

논문 2011-3-3

멀티 홉 군통신 시스템을 위한 간섭 제거 기법 성능 분석

Performance of Interference Cancellation Scheme for Multihop Military Communication Systems

김요철*, 김진영*

Yocheol Kim, Jin-Young Kim

요약 본 논문에서는 멀티 홉 군통신 시스템에서 발생할 수 있는 동일채널 간섭 (CCI : Co-Channel Interference) 제거 성능을 분석하였다. 간섭 제거 기법으로 먼저 Zero Forcing (ZF)과 Minimum Mean Square Error (MMSE) 기법을 적용하여 간섭을 제거한 후, 연속 간섭 제거 (SIC : Successive Interference Cancellation) 알고리즘을 이용하여 추가적인 다이버시티 이득을 얻고 간섭 제거 성능을 향상시킨다. 무선 채널은 레일레이 (Rayleigh) 페이딩 채널을 고려하여 모의 실험을 하였으며, 시스템 성능은 비트 오류 확률 (Bit Error Probability) 측면에서 분석되었다. 모의실험 결과로부터, 멀티 홉 무선 네트워크 환경에서 MMSE가 ZF보다 BER 성능을 현저하게 향상시킴을 확인하였으며, 각각 기법에 연속 간섭 제거 알고리즘을 적용한 경우, 그 성능이 더욱 좋아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 MMSE-SIC 방식은 멀티 홉 군통신 시스템에서 보다 신뢰성 있는 신호의 전송을 제공할 수 있다.

Abstract In this paper, we analyze co-channel interference cancellation performance to be generated in multi-hop military communication system. First, remove interference using zero-forcing (ZF) and minimum mean square error (MMSE) scheme as interference cancellation methods, and then obtain additional diversity gain and improve interference cancellation performance by applying successive interference cancellation (SIC). We consider Rayleigh fading channel and system performance is analyzed as respect of bit error probability. From simulation results, we confirm MMSE improves significantly BER performance than ZF in multi-hop wireless network environment. It is also confirmed ZF and MMSE schemes applying SIC algorithm have better performance comparing to the existing schemes. Therefore, MMSE-SIC method can provide more reliable signal transmission in the multi-hop military communication system.

Key Words : Cooperative communication, Multi-input multi-output (MIMO), Successive interference cancellation (SIC)

1. 서 론

전시에 전장에서 각 전투/지원 유닛과의 통신 네트워크 구축은 전략의 성공을 좌우할 정도로 중요하다. 신속

함과 동시에 설치가 용이한 통신 네트워크를 구축하기 위해서는 무선기반의 네트워크가 형성되어야 한다. 그러나 전장의 특성상 작전 수행에 관련한 신호는 하나라도 빠짐없이 전송되어야하므로 무엇보다 신뢰성이 보장되어야 한다. 이를 위해 다중 입력 다중 출력 (MIMO: multi-input multi-output) 개념을 사용한다. MIMO는 송신기와 수신기에 다수의 송·수신 안테나를 이용하여 시

*김요철, LG전자 MC사업본부

*김진영, 광운대학교 전파공학과

접수일자 2010.9.10, 수정일자 2011.4.20

게재확정일자 2011.6.10

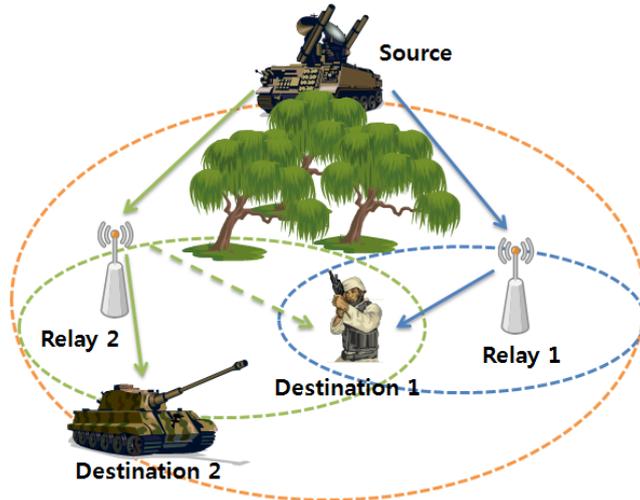


그림 1. 멀티 홉 군통신 시스템 모델
Fig. 1. Multi-hop military communication system model

스텝 대역폭의 증가 없이 고속 데이터를 전송하거나 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기술이다^[1-2]. 하지만 송·수신기에 다중 안테나를 설치해야 하기 때문에 하드웨어 상의 크기 및 무게, 가격 등의 문제가 발생한다. 전차계열이나 주둔지의 기지국과 같이 공간과 무게에 대한 제약이 덜한 노드들에서는 큰 문제가 되지 않았지만, 일반 병사들(주로 통신병)이 작전을 수행하는데 있어서 큰 문제를 초래한다. 따라서 MIMO로 인한 시스템 성능 향상의 장점을 그대로 유지하면서 앞서 말한 문제를 해결하기 위한 방안으로 제안된 기술이 협력통신(cooperative communication) 기술이다^[3]. 협력통신 네트워크에서 모든 노드들은 서로 협력하여 신호를 목적지에 전송한다. 따라서 노드들 간의 협력으로 인해 송신된 여러 개의 동일한 신호는 협력 다이버시티를 형성하여 신뢰성을 높여주므로 시스템 성능을 향상시킨다.

그러나 무선 환경에서는 많은 제약과 왜곡 요소들이 존재하여 각 노드간의 신호 전송에 악영향을 끼친다. 그 중에서 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위한 주파수 재사용은 동일채널(co-channel) 간섭을 야기하는데^[4], 이 간섭 제거는 군통신 시스템에서 매우 중요한 일임에 틀림없다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 MMSE(minimum mean square error) 기반의 연속 간섭 제거(successive interference cancellation) 기법을 이용하여 멀티 홉(또는 협력통신) 군통신 시스템에서 동일 채널 간섭 제거 성능을 분석하고 모의실험을 하였다. 본

논문에서는 MMSE-SIC 알고리즘의 성능을 ZF(zero-forcing)-SIC 알고리즘과 비교하여 나타내었으며, 비트 오류 확률(bit error probability) 측면에서 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장과 제 3장에서는 본 논문에서 고려한 멀티 홉 군통신 시스템 모델 및 간섭 시나리오를 각각 제시하였으며, 제 4장에서는 본 논문에서 고려한 간섭제거 알고리즘에 대해 소개하였다. 제 5장에서 본 논문에서 고려한 간섭제거 알고리즘에 대한 모의실험 결과를 제시하였으며, 본 논문의 결론과 향후 과제에 대한 내용을 제 6장에서 언급하였다.

II. 시스템 모델

1. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려한 멀티 홉 군통신 시스템을 나타낸다. 하나의 Source와 두 개의 Relay와 Destination, 이렇게 5개의 노드로 이루어져 있다. 각 노드들은 모두 2개의 안테나를 가지고 있다. Source와 Destination 1 및 Destination 2 사이에는 숲 또는 산 등의 장애물이 있어서 Source에서 송신된 신호가 곧바로 Destination 1 및 Destination 2에 수신되지 않고, 반드시 Relay 1 및 Relay 2를 거쳐서 목적지에 수신된다. 그리고 모든 전송 경로는 각각 독립이라고 가정한다.

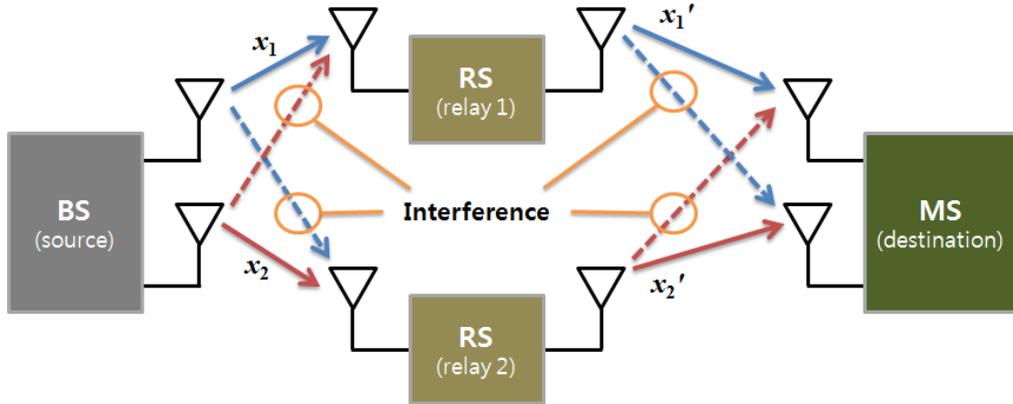


그림 2. 멀티 홉 간섭 시나리오
Fig. 2. Multi-hop interference scenario

2. 간섭 시나리오

Source는 동일한 주파수대역을 통하여 신호 x_1 과 x_2 를 송신하는데, x_1 과 x_2 는 각각 Destination 1과 Destination 2로 전송될 신호이다. 전송된 신호 x_1 과 x_2 는 각각 Relay 1과 Relay 2를 거쳐 Destination 1과 Destination 2에 수신된다. 여기서, 각 Relay는 DF (Decode and Forward) 방식을 사용하며, Relay 1은 Destination 1의 전용 Relay이며, Relay 2는 Destination 2의 전용 Relay라고 가정한다. 따라서 Relay 1에 수신된 신호 중 x_2 는 간섭성분으로 작용하고, 마찬가지로 Relay 2에 수신된 신호 중 x_1 은 간섭성분이 된다. 각 Relay는 수신신호로부터 간섭성분을 제거하여 Relay 1은 x_1' 을, Relay 2는 x_2' 를 각각 Destination 1과 Destination 2로 전송한다. Relay에서와 마찬가지로 Destination 1에 수신된 신호 중 x_2' 는 간섭성분이 되며, Destination 2에 수신된 신호 중 x_1' 는 간섭으로 작용한다. Destination 1과 Destination 2는 원하지 않는 간섭 성분을 제거한 후 원 신호를 복원하는데, 본 논문에서는 각 Relay와 Destination에서 간섭성분을 제거하여 시스템의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

n 번째 Relay에서 수신된 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{rn} = RX + N_{rn} \quad (1)$$

여기서 $n = 1, 2$ 이고, $Y_{rn} = [y_{1, rn} \ y_{2, rn}]^T$ 이며,

$y_{1, rn}$ 과 $y_{2, rn}$ 은 Relay n 의 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나에 수신된 신호를 나타낸다. $X = [x_1 \ x_2]^T$ 는 Source의 각 안테나에서 송신된 신호이다. $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$ 는 Source와 Relay 1과 2 사이의 채널 행렬을 나타낸다. 그리고 $N_{rn} = [N_{1, rn} \ N_{2, rn}]^T$ 은 평균이 0이고 분산이 $\sigma_{rn}^2 = [\sigma_{1, rn}^2 \ \sigma_{2, rn}^2]^T$ 인 복소 AWGN (additive white Gaussian noise)을 나타낸다.

m 번째 Destination에 수신된 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{dm} = HX' + N_{dm} \quad (2)$$

여기서 $Y = [y_{1, dm} \ y_{2, dm}]^T$ 이고, $y_{1, dm}$ 과 $y_{2, dm}$ 는 Destination m 의 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나에 수신된 신호를 나타낸다. $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ 는 Relay 1 및 Relay 2와 Destination m 사이의 채널 행렬을 나타낸다. 그리고 $N_{dm} = [N_{1, dm} \ N_{2, dm}]^T$ 은 평균이 0이고 분산이 $\sigma_{dm}^2 = [\sigma_{1, dm}^2 \ \sigma_{2, dm}^2]^T$ 인 복소 AWGN을 나타낸다.

III. 간섭 제거 알고리즘

1. ZF-SIC

ZF-SIC를 적용한 수신기에서는 간섭제거를 위해 다

음과 같이 선형적인 검출기를 적용한다.

$$W_{ZF}H = I \quad (3)$$

여기서 $W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H$ 복호 행렬이며, $(\cdot)^H$ 는 Hermitian 전치행렬을 나타낸다. $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ 는 채널 행렬을 나타내며, $h_{i,j}$ 는 송신기의 j 번째 안테나에서 수신기의 i 번째 안테나로의 채널 계수를 나타낸다. Y 가 주어졌을 때, ZF 등화기로부터 추정된 신호를 얻을 수 있는데, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X} = W_{ZF} Y \quad (4)$$

여기서 $\hat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2]$ 는 추정된 신호를 나타낸다. 만약 H 의 행렬식이 0이 아니라면 역행렬이 존재하게 되는데, 이때 복호 행렬은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$W_{ZF} = H^{-1} \quad (5)$$

그리고 ZF 복호 후의 추정된 신호 \hat{x}_1, \hat{x}_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}_1 = x_1 + \frac{h_{22}N_1 - h_{12}N_2}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}} \quad (6)$$

$$\hat{x}_2 = x_2 + \frac{-h_{21}N_1 + h_{11}N_2}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}} \quad (7)$$

여기서 ZF를 통하여 추정된 \hat{x}_1, \hat{x}_2 를 이용하여 연속 간섭 제거 기법을 적용할 수 있다. 예를 들어 수신 벡터 $Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$ 에서 \hat{x}_2 성분을 제거하면 수신 벡터에 \hat{x}_1 성분만 남게 되어 보다 정확한 \hat{x}_1 를 추정할 수 있게 된다. 이를 수식을 표현하면 다음과 같다^[5-7].

$$\begin{aligned} R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_1 - h_{12}\hat{x}_2 \\ y_2 - h_{22}\hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}x_1 + n_1 \\ h_{21}x_1 + n_2 \end{bmatrix} \quad (8) \\ &= \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2. MMSE-SIC

ZF 수신기의 단점을 극복하기 위해 잡음의 전력을 최소화하는 MMSE 수신기는 ZF 수신기보다 우수한 성능을 보인다. MMSE의 복호 행렬은 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{MMSE} = \arg \min_{W_{MMSE}} E \left[\| W_{MMSE} Y - X \|_F^2 \right] \quad (9)$$

여기서 $\| \cdot \|_F$ 는 Frobenius norm을 나타낸다. 또한 직교 이론을 이용하면 식 (10)의 결과를 얻을 수 있다.

$$E[(W_{MMSE} Y - X) Y^H] = 0_{2,2} \quad (10)$$

여기서 $0_{2,2}$ 는 2x2 영 행렬을 나타낸다. 식 (10)를 이용하여 MMSE 복호행렬을 다시 나타내면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{MMSE} = \left(H^H H + \frac{1}{\alpha} I \right)^{-1} H^H \quad (11)$$

여기서 α 는 신호대 잡음비 (SNR : Signal to Noise Ratio)를 나타낸다.

MMSE 알고리즘은 SNR에 따른 복호 행렬을 사용하여 간섭을 제거하며, ZF와 다르게 잡음 성분이 증폭되는 것을 방지할 수 있다^[8-9]. 그리고 MMSE도 ZF와 같은 방법으로 연속 간섭 제거 기법을 적용할 수 있으므로 ZF보다 향상된 성능을 얻을 수 있다.

IV. 모의실험 결과

이 장에서는 모의실험을 통하여 멀티 홉 균통신 시스템에서 간섭제거 성능을 비트오류율(BER) 측면에서 나타내었다. 기존의 ZF와 MMSE 기법의 BER 성능과 SIC를 각각 적용한 경우의 BER 성능을 비교하였다. 통신 신뢰성을 위해 BPSK 변조방식을 사용하였으며, 채널 환경은 Rayleigh 페이딩 채널로 모델링하였다.

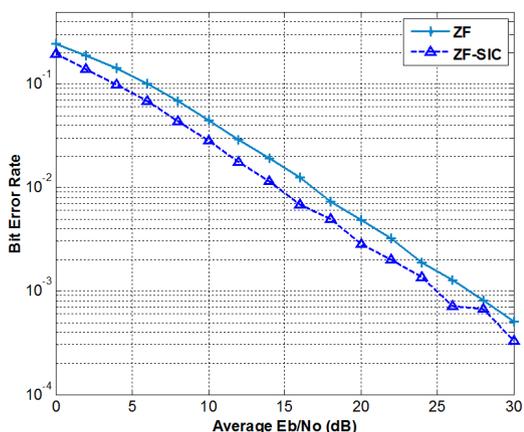


그림 3. ZF과 ZF-SIC의 BER 성능 비교
Fig. 3. BER Performance comparison between ZF and ZF-SIC

그림 3은 ZF과 ZF-SIC 알고리즘을 적용한 멀티 홉 군 통신 시스템에서 SNR에 따른 BER 성능을 나타낸다. SNR이 15dB와 25dB 지점에서 각각 0.015%와 0.009%, 0.0017%와 0.001%의 BER 성능을 보인다. 그리고 전체적인 BER에서 ZF-SIC 방식이 ZF 기법보다 약 2~3dB 정도 나은 성능을 보인다.

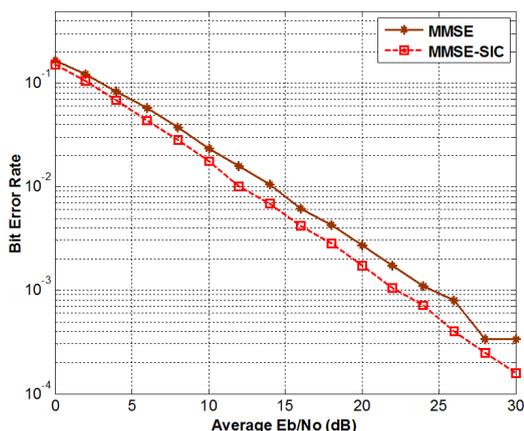


그림 4. MMSE와 MMSE-SIC의 BER 성능 비교
Fig. 4. BER Performance comparison between MMSE and MMSE-SIC

그림 4는 MMSE와 MMSE-SIC 알고리즘을 적용한 멀티 홉 군통신 시스템에서 SNR에 따른 BER 성능을 나타낸다. SNR이 15dB와 25dB 지점에서 각각 0.008%와 0.0055%, 0.0009%, 0.00055%의 BER 성능을 보인다. 그리고 전체적인 BER에서 ZF-SIC 경우와 마찬가지로

MMSE-SIC 방식이 MMSE 기법보다 약 2~3dB 정도 나은 성능을 보인다.

ZF과 MMSE 기법의 성능 차이를 알아보기 위해 그림 3과 그림 4의 결과를 그림 5에 나타내었다. 대체적으로 MMSE 기법이 ZF 기법보다 약 2~3dB 정도 향상된 BER 성능을 보여주고 있으며, 이와 비슷하게 MMSE-SIC 기법 또한 ZF-SIC 보다 약 2~3dB 나은 성능을 나타내고 있다. MMSE와 ZF-SIC는 거의 유사한 BER 성능을 나타내고 있지만, MMSE가 거의 근소한 차이로 ZF-SIC 보다 나은 성능 보임을 알 수 있다.

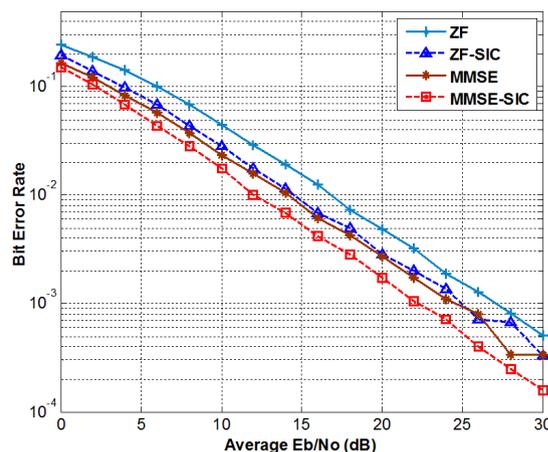


그림 5. ZF-SIC과 MMSE-SIC 성능 비교
Fig. 5. BER Performance comparison between ZF-SIC and MMSE-SIC

V. 결론

본 논문에서는 멀티 홉 시스템에서 동일 채널 간 간섭 제거 기법의 성능을 분석하였다. 간섭제거 기법으로써 ZF과 MMSE를 사용하였으며, 여기에 연속 간섭 제거 알고리즘을 적용한 ZF-SIC와 MMSE-SIC와의 간섭제거 성능을 비교 분석하였다. 모의실험 결과부터, 멀티 홉 무선 네트워크 환경에서 MMSE가 ZF보다 BER 성능을 현저하게 향상시킴을 확인하였으며, 각각 기법에 연속 간섭 제거 알고리즘을 적용한 경우, 그 성능이 더욱 좋아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 MMSE-SIC 방식은 멀티 홉 군통신 시스템에서 보다 신뢰성 있는 신호의 전송을 제공할 수 있다. 하지만 연속 간섭 제거 알고리즘에서는 오류 전파 (error propagation)가 발생하여 간섭제거 성

능을 열화시킬 수 있으므로 이를 해결하기 위한 optimal ordering SIC 또는 병렬 간섭 제거 (parallel interference cancellation)에 대한 연구가 필요하다.

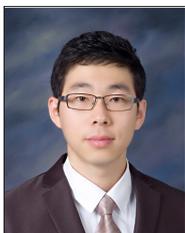
REFERENCES

- [1] Jin Yonun Kim, MIMO-OFDM System for High-Speed Wireless Communications, Gyobo Publishers, Seoul, Korea, 2008.
- [2] M. Jankiraman, Space-Time Codes and MIMO Systems, Artech House, Norwood: MA, 2004.
- [3] S. M. Alamouti, "A simple transmitter diversity scheme for wireless communications", IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [4] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks", IEEE Commun. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Oct. 2004.
- [5] H. Huh and J. Y. Kim, "Performance of a multicarrier DS/CDMA system with successive interference cancellation," European Transactions on Telecommunications, vol. 13, no. 3, pp. 237-243, May 2002.
- [6] D. Cox, "Cochannel interference considerations in frequency reuse small-coverage radio systems", IEEE Trans. Commun., vol. 36, no. 1, pp. 135-142, 1982.
- [7] Bernard Sklar, Digital Communications, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, U.S., 2001
- [8] Byeong-Gwon Kang, Ki-Kwan Han, "Performance analysis of the SFBC-OFDM system with MMSE and interference canceller", Journal of Korea Information and Communications Society 2008, Vol. 33, No. 8, pp. 291-297, Aug. 2008.
- [9] H. Jianqiang, G. Guoxiang, and W. Zhongshan, "MMSE interference suppression in MIMO frequency selective and time-varying fading channels," IEEE Trans. Signal Process., vol. 56, no. 8, pp. 3638-3651, Aug. 2008.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2010-0022629)

저자 소개

김 요 철(준회원)



- 광운대학교 전파공학과 공학사
- 광운대학교 전파공학과 석사과정
- 現) LG전자 MC사업본부 SW연구원
- <주관심분야 : 전력선 통신, 스마트 그리드, 이동무선통신, OFDM, 채널코딩>

김 진 영(정회원)



- 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 서울대학교 반도체공동연구소 특별연구원
- 미국 Princeton University, Research Associate
- SK텔레콤 중앙연구원 책임연구원
- 미국 Massachusetts Institute of Technology (MIT 공대), Visiting Scientist
- IEEE Senior Member
- 現)광운대학교 전파공학과 교수
- <주관심분야 : 전력선 통신, 스마트 그리드, 가시광 통신, UWB, LED-ID, DMB, RFID/USN 기술, 이동무선통신, 통방 융합기술, 인지 무선 통신>