

적응형 배열 안테나를 위한 감소 차수 고유 공간 빔형성 알고리즘

정회원 현 승 현*, 최 승 원*

Reduced Rank Eigen-Space Beamforming for Adaptive Array Systems

Seunghyeon Hyeon*, Seungwon Choi* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 신호의 반 파장 간격으로 안테나 소자를 배치한 빔형성 시스템에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 빔형성 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 수신 신호 공간을 스패(span)하는 고유 벡터들을 이용하여 빔형성 한다. 본 논문에서는 채널 추정을 위한 최적의 고유 공간 차수를 정하기 위한 기준도 제안한다. 제안된 알고리즘을 적용한 빔형성 시스템은 기존의 빔형성 시스템과는 달리 각 퍼짐이 증가함에 따라 다이버시티 이득을 얻어 그 성능이 개선된다. 본 논문은 제안된 알고리즘의 설명과 함께 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 제안 알고리즘의 성능 분석을 제공한다.

Key Words : Reduced Rank Model, Eigen-Space, Beamforming, Adaptive Array, Eigen Decomposition

ABSTRACT

In this paper, beamforming algorithm is proposed which can obtain diversity gain in beamforming system that deploy antenna elements with half-wavelength. The proposed algorithm provides beam-pattern using eigen-vectors that span received signal subspace. The criterion to decide optimal rank of eigen-space used for beamforming is also proposed. A beamforming system applied the proposed algorithm shows better performance with diversity gain as getting larger angle spread. This paper provides a description of proposed algorithm with analysis of the performance using various computer simulations.

1. 서 론

최근 무선 통신 시장에서 고속 데이터 서비스에 대한 사용자들의 요구도가 매우 급격히 증가하고 있다. 이러한 요구에 맞춰 차세대 이동통신 뿐만 아니라 현재 서비스 중인 WiBro나 W-CDMA에서도

다중 안테나 기술의 도입이 매우 빠르게 진행되고 있다. 다중 안테나 기술은 크게 다이버시티(diversity)와 다중 전송(multiplexing) 기법을 기반으로 한 Multi-Input Multi-Output(MIMO)^{[1]-[3]} 기술과 원하는 방향으로의 빔형성 기법을 기반으로 하는 빔형성(beamforming)^{[4]-[5]} 기술이 있다. 이들 중 먼저

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장동력핵심기술개발사업[2007-S001-01]과 정보통신부의 ITRC 프로그램의 지원을 통해 수행하였습니다.

* 한양대학교 통신 신호처리 연구실 (choi@dsplab.hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-11-518, 접수일자 : 2007년 11월 14일, 최종논문접수일자 : 2008년 4월 7일

상용화를 바라보고 있는 MIMO 기술은 공간적으로 충분히 떨어진 두 개 이상의 송신 안테나에서 송신한 신호를 공간적으로 충분히 떨어진 두 개 이상의 수신 안테나에서 수신함으로써, 각 송신신호가 겪은 독립적 페이딩 환경을 이용하여 다중 전송 혹은 다이버시티 이득을 얻는 기술이다. 그러나 MIMO 기술은 기지국의 셀 경계(cell edge)에서 다른 기지국의 간섭 신호에 취약함을 보이고 있다^[6]. 빔형성 기술은 수신신호의 상관도가 매우 높도록 반파장의 간격으로 배치된 배열 안테나 시스템에서 원하는 방향으로의 수신 혹은 송신 전력은 최대화하고 간섭 신호 방향으로의 수신 혹은 송신 전력은 최소화시키는 빔패턴(beam pattern)을 제공하는 웨이트(weight)를 계산하고 이 웨이트를 이용하여 신호를 송/수신하는 기술이다. 빔형성 기술은 간섭 신호 제거와 원하는 신호의 송/수신 전력 최대화라는 어레이 이득(array gain)을 갖지만 안테나 소자간 수신 신호의 상관도가 낮은 환경에서 즉, 신호의 각 퍼짐(angle spread)이 넓은 환경에서 성능이 저하되는 단점을 가지고 있다^[7].

본 논문에서 빔형성 시스템에서 각 퍼짐이 넓어 어레이 이득이 낮아지는 환경에서도 각 안테나 소자 간 수신신호의 낮은 상관도 즉, 독립성의 증가를 이용하여 다이버시티 이득을 얻는 고유 공간(eigen-space) 빔형성 알고리즘을 제안한다. 제안된 고유 공간 빔형성 알고리즘은 기존의 고유치 빔형성(eigen-beamforming) 기술의 진화 형태로 가장 큰 크기의 고유치에 해당하는 고유 벡터(eigen-vector)만을 웨이트로 사용하지 않고 채널 공간 차수만큼의 모든 고유 벡터를 이용하여 웨이트를 구하는 기술이다. 일반적으로 채널 공간의 고유치 크기의 분산은 각 퍼짐이 커질수록 즉, 안테나 소자 간 상관도가 낮아질수록 커진다. 다시 말해, 신호의 전력이 채널 공간 전체에 분산된다. 반면에 각 퍼짐이 작으면 고유치 크기의 분산이 작아진다. 즉 신호의 전력이 어느 한 방향으로 집중된다. 따라서 고유 공간 빔형성 기술에서는 각 퍼짐에 정도에 따라 웨이트로 사용할 고유 벡터의 개수를 판단하여야 한다. 제안된 알고리즘에서는 low-rank model^[8]을 사용하여 최적의 고유 벡터 수를 판단한다. Low-rank model은 신호 공간의 잡음(noise) 분산과 신호 전력 분산의 비를 최대화하는 신호 공간의 베이스(basis)수를 추정하는 알고리즘이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서

는 수신신호를 모델링하고, III장에서는 모델링된 수신신호를 이용하여 감소 계수 고유 공간 빔형성 알고리즘을 제안 및 설명한다. IV장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 수신신호 모델링

L 개의 안테나 소자를 갖는 빔형성 시스템에서 Q 개의 산란 컴포넌트(scattered component)를 갖는 벡터 페이딩 채널은 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\underline{h} = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{q=1}^Q \alpha_q e^{-j\pi \underline{d} \sin(\theta + \Delta\theta_q)} \quad (1)$$

여기서 α_q 와 $\Delta\theta_q$ 는 각각 복소 채널 이득과 q 번째 산란 컴포넌트의 산란각을 나타내며, θ 는 산란 컴포넌트의 평균적인 입사각(angle of arrival, AOA)과 \underline{d} 는 수신 신호의 파장(wavelength)으로 정규화된(normalized) 안테나 소자 간 간격이다.

Karhunen-Loève transformation(KLT)^[9]를 사용하여 (1)식을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\underline{h} = \sum_{l=1}^L \beta_l \underline{h}_l \quad (2)$$

여기서, \underline{h}_l 은 벡터 채널 공간의 l 번째 베이스이고, \underline{h}_l 에 해당하는 β_l 은 복소 채널 계수로 영 평균 가우시안 분포(zero-mean Gaussian distribution)을 갖는다.

수신기에서 완벽한 시간 동기를 가정하면, 수신 파일럿 신호 벡터와 데이터 신호 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\underline{y} = \underline{p} \underline{h} + \underline{n} \quad (3)$$

$$\underline{d} = \underline{s} \underline{h} + \underline{z} \quad (4)$$

여기서, \underline{p} 와 \underline{s} 는 각각 송신 파일럿 신호와 데이터 신호를 나타내며, \underline{n} 과 \underline{z} 는 각각 N_0 의 분산을 갖는 가산 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)을 나타낸다.

수신 파일럿 신호의 자기 상관 행렬은 다음과 같다^[10].

$$R_{yy} = E[\underline{y} \underline{y}^H] = \sigma_p^2 R_{hh} + N_0 I \quad (5)$$

여기서, σ_p^2 은 수신 파일롯 신호의 평균 파워이며, $E\{\cdot\}$ 는 \cdot 의 평균값을 나타내고, R_{hh} 는 벡터 채널 h 의 자기 상관 행렬을 나타내고 I 는 항등 행렬(identity matrix)를 나타낸다. 일반성을 잃지 않는 범위에서 수식 표현의 편의를 위해 $\sigma_p^2 = 1$ 로 가정하고, 식 (2)를 식 (5)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$R_{yy} = \sum_{l=1}^L \beta_l^2 \underline{h}_l \underline{h}_l^H + N_0 I \quad (6)$$

III. 감소 차수 고유 공간 빔형성 알고리즘

이 장에서는 빔형성 시스템에서 다이버시티 이득을 얻기 위해 다중 차원 빔형성 알고리즘인 감소 차수 고유 공간 빔형성(reduced rank eigen space beamforming, RRESBF) 알고리즘을 제안한다. 다중 차원 빔형성을 위해서는 수신 신호 공간의 모든 베이스스와 유효 차수(rank)를 추정해야한다. 그림 1은 제안된 RRESBF 알고리즘을 적용한 수신기의 블록 도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 제안된 알고리즘은 수신신호의 자기상관 행렬에 고유 벡터 분해법(eigen-decomposition)을 적용하여 수신신호 공간의 베이스스를 추정한다.

수신신호 자기 상관 행렬에 고유 벡터 분해법을 적용하면 다음과 같은 결과를 유도할 수 있다.

$$R_{yy} = \sum_{l=1}^L \beta_l^2 \underline{h}_l \underline{h}_l^H + N_0 I = EAE^H \quad (7)$$

여기서, E 는 R_{yy} 의 고유 벡터 행렬이며, L 개의 고유 벡터 e_l 로 이루어졌다. Λ 는 내림차순의 고유치로 이루어진 대각 행렬(diagonal matrix)이다.

식 (7)에서 알 수 있듯이 고유치는 복소 채널 계수와 잡음 분산에 의해 결정되어진다. 또, 고유 벡터는 채널 공간의 베이스스가 됨이 분명하다. 이러한 분석으로부터 채널 벡터는 고유 벡터의 선형 결

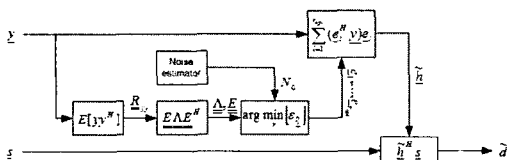


그림 1. 감소 계수 고유 공간 빔포밍 알고리즘을 적용한 수신기의 블록도

합으로 추정될 수 있음을 알 수 있다. 만일 이 선형 결합에서 어떠한 벡터가 제거된다면 추정 오차가 생기게 될 것이다. 이 추정 오차는 채널 계수의 파워, 즉, $\sum_{l=r+1}^L \beta_l^2$ 에 상응하게 된다. 결론적으로 추정 오차는 벡터 채널 추정에 사용된 고유 벡터의 개수에 반비례하여 커진다. 반면에, 고유 벡터를 선형조합에서 제거하는 것은 잡음 전력에 의한 채널 추정 오차, 즉, rN_0 을 줄일 수 있다. 즉, r 개의 고유벡터를 사용하여 채널 추정을 수행한다면, 채널 추정 오차 $\epsilon_{\hat{h}}$ 는 평균 제곱 오차(mean-square error, MSE) 관점에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{\hat{h}} = \sum_{l=r+1}^L \beta_l^2 + rN_0 \quad (8)$$

식 (8)로부터 최적 채널 추정을 위한 의미 있는 고유 공간 차수 r_{opt} 을 결정할 수 있는 기준(criterion)을 유도할 수 있다. 다시 말해, $\epsilon_{\hat{h}}$ 을 최소화할 수 있는 r_{opt} 는 다음과 같이 유도된다.

$$r_{opt} = \arg \min_r \left[\sum_{l=r+1}^L \beta_l^2 + rN_0 \right] \quad (9)$$

그림 2는 $L=4$ 이고, 신호 대 잡음 전력비가 3dB이며 10도의 각 퍼짐이 있는 환경에서 식 (9)를 이용한 채널 추정의 MSE를 나타낸다. 이 그림에서 파선(dashed line)은 선형 조합에 사용된 고유 벡터의 개수에 따른 추정 오차를 점선(dotted line)은 잡음 전력에 의한 추정 오차를 나타낸다. 동그라미와 실선으로 이루어진 커브는 MSE관점에서의 채널 추정 오차를 나타낸다. 이 예제에서 최적 고유 공간 차

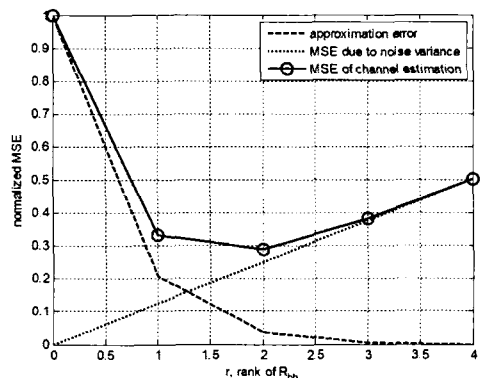


그림 2. 최적 고유 공간 차수의 추정

수는 2임을 알 수 있다.

식 (2), (3)과 (7)로부터 복소 채널 계수 β_i 의 추정은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\beta_i = e_i^H \underline{y} \quad (10)$$

R_{yy} 의 고유 벡터가 채널 공간의 베이스이므로 고유 공간에 기반한 벡터 채널 추정은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tilde{\underline{h}} = \sum_{i=1}^{r_{opt}} \tilde{\beta}_i \tilde{e}_i \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여 복조(decision)를 위한 수신 신호 $\tilde{\underline{s}}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{\underline{s}} = \tilde{\underline{h}}^H \underline{d} \quad (12)$$

IV. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 다양한 각 퍼짐환경에 따라 분석한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 식 (3)과 (4)에 따른 수신 신호를 생성하고 신호 복조에 제안된 알고리즘을 적용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 3과 같다.

그림 3은 신호 대 잡음 전력비 10dB인 페이딩 환경에서 제안된 알고리즘과 기존의 고유 벡터 빔형성 알고리즘¹¹⁾을 비교한 것이다. 그림에서 점선은 $L=1$ 인 시스템의 이론값이며, 실선은 안테나 간 수신신호의 완전 독립성이 보장된 환경에서 최대 비율 결합(maximum ratio combine, MRC) 시스템의 성능의 이론값¹²⁾이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 퍼짐이 0인 경우 제안된 알고리즘과 기존의 알고리즘은 어레이 이득만 있는 동일한 성능을 나타낸다. 그러나 각 퍼짐이 점점 커짐에 따라, 기존의 알고리즘의 성능은 저하되는 반면 제안된 알고

표 2. 컴퓨터 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
중심 주파수	2.4GHz
샘플 주기	100 μ s
단말 이동 속도	120km/h
안테나 개수	4
안테나 간격	0.5 \times wavelength
샘플 수	1.0E5
변조 방식	QPSK

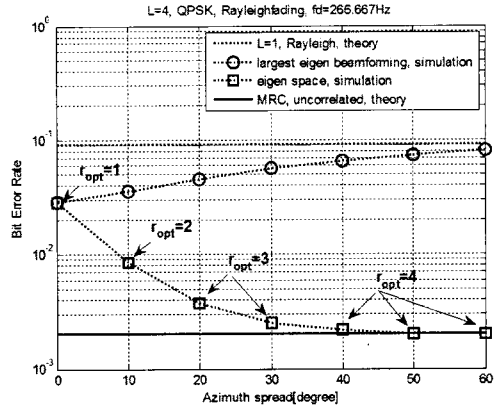


그림 3. 다양한 각 퍼짐 환경에 따른 비트 오차율 성능

리즘의 성능은 개선되어 MRC의 성능에 가까워진다. 이를 통해 빔형성 시스템에서 제안된 알고리즘을 적용하면 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림에서 MRC의 성능이 각 퍼짐에 상관없이 가장 좋은 것은 간섭 신호가 없기 때문이다. 앞에서 언급하였듯이 간섭 신호 제거 없이 다이버시티 이득을 얻는 시스템은 간섭 신호의 증가에 따라 그 성능이 심각하게 저하된다. 간섭 신호 증가에 따른 MRC 시스템과 제안된 알고리즘을 적용한 시스템의 성능은 본 논문에서 다루지는 않았다.

그림 4는 제안된 알고리즘의 성능을 페이딩 환경에서 다양한 신호 대 잡음 전력비와 각 퍼짐에 따라 분석한 결과이다. 그림에서 점선은 $L=1$ 인 시스템의 이론값이며, 실선은 안테나 간 수신신호의 완전 독립성이 보장된 환경에서 MRC 시스템의 이론값이다. 또, 파선과 점선으로 이루어진 (dahed-dotted) 커브는 각 퍼짐이 0인 환경에서의 기존 빔포밍 알고리즘 성능의 이론값이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각

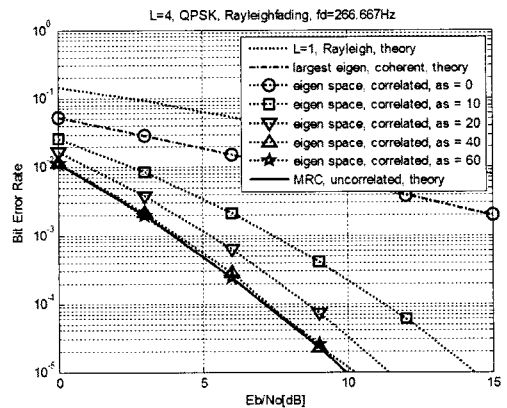


그림 4. 다양한 각 퍼짐과 신호 대 잡음 전력비에 따른 제안된 알고리즘의 비트 오차율

퍼짐이 0인 환경에서는 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능이 동일하다. 그러나 각 퍼짐이 넓어짐에 따라 제안된 알고리즘은 다이버시티 이득을 얻어 점점 개선됨을 알 수 있다. 각 퍼짐이 40도 이상인 경우 제안된 알고리즘은 MRC와 동일한 성능을 갖게 된다. 이를 통해 안테나 간격이 반파장인 빔포밍 시스템에서도 제안된 알고리즘을 적용하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있으며, 동시에 간섭 신호 제거 효과도 얻을 수 있음을 암시한다. 왜냐하면 고유 공간 빔포밍 알고리즘은 수신 신호의 자기 상관 행렬을 고유 벡터 분해하여 웨이트를 구하는 알고리즘이므로 기존의 SINR을 최대화하는 기존의 고유 벡터 기반 알고리즘^[13]을 확장하여 적용하면, 간섭 제거 효과를 얻을 수 있다. 이 연구는 본 논문의 주제를 벗어남으로 다루지 않고 차후 연구 과제로 남겨두었다.

V. 결 론

본 논문에서는 신호의 반 파장 간격으로 안테나 소자를 배치한 빔형성 시스템에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 신호의 고유 공간을 스패(span)하는 고유 벡터들을 이용하여 채널 추정 오차를 최소화하는 알고리즘이다. 제안된 알고리즘은 기존의 고유 벡터 빔형성 알고리즘과는 달리 각 퍼짐이 커짐에 따라 다이버시티 이득을 얻어 그 성능이 개선되었다. 이는 제안된 알고리즘이 간섭 신호를 제거하는 기존의 고유 벡터 빔형성 알고리즘을 응용하여 최적의 빔형성 알고리즘이 될 수 있음을 의미하며, 이는 차후 연구로 남겨두었다.

참 고 문 헌

[1] Lizhong Zheng, and David N. C. Tse, "Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.49, No.5, pp.1073~1096, May 2003.

[2] David Gesbert, Da-shan Shui, Peter J. Smith, and Ayman Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.21, No.3, pp.281~302, April 2003.

[3] Hemanth Sampath, Shilpa Talwar, Jose Tellado, Vinko Erceg and A. Paulaj, "A Fourth-Generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results," *IEEE Wireless Communications Magazine*, pp.143~149, September 2002.

[4] LAL C. Godara, "Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations," *Proceedings of IEEE*, Vol 85, No 7, pp.1031~1060, July 1997.

[5] Ayman F. Naguib, A. Paulraj, and Thomas Kailath, "Capacity Improvement with Base-Station Antenna Arrays in Cellular CDMA," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.43, No.3, pp.691~698, August 1994.

[6] Haiyu Dai, Poor, H. V. "Asymptotic spectral efficiency of multicell MIMO systems with frequency-flat fading," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.51, Issue 11, pp.2976~2988, November 2003.

[7] J. Choi and S. Choi, "Diversity Gain for CDMA Systems Equipped With Antenna Array," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.52, No.3, pp.723-725, May 2003.

[8] L. L. Scharf, *Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis*, Addison-Wiley, 1990.

[9] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 3rd ed., Prentice Hall, 1996.

[10] F. A. Dietrich and W. Utshick, "Maximum Ratio Combining of Correlated Rayleigh Fading Channels With Imperfect Channel Knowledge," *IEEE Communications Letter*, Vol.7, No.9, pp.419-421, Sep. 2003.

[11] S. Choi and D. Shim, "A Novel Adaptive Beamforming Algorithm for a Smart Antenna System in a CDMA Mobile Communication Environment," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.49, No.5, pp.1793-1806, Sep. 2000.

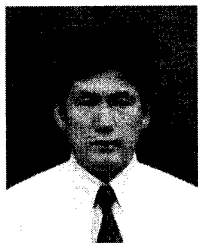
[12] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed., McGraw-Hill, 2001.

[13] S. Choi, J. Choi, H. Im, and B. Choi, "A novel

adaptive beamforming algorithm for antenna array CDMA systems with strong interferers, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.51, Issue 5, pp.808~816, September 2002.

현 승 현 (Seungheon Hyeon)

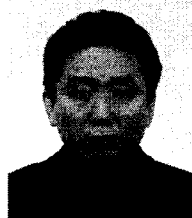
정회원



2002년 2월 한양대학교 전자통신
컴퓨터 공학부 졸업
2004년 2월 한양대학교 전자통신
컴퓨터 공학부 석사
2004년 3월~현재 한양대학교 전자
통신 컴퓨터 공학부 박사과정

최 승 원 (Seungwon Choi)

정회원



1980년 3월 한양대학교 공과대학
1982년 3월 서울대학교 공과대학
석사
1985년 12월 미국 Syracuse대 공
과대학 석사
1988년 12월 미국 Syracuse대 공
과대학 박사
1988년 8월~1989년 5월 Syracuse 대학 전기및전산과 교수
1990년 3월~1992년 2월 일본 우정성 통신연구소 선임
연구원
1989년 6월~1992년 8월 ETRI 선임연구원
1992년 9월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학부
교수(현 학부장)
2002년 7월~현재 HY-SDR 연구센터 센터장
2004년 11월~현재 SDR Forum 부회장