으로 표현 가능하며, 이에 따른 mean square error 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_j^2 = E[e_j^2] = E[d_j^2] - 2E[d_j x_j^T] w_j + w_j^T E[x_j x_j^T] w_j$$

$$= E[d_j^2] - 2p^T w + w^T R w$$

여기서  $E[\cdot]$ 의 값들은 기대값 연산자이고,  $p = E[d_j x_j^T]$ ,  $R = E[x_j x_j^T]$  값이다. 그리고 이에 따른 mean square error의 기울기는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta_j^2}{\partial w} = \frac{\partial}{\partial w} (E[d_j^2] - 2p^T w + w^T R w)$$

$$= \nabla = -2p + 2Rw$$

여기서 이 기울기 값을 0으로 놓으면, 다음과 같은 최적 값을 얻을 수 있는데, 그 값은 다음과 같다.

$$w^* = R^{-1} p$$

그러나 여기서 이 식의 값을 구하기 위해서는 역행렬 계산을 필요로 하며, 특히 입력 신호의 통계를 알아야 하는데, 그것은 불가능하다. 그래서 다른 대안적인 방법을 사용하여, 최적값을 구하는데, 이때 최적값을 구하기 위한 추정 기울기를 사용하며, 그 추정 기울기는 다음과 같다.

$$\hat{\nabla} = \frac{\partial e_j^2}{\partial w}$$

여기서 최적값을 구하기 위해 steepest descent 방법을 이용하면, LMS 알고리즘의 계수 갱신 식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$w_{j+1} = w_j + \mu(-\hat{\nabla}_j)$$

여기서  $\mu$  값은 스텝 크기이다. 그리고 이것을 바탕으로 추정 기울기를 계산하면,

$$\hat{\nabla} = \frac{\partial e_j^2}{\partial w} = 2e_j \frac{\partial e_j}{\partial w} = 2e_j \frac{\partial (d_j - x_j^T w)}{\partial w} = -2e_j x_j$$

와 같이 표현 할 수 있다.

위의 추정 기울기 값에 따른 최종적인 LMS 알고리즘은 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$w_{j+1} = w_j + 2\mu e_j x_j$$

여기서  $\mu$  값은 알고리즘이 최적 값으로 수렴하는 속도를 결정한다.[9]

## IV. 모의 실험 및 결과

본 논문에서의 모의실험 결과는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로는 도플러 효과로 인한 통신 성능 감소를 알아보기 위해, 이론적인 BPSK 변조를 거친 BER 값과 도플러 효과가 적용되지 않는 일반적인 Rayleigh 채널의 BER, 그리고 마지막으로 도플러 효과가 적용되는 채널의 BER의 3개의 채널의 BER 성능을 비교하였다. 다음의 표 1은 BER 성능 분석 모의 실험을 위한 파라미터 값이다.

표 1. 표 실험 파라미터

Item	Value
Modulation method	BPSK
Sample time of the input signal	1/1000 sec
Maximum Doppler shift(doppler channel)	30
Signal SNR	0 ~ 30
Noise environment	AWGN

표 1의 파라미터에서는 최대 도플러 시프트 값을 열차의 속도와 비슷한 34m/s에서의 값으로 설정하였다. 그림 3의 그림은 위의 파라미터를 바탕으로 하여 이론적인 BPSK 변조를 거친 BER 값과 도플러 효과가 적용되지 않는 일반적인

Rayleigh 채널의 BER, 그리고 마지막으로 도플러 효과가 적용되는 채널의 BER의 3개의 채널의 BER 성능을 비교한 그림이다. 그래프 값을 비교해 볼 때, 도플러효과가 적용되는 채널은 이론적인 BPSK 변조 채널보다는 물론, 일반적인 Rayleigh 채널에서의 BER 성능보다도 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

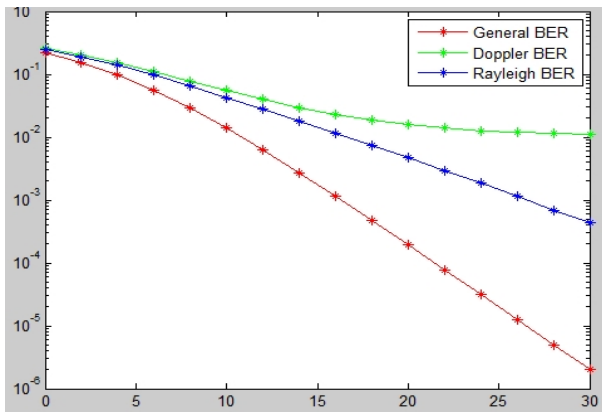


그림 3. 각 채널들의 BER 성능 비교

위의 BER 성능 비교에 이어, 2번째 실험은 도플러 효과로 인한 주파수 천이로 인해, 변화하는 파형에 관한 실험이다. 그림 4,5,6의 그림들은 위의 BER 성능과 더불어 도플러 효과로 인한 신호 파형의 변화를 보여주는 그림이다. 그림 4의 그림은 수신하는 대상이 이동하지 않은, 이동이 없는 상태에서 관찰되는 파형이고, 그림 4, 5의 그림이 수신하는 대상이 이동하였을 때에 관찰되는 파형이다. 그리고 그림 4, 5의 두 파형은 이동 속도의 차이를 두어(각각 15m/s, 35m/s) 속도 차이에 따른 신호 파형의 변화를 관찰 하였다.

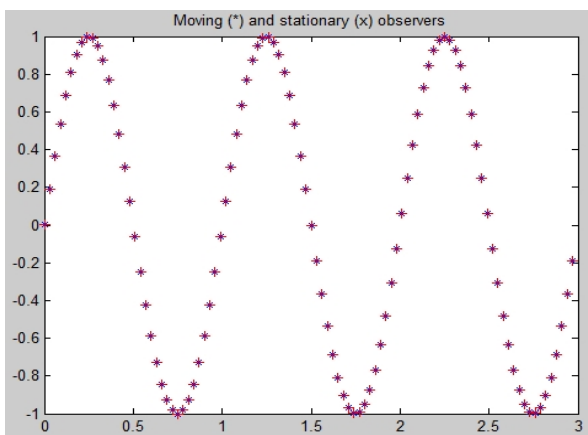


그림 4. 대상의 이동이 없을 때의 파형 차이

그림을 보면, 수신하는 대상이 이동하기 전에는 원래의 파형과 똑같은 파형을 보여주는데 비해 밀의 이동간에 측정된 파형에서는 도플러효과로 인한 주파수 천이로 인해, 원래의 파형과는 다른 파형이 나타남을 확인할 수 있다. 또한 속도의 차이로 인해서도 파형의 변화가 다름을 확인할 수 있다.

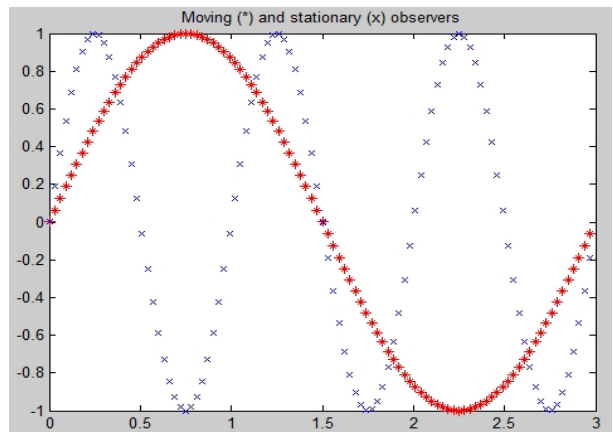
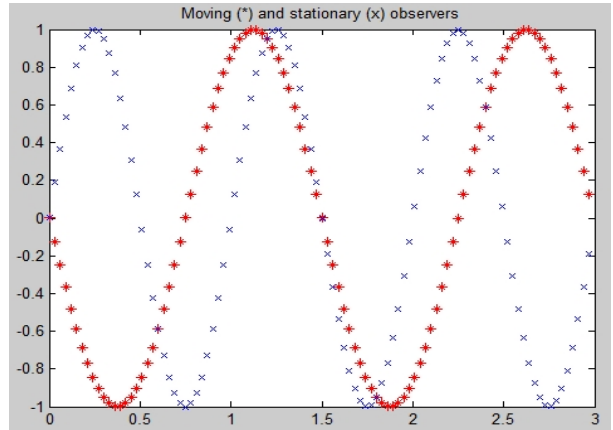


그림 5. 대상이 이동할 때의 파형 차이

마지막 3번째 실험은 LMS 기법을 이용한 보상기법을 적용하여 첫 번째 실험과 마찬가지로 이론적인 BPSK 변조를 거친 BER 값과 도플러 효과가 적용되지 않는 일반적인 Rayleigh 채널의 BER, 그리고 마지막으로 도플러 효과가 적용되는 채널의 BER 성능을 비교하였다. 그림 6에서 나와있는 그래프는 도플러 효과가 적용 됐을 때의 이러한 신호 왜곡 및 통신성능의 열화를 줄이고자, 위에 설명한 LMS 필터를 이용한 보상기법을 적용하여 다시 모의실험을 한 결과이다. 결과를 보면 알 수 있듯, 위의 보상기법을 적용하지 않았을 때의 BER 성능 비교보다 성능의 차이가 줄어들었음을 알 수 있다.

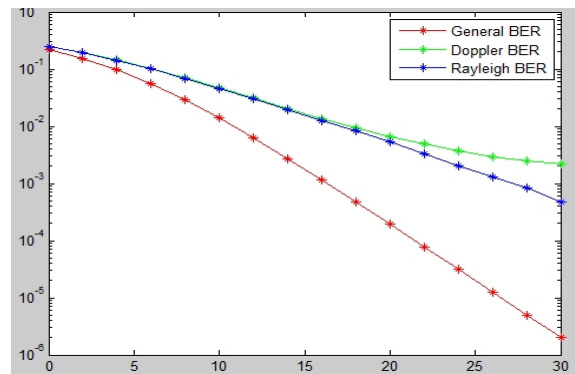


그림 6. 도플러 보상기법을 적용한 채널의 BER 성능 비교

## V. 결론

본 논문에서는 도플러 효과에 대한 간단한 소개와, 철도 통신에서의 도플러 효과에 대한 모의 실험과 이에 보상 기법을 적용했을 때의 성능 비교를 소개하였다. 여러나라 에서 철도는 매우 유용한 교통 수단이며, 우리나라 또한 고속철도의 개통과 함께 이용자의 수가 꾸준히 늘고있는 추세이다. 이렇게 발전하는 철도와 더불어 철도에서 이루어지는 통신에서의 발전 또한 꾸준히 이루어져야 하며, 정확한 정보 전송이 가능하여야 한다. 따라서 도플러 효과로 인한 통신 성능 열화는 반드시 해결해야 할 문제 중 하나이다. 이러한 기법들을 이용한 도플러 효과 보상을 통해, 한층 더 발전된 철도 통신을 기대해 볼 수 있다.

## 참고 문헌

[1] Hu Xiujuan, Deng Jiahao, Cheng Wushan, Zhou Zhifeng and Sang Huiping, "An adaptive compensation of moving target doppler shift for airborne radar," In proceeding 2009 IEEE Aerospace conference, pp. 1-6, 2009.

[2] Limin Yu and L.B. White, "Broadband Doppler compensation for rational wavelet-based UWA communication systems," In proceeding 2005 Asia-Pacific Conference on Communications, pp. 605-609, 2005.

[3] T.J. Riedl and A.C. Singer, "Broadband Doppler compensation: Principles and new results," In proceeding 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), pp. 944-946, 2011.

[4] Su Xi and Wang Yi-ying, "Doppler compensation algorithm based on pseudorandom sequence," In proceeding 2009 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, pp.265-268, 2009.

[5] Chih-Hung Lee, Po-Ying Chen and Hsueh-Jyh Li, "Doppler Compensation for WCDMA System in High-Speed Mobile Environments," In proceeding IEEE International Conference on Communications 2006, vol. 11, pp. 4906-4911, 2006.

[6] Hua Jingyu, Zhao Xiaomin, Xu Zhijiang and Meng Limin, "An Adaptive Doppler Shift Estimator in Mobile Communication Systems," In proceeding IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, pp. 117-121, 2007

[7] Baosheng Li, Shengli Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag and P. Willett, "Multicarrier Communication Over Underwater Acoustic Channels With Nonuniform Doppler Shifts," In proceeding IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 33, pp. 198-209, 2008.

[8] A. C. P. Veiga, Y. Iano and G. A. Carrijo, "A new adaptive filter structure: comparative study of NLMS, DST-LMS and DCT-LMS schemes applied to electromyographic signal

modelling," In proceeding 2001 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing 2001, vol. 2, pp. 555-558

[9] E. A. Wan, "Adjoint LMS: an efficient alternative to the filtered-x LMS and multiple error LMS algorithms," In proceeding IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 1996, vol. 3, pp. 1842- 1845

[10] G. J. R. Povey and J. Talvitie, "Doppler compensation and code acquisition techniques for LEO satellite mobile radio communications," In proceeding Fifth International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation 1996, pp. 16-19, 1996.

[11] G. Eynard and C. Laot, "Blind Doppler compensation scheme for single carrier digital underwater communications," In Proceeding OCEANS 2008, pp. 1-5, 2008

[12] B.S. Sharif, J. Neasham, O.R. Hinton, A.E. Adams, J. Davies, "Adaptive Doppler compensation for coherent acoustic communication," IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, vol. 147, pp. 239-246, 2000.

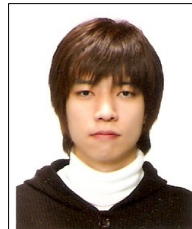
[13] Zhao Zhao and Xiang-quan Shi, "Doppler compensation for orthogonal netted radar systems," In Proceeding 9th International Conference on Signal Processing 2008, pp. 2246-2249, 2008.

[14] Zhang Yanyan, Jiang Lifeng, Song Wanjie and Wu Shunjun, "Technique of Doppler compensation for phase-coded signal pulse compression," In Proceeding International Conference on Radar 2006, pp.1-4, 2006.

[15] Guo Tieliang, Zhao Danfeng and Zhang Zhiyong, "Doppler estimation and compensation for underwater acoustic OFDM systems," In Proceeding Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC) 2011, vol. 2, pp. 863-867, 2011.

## 저자

### 박재정(Jaejung Park)



- 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학과 학사졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

<관심분야> : 디지털 통신, 스마트 그리드, PLC  
 <e-mail> : parkkajang@naver.com

**김 윤 현(Yoonhyoun Kim)**



- 2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과 학사 졸업
- 2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과 석사 졸업
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

<관심분야> : 디지털통신, MIMO-OFDM, VLC, 협력통신, 채널 모델링, 채널 부호화

<e-mail> : [ultrayh1873@kw.ac.kr](mailto:ultrayh1873@kw.ac.kr)

**김 진 영(Jinyoung Kim)**



- 1998년 : 서울대 전자공학과 (공학박사)
- 2000년 : 미국 Princeton University, Research Associate.
- 2001년 : SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원

- 2009년 : 미국 MIT 공대 Visiting Scientist
- 2001년 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화

<e-mail> : [jinyoung@kw.ac.kr](mailto:jinyoung@kw.ac.kr)

**양 재 수(Jae Soo Yang)**



- 1991년 : 서울대학교 MBA 수료
- 1993년 : 미국 NJIT 전기 및 컴퓨터 공학과 공학박사
- 2011년 ~ 현재 : 단국대학교 교수

<관심분야> : 디지털통신, RFID/ USN, 차세대 이동통신