

AWGN환경에서 적응형 SC/MRC 다이버시티 콤바이너 성능분석

윤 덕 원*, 허 성 옥*, 김 춘 원**, 최 용 태**, 이 원 철***

Performance Analysis of Adaptive SC/MRC Diversity Combining using in AWGN

Deok-Won Yun*, Sung-Uk Huh*, Chun-Won Kim**, Yong-Tae Choi**, Won-Cheol Lee***

요 약 무선 채널의 시변 특성 및 경로손실, 지연, 도플러, 섀도잉 그리고 간섭과 같은 다양한 전파 방해요소로 인해 충분한 데이터 속도 및 요구되는 서비스 품질을 달성하기 매우 어렵다. 특히 본 논문에서 고려되는 발사체 시스템의 시험 및 평가 시 동체에 장착된 송신안테나와 추적안테나 간의 전파 경로는 발사체의 빠른 이동 및 지형, 지물로 인해 다중경로 페이딩으로 인한 간섭 발생 및 Line of sight(LOS) 전파 경로가 차단되는 경우가 발생한다. 이와 같이 무선 통신 시스템에서 발생하는 다중 경로 페이딩을 효과적으로 개선하기 위해서 다이버시티 콤바이너 기법을 필요로 한다. 본 논문에서는 다이버시티 콤바이너 기법 중 공간 다이버시티 콤바이너 기법에 대한 설계 및 개선방안을 도출하기 위하여, AWGN채널 환경에서 Maximum ratio combining(MRC), Selection combining(SC)의 BER성능과 서로 독립된 채널로부터 수신된 2개의 신호 간 SNR 비교 시 설정된 특정 임계값 기준보다 낮은 경우 MRC로 동작하고 높은 경우 SC로 동작하여 수신된 2개의 신호를 콤바이너 하는 적응형 SC/MRC 다이버시티 콤바이너에 대한 BER 성능을 비교 분석하였다.

Abstract It is very difficult to achieve sufficient data rate and required quality of service due to the time-varying nature of the radio channel and various jammers such as path loss, delay, Doppler, shadowing and interference. Especially, the propagation path between the transmitting antenna and the tracking antenna mounted on the fuselage during the test and evaluation of the projectile system considered in this paper is based on the rapid movement of the projectile, the interference due to multipath fading due to the terrain. The propagation path may be blocked. In order to effectively improve the multipath fading occurring in the wireless communication system, a diversity combiner technique is required. In this paper, to derive the design and improvement schemes for the space diversity combiner technique among the diversity combiner schemes, the BER performance of maximum ratio combining (MRC) and selection combining (SC) In an adaptive SC / MRC diversity combiner that operates with MRC when it is lower than the specified threshold criterion when comparing the SNR between two signals received from the channel and operates with SC at high and combines the two received signals The BER performance of the system was compared and analyzed.

Key Words : Diversity combining, Maximum ratio combining, Selection combining, Adaptive SC/MRC combining, Bit error rate, Telemetry

1. 서론

원격측정 링크는 발사체 시스템의 시험 및 평가의 핵심 구성 요소이며 역사적으로 원격측정 링크는 동체에 장착된 송신안테나와 추적안테나가 장착된 고정 지

상국으로 구성되어 있다. 그러나 그림 1에서 묘사된 바와 같이 발사체 기동은 빠른 속도로 이동함에 따라 필요로 하는 line of sight(LOS) 전파 경로가 차단되는 경우가 발생한다. 전통적인 해결방법으로는 그림 1(c)와 같이 동일한 신호를 방사하는 2개의 안테나를 사용

This paper was conducted as a research project of Korea Aerospace Research Institute.

*Department of Electronic Engineering, Soongsil University

**Korea Aerospace Research Institute, Naro Space Center, Flight Tracking Technology Team

***Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Soongsil University(wlee@ssu.ac.kr)

Received November 08, 2018

Revised November 14, 2018

Accepted December 12, 2018

하여 발사체의 이동 중에도 링크를 유지하게 하는 것이다. 그러나 위와 같은 구성은 두 개 안테나 모두 지상국에 대한 명확한 LOS를 가질 때 어려움이 발생한다. 안테나가 동체에 세로 및 가로로 분리되어 있는 경우, 안테나 이득 패턴의 변화는 방위각 및 양각에서 극적으로 나타나며, 단순한 선회뿐만 아니라 roll 및 loop와 같은 보다 적극적인 조종에 대한 신호의 변동은 지연, 도플러, 웨이딩 그리고 간섭과 같은 다중경로 페이딩으로 인해 발사체 시스템 시험 및 평가 중 신호 정지 등의 시스템 오류를 유발하게 된다. 이러한 문제에 대한 여러 가지 해결책으로 먼저 간단한 접근 방식으로는 두 개의 안테나에 대해 서로 다른 반송파 주파수를 사용하는 것이다. 그러나 이는 대역폭 요구 사항을 두 배로 늘리고 두 개의 지상국 안테나를 사용하도록 요구할 수 있게 된다. 또 다른 해결책은 발사체에 조종 가능한 안테나를 설치하여 지상국이 항상 메인 빔에 있도록 하는 것이다. 그러나 정교한 온보드 처리 기능 및 안테나 기술뿐만 아니라 고해상도 시간 공간 위치 및 발사체 태도 정보를 필요로 한다. 마지막으로 위와 같은 원격측정 링크에서 발생하는 다중 경로 페이딩 효과를 완화하기 위한 다이버시티 컴바이너로 알려진 가장 보편적인 메커니즘을 이용한 해결방안이다. 이는 별도의 주파수 및 정교한 안테나 기술을 요구 하지 않으며 상이한 특성을 갖는 둘 이상의 통신 채널을 사용하여 SNR를 증가시킴으로써 다중 경로 페이딩의 영향을 완화하고 상대적으로 저렴한 비용으로 무선 채널에서 원격측정 링크 성능을 향상 시키는 효율적인 기법을 사용한다. [1-6] 특히 본 논문에서 제안하는 다이버시티 기법은 모든 수신 신호를 복잡한 MRC과정을 통과하지 않고도 적응적으로 적절한 컴바이너 기법을 선택할 수 있도록 두 채널 간 특정 임계값을 기준으로 공간 다이버티 기법을 선택하여 성능을 개선하는 기법을 나타낸다. 본 논문에서는 우선 다이버시티 시스템 및 기법들에 대해 설명하며, 제안하는 컴바이너 기법에 대한 동작과정과 LabVIEW 시뮬레이션을 통해 설계된 송수신기 간 AWGN 환경에서 1~20dB까지 수신 SNR의 변화에 따른 PCM/FM 수신 시스템의 BER 성능을 비교분석 하였다.

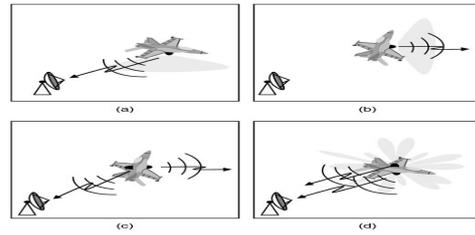


그림 1. 지대공 통신으로 인한 기본적인 문제점 설명.
Fig. 1. Illustration of the basic problem of dual-antenna air-to-ground communication.

2. 본론

2.1 Diversity 시스템 모델

여기부터 논문을 작성한다 식 (1)에서 $u(t)$ 는 unit 함수의 송신된 신호의 전력을 의미하며, h 와 n 은 채널과 잡음을 나타낸다. n 번째 단일 심볼 구간(T_s)동안의 신호 전력은 식 (2)와 같다.

$$y = hu(t) + n \tag{1}$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} |h_n(t)|^2 |u(t)|^2 dt \tag{2} \\ &= |h_n(t)|^2 \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} |u(t)|^2 dt \\ &= |h_n|^2 \end{aligned}$$

본 논문에서는 slow 페이딩을 가정하고 있으며 T_s 심볼 구간 동안 n 번째 채널을 정의하는 $|h_n(t)|$ 는 일정한 값을 갖게 되며 잡음 신호에 대한 평균을 표준편차로 정의 하였을 때 n 번째 순시 SNR에 대한 γ_n 은 잡음전력 σ^2 대비 n 번째 채널에 대한 신호 전력을 통해 다음과 같이 나타낸다.

$$\gamma_n = \frac{|h_n|^2}{\sigma^2} \tag{3}$$

순시 SNR은 채널 realization h_n 이 주어진 random variable을 의미하며, 잡음 전력을 추정하기 위한 expectation 값은 상대적으로 짧은 구간동안에 대해

고려해야 하며 레일리 페이딩 환경을 가정하는 경우, h_n 에서 위상은 0부터 2π 까지 uniform한 특성을 갖으며 $|h_n|$ 은 레일리 확률분포를 갖는다. γ_n 는 참고문헌 (3)과 같은 exponential pdf를 갖는다.

$$|h_n| = \frac{2|h_n|}{P_0} e^{-(|h_n|^2/P_0)} \quad (4)$$

$$\gamma_n \cong \frac{1}{T} e^{-\gamma_n/T} \quad (5)$$

$$\Gamma = E\{\gamma_n\} = \frac{E\{|h_n|^2\}}{\sigma^2} = \frac{P_0}{\sigma^2} \quad (6)$$

Γ 는 각 element에서 평균 SNR을 나타내며, 단일 배열로 나타내지 않는 경우 단일 요소 안테나의 SNR이기도 한다. 그러므로 Γ 는 SNR을 향상하기 위한 역할을 한다.

2.1.1 Selection 컴바이너

송신단으로부터 동일한 정보를 갖는 n 개의 전송신호들을 수신 하였을 때 수신단에서는 전송된 데이터들을 안정적으로 복구하기 위하여 이들을 효과적으로 결합 해야 한다. 본 논문에서는 각 신호에 대한 페이딩이 독립적이라고 가정하였으며 Selection 컴바이너의 경우, 가장 높은 수신전력을 갖는 안테나를 선택하며 그 외 다른 안테나로부터의 관측은 무시하게 된다. 이와 같이 최대전력을 갖는 신호에 대한 가중치는 1값을 할당하게 되고 나머지 다른 신호들에 대해서는 가중치를 0으로 할당한다.

$$w_k = \begin{cases} 1 & \gamma_k = \max_n \{\gamma_n\} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (7)$$

이와 같은 방식은 신호의 전력만을 필요로 하며 위상 또는 가변 이득에 대해서는 요구하지 않는다. 성능 분석을 위하여 본 논문에서는 probability of outage, BER, 개선된 SNR결과를 살펴보았다. probability of outage은 출력 SNR이 시스템에서 요구하는 임계값보

다 낮은 경우에 대한 확률을 의미하며, 이 표현식은 각 요소의 페이딩이 독립적이라고 가정 하는 경우에 대해서만 유효하다. γ_n 을 pdf로 사용하였을 때 outage probability는 다음과 같다.

$$P[\gamma_n < \gamma_s] = P_{out}(\gamma_s) = [1 - e^{-\gamma_s/\Gamma}]^N \quad (8)$$

식 (9)에서 outage probability는 element의 수에 따라 기하급수적으로 감소한다.

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \frac{dP_{out}(\gamma)}{d\gamma} = \frac{N}{\Gamma} e^{-\gamma/\Gamma} [1 - e^{-\gamma/\Gamma}]^{N-1} \quad (9)$$

outage SNR에 대한 pdf는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\{\gamma\} &= \int_0^{\infty} \gamma f_{\Gamma}(\gamma) d\gamma \\ &= \int_0^{\infty} \gamma \frac{N}{\Gamma} e^{-\gamma/\Gamma} [1 - e^{-\gamma/\Gamma}]^{N-1} d\gamma \\ &= \Gamma \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \end{aligned} \quad (10)$$

위와 같이 outage probability와 outage SNR의 pdf를 계산 하였으며, 이를 통해 평균 SNR와 BER를 개선됨을 다음과 같은 평균 outage SNR 수식을 통해 증명되며 $1/n$ 의 값에 따라 SNR의 향상됨을 알 수 있다.

2.1.2 Maximum ratio 컴바이너

수신신호의 출력 SNR을 최대화하기 위해선 한 개의 신호만을 선택할 수 없으며 또한 다른 신호들을 무시할 수 없다. 따라서 MRC에서는 페이딩 된 신호를 개선하기 위하여 모든 신호들에게 가중치가 있는 비트를 할당함으로써 신호들의 이득을 높이게 한 후 신호들을 결합하여 출력 신호를 얻음으로써 selection 컴바이너보다 성능 향상된 결과를 확인 할 수 있다. 하지만 반대로 구현측면에서 가중치 비트할당 과정은 복잡하고 수신기에서는 송신 신호에 대한 정확한 정보를 알고 있어야만 한다. 수신된 신호에 대한 $y(t)$ 와 $r(t)$ 는

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = h(t)u(t) + n(t) \quad (11)$$

$$r(t) = w^H y = w^H h(t)u(t) + w^H n \quad (12)$$

신호 $u(t)$ 는 unit 평균 전력을 갖기 때문에 순시 output SNR은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{|w^H h|^2}{E\{|w^H n|^2\}} \quad (13)$$

분모의 잡음 전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_n &= E\{|w^H n|^2\} = E\{|w^H n n^H w|\} \quad (14) \\ &= w^H E\{n n^H\} w = \sigma^2 w^H I_N w \\ &= \sigma^2 w^H w = \sigma^2 \|w\|^2 \end{aligned}$$

I_N 은 $N \times N$ identity matrix을 나타낸다. 식 (14)에서 가중치에 대해 1이라고 정의 하였을 때 SNR은 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma = |w^H h|^2 / \sigma^2 \quad (15)$$

cauchy-schwarz 부등식에 의해 w 가 h 에 선형적으로 비례하거나 $w=h$ 인 경우 최대값을 가지며, 출력 SNR은 각 element에서 SNR의 합을 나타낸다.

$$\gamma = \frac{|h^H h|^2}{\sigma^2 h^H h} = \frac{h^H h}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|h_n|^2}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_n \quad (16)$$

출력 SNR의 expectation 값은 각 요소에서의 평균 SNR의 n 배 즉, 평균적으로 SNR은 N 의 인자에 의해 향상된다는 것을 나타내며 이것은 selection 컴바이너 보다 우수함을 증명한다.

표 1은 각각의 다이버시티 컴바이너 기법들에 대한 회로의 복잡도와 신호 대 잡음비에 영향을 미치는 채널 개수의 영향에 대해 수식적으로 나타내었다.

표 1. 다이버시티 기법 비교

Table 1. Comparison of diversity techniques

Technique	Circuit Complexity	C/N Improvement factor
Selection Diversity	N receiver	$1+1/2+\dots+1/N$
MRC Diversity	N receiver co-phasing channel estimator	N

2.2 LabVIEW를 이용한 Diversity combiner 구현

본 논문에서 정의한 수신 시스템은 그림 3에서와 같이 1개의 송신기와 2개의 수신기로 모델링 하였으며, 2개의 채널들로부터 입력된 $y_0(t)$, $y_1(t)$ 는 페이딩 영향으로 인한 간섭과 잡음이 더해진 형태로 입력된다.[7]

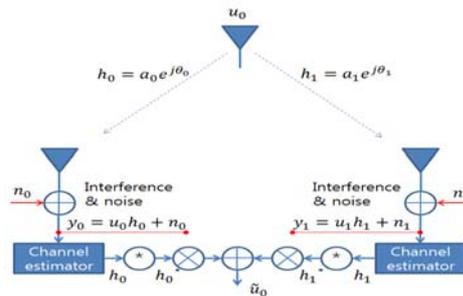


그림 2. MRC 블록다이어그램

Fig. 2. MRC Block diagram

그림 2에서 각 송수신 안테나 사이의 채널은 시간에 따라 무작위로 변하게 되며 각각 서로 독립된 2개의 채널을 통해 전송된 심볼은 랜덤하게 변하는 복소수 형태의 $h_0(t)$, $h_1(t)$ 에 의해 곱해진다. 각 채널 및 수신 안테나에서 발생하는 잡음은 가우시안 확률밀도 함수를 갖으며 서로 독립된 형태를 나타낸다. MRC의 경우 SC와 달리 각 독립된 2개의 채널에 대한 정보를 정확히 추정해야 하며 본 논문에서는 파일럿을 통해 추정된 채널 상태정보를 바탕으로 선형 보간법을 이용하여 나머지 다른 위치의 채널 상태 정보를 추정하는 LS(Least square) 채널 추정 기법을 통해 h^* 을 도출하게 된다. 그림 3은 채널 통과 후 수신 신호로부터 정확한 채널 정보를 추정하기 위하여 LabVIEW 프로그램을 통해 구현된 블록도를 나타낸다.

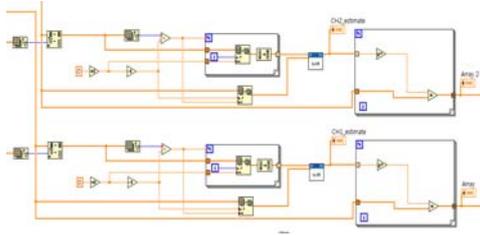


그림 3. LabVIEW를 이용한 채널추정 블록다이어그램
Fig. 3. Channel estimation block diagram using LabVIEW

그림 4는 각 채널들로부터 수신된 y_1, y_2 신호는 채널에 대응하는 추정치의 Complex conjugate에 의해 곱해지고 최종적으로 Decision variable를 제공하기 위하여 모두 더하는 과정을 나타낸다.

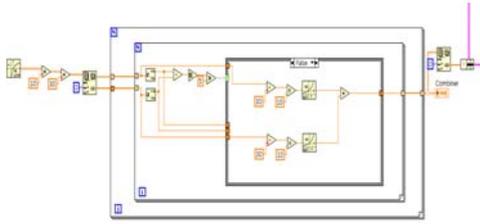


그림 4. LabVIEW를 이용한 MRC 블록다이어그램
Fig. 4. MRC block diagram using LabVIEW

그림 5는 MRC와 달리 정확한 채널의 정보를 요구하지 않으므로 채널 상태 정보를 추정하는 채널 추정 기법을 사용하지 않으며 단순히 최대전력을 갖는 수신 전력만을 선택하므로 채널들로부터 수신된 y_1, y_2 신호 단순히 선택하는 방식으로 그림 6과 같이 설계 되었다.

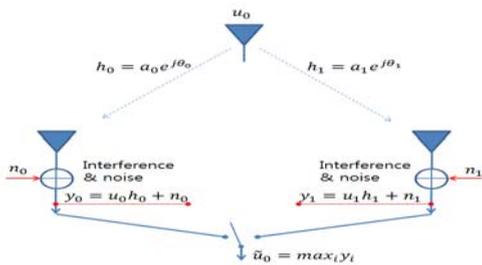


그림 5. SC 블록다이어그램
Fig. 5. SC Block diagram

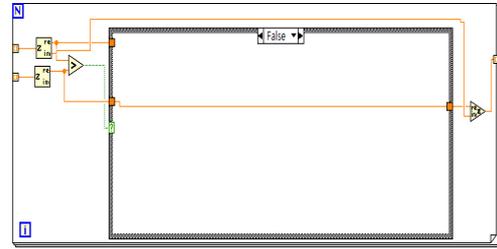


그림 6. LabVIEW를 이용한 SC 블록다이어그램
Fig. 6. SC block diagram using LabVIEW

그림 7은 독립된 2개의 채널로부터 최대 전력을 갖는 수신 신호만을 선택하는 SC 기법과 달리 두 개의 수신 신호 간 비교 시 특정 임계값 기준보다 낮은 경우 두 신호 간 차이가 없다고 판단하여 MRC 기법을 통해 성능을 개선하며, 두 신호 간 전력의 차이가 많이 발생하여 임계값 보다 높게 판단하게 되는 경우 복잡한 구조를 갖는 MRC 기법을 이용하지 않아도 간단한 SC기법을 통해 높은 수신전력을 갖는 채널을 선택할 수 있도록 적응적으로 컴바이너 기법들을 동작하는 구조를 나타낸다.

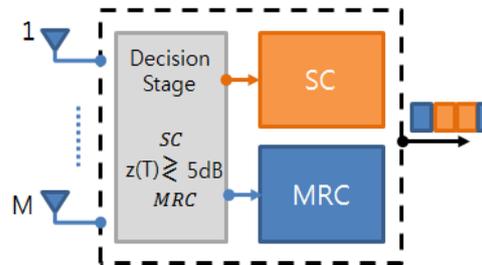


그림 7. 적응형 SC/MRC 블록다이어그램
Fig. 7. Adaptive SC/MRC block diagram

본 논문에서는 표 2에 나타낸 실험환경에서 다이버시티 영향으로 인한 수신 SNR의 변화에 따른 BER 성능곡선을 나타 내었다.[8]

표 2. Telemetry 송수신 시스템 파라미터
Table 2. Transmitter & Receiver system parameters for Telemetry

Parameters	
No. Frame	5,000
No. Bits	50
No. Frame sync(bits)	24
Bit duration	50
Sample rate	3,700bps
Modulation	CPFSK
Data	NRZ-L
Channel	AWGN
Channel estimator	Least square
Combiner	MRC, SC, Adaptive SC/MRC
Receiver	Non-coherent
SNR(dB)	1~20

그림 8은 AWGN환경에서 1~20dB까지 수신 SNR의 변화에 따른 PCM/FM 수신 시스템의 BER 성능을 나타내며, 5,000번의 이벤트 동안 랜덤하게 발생하는 50개의 데이터 비트와 고정된 24비트 Frame sync로 구성된 마이너 프레임에 대해 평균화된 BER을 나타낸다. 본 논문에서는 표준상에 정의된 PCM/FM 수신 시스템 구조와 동일하게 구성한 수신시스템으로부터의 콤바이너 기법에 따른 BER 성능과 비교 하였으며 그림에서 대각선 사선으로 나타낸 막대그래프는 SC를 나타내며, 단순한 색깔로 구분한 막대는 MRC를 정의한다. 그리고 점들로 표현한 막대는 본 논문에서 제안한 Adaptive SC/MRC를 나타낸다. 그림에 나타낸바와 같이 SC는 MRC와 Adaptive SC/MRC보다 낮은 성능을 갖으며, 1~5dB까지는 MRC와 Adaptive SC/MRC간 차이가 크게 발생되지 않으나 이후 10dB까지 수신 SNR이 증가 할수록 MRC보다 대략 0.006(1%) 개선된 BER 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

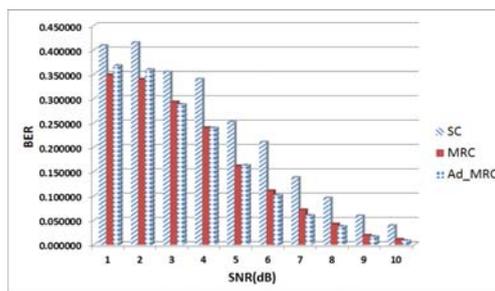


그림 8. AWGN 환경에서 MRC, SC, Adaptive SC/MRC 기능을 적용한 CPFSK BER 성능 분석
 Fig. 8. Analysis for BER performance CPFSK with MRC, SC, Adaptive SC/MRC in AWGN

3. 결론

본 논문에서는 무선 통신 시스템에서 발생하는 다중경로 페이딩 효과를 개선하기 위한 방안으로 MRC, SC 다이버시티 콤바이너 기능들에 대한 설명과 제안하는 Adaptive SC/MRC 다이버시티 콤바이너와 성능 비교를 통해 모든 수신 신호에 대해 복잡한 구조를 갖는 MRC 기법을 사용하지 않고 적응적으로 SC와 MRC를 병행하여 사용하는 경우 MRC 보다 개선된 성능 갖으며 구조적으로 간단하게 사용 가능함을 나타내었다. 이와 같은 비교분석 과정을 통해 추후 연구에서는 본 연구를 통해 설계된 시뮬레이터 기반의 SDR 플랫폼을 이용한 송수신 시스템을 구현과 실제 채널 환경에서의 수신 시스템에 대한 성능분석을 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] A. J. Michael, D. R. Michael, "Aeronautical telemetry using multiple-antenna transmitters", Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transaction on 43.1, Jan. 2007.
- [2] D. G. Brennan, "Linear Diversity Combining Techniques", PROCEEDINGS OF THE IEEE, vol.91, no.2, February 2003
- [3] L. C. Godara, "Handbook of Antennas for Wireless Communications", CRC Press, 2002
- [4] J. W. Jung, "Performance Analysis of Turbo Equalizer in the Multipath Channel", Korea Information Electronic Communication Technology, vol.5, no.3, September. 2012
- [5] K. H. Lee, "A Study on the Performance CDMA System Using Adaptive Array Antenna Beamforming Technique", Korea Information Electronic Communication Technology, vol.5, no.2, June. 2012
- [6] H. S. Lee, C. U. Baek, D. W. Do, J. W. Jung, "Performance Analysis of Multiband Transmission Technique in Underwater Acoustic Communication", Korea Information

Electronic Communication Technology, vol.11, no.3, June. 2018

[7] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", IEEE Journal on Select Area in Communications, vol. 16, no. 8, October. 1998

[8] "Telemetry Applications Handbook", Range Commanders Council Telemetry Group, May. 2006

[9] Chang-Yong Lim, Seung-Jung Shin, 'Demand survey of spectrum information and a study on plan for disclosing spectrum information to the public', The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication VOL. 17 No. 1, 2017

저자약력

윤 덕 원 (Deok-Won Yun) [정회원]



<관심분야>

- 2011년 8월 호서대학교 정보통신 공학과(공학학사)
- 2015년 2월 송실대학교 전자공학과(공학석사)
- 2015년 3월~현재: 송실대학교 전자공학과 박사과정
간섭분석, Telemetry, TV White Space

허 성 욱 (Sung-Uk Huh) [정회원]



<관심분야>

- 2013년 2월~현재 송실대학교 전자정보공학부

Telemetry, 신호처리

김 춘 원 (Chun-Won Kim) [정회원]



<관심분야>

- 2007년 2월 충북대학교 전자공학과 학사
- 2009년 2월 충북대학교 전자공학과 석사
- 2009년~2010년 국방과학연구소
- 2011년~2015년 삼성탈레스
- 2016년 1월~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원
텔레메트리(Telemetry), 원격자료수신장비, 안테나

최 용 태 (Yong-Tae Choi) [정회원]



<관심분야>

- 1992년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1994년 2월 경북대학교 전자공학과(석사)
- 2015년 2월 충남대학교 전자공학과(박사)
- 1994년 3월~2001년 8월: 데이콤 종합연구소 주임연구원
- 2001년 9월~현재: 한국항공우주연구원 책임연구원, 나로우주센터 비행안전기술실 실장

신호처리, 컴퓨터 네트워크

이 원 철 (Won-Cheol Lee) [정회원]



<관심분야>

- 1986년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학사)
- 1988년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 5월: 미국 Polytechnic Institute of New York University, Electrical Engineering(공학박사)

- 1995년 9월~현재: 송실대학교 정보통신전자공학부 교수
- 2010년 1월~현재: 한국전자파학회 CR-SDR 연구회 위원장
- 2013년 1월~현재: 미래부 TV White Space 운영작업반 위원장
- 2013년 1월~현재: 한국통신학회 상임이사
- 2014년 3월~현재: 미래부 주파수 공동사용 제도개선 연구반 위원
- 2014년 3월~현재: TTA PG901 부의장 및 WG9013 의장
Cognitive Radio, TV White Space, 주파수 공동사용, 간섭분석, FBMC