

항재밍을 위한 전술데이터링크의 고속 주파수 도약 통신 방안 연구

김재원[°], 조영일^{*}, 신경찬^{**}, 배문관^{*}, 김주연^{**}, 이정훈^{***}, 김종성^{*}

A Study on Fast Frequency Hopping Communication for Anti-Jamming in TDL System

Jaewon Kim[°], Youngil Cho^{*}, Kyungchan Shin^{**}, Moonkwan Bae^{*},
Jooyeon Kim^{**}, Jeonghoon Lee^{***}, Jongsung Kim^{*}

요 약

군용 전술데이터링크는 전술자료 전송과 보안을 보장하기 위해 항재밍 기능(고속 주파수 도약)을 보유해야 한다. 고속 주파수 도약 기반 통신은 기존 데이터통신과 달리 각 주파수에서 수신 시간이 매우 짧다는 특징을 갖는다. 이 특징은 수신 단말이 장시간 요구되는 기존의 RF(Radio Frequency) 자동이득제어(AGC : Automatic Gain Control)를 통한 동기획득을 어렵게 만든다. 이 문제 해결을 위해 본 논문에서는 RF AGC를 적용하지 않는 RF 고정 이득 적용 방안을 제안한다. 기존 기법은 강한 RF 수신 신호에 대한 고정 이득 적용 시 RF 증폭기 포화로 인한 신호 왜곡이 발생하는 것 때문에 AGC를 사용한다. 프로토타입 RF 수신부를 활용하여 모의실험을 수행하였고, RF 증폭기 포화로 신호왜곡이 있더라도 직교위상편이변조(QPSK : Quadrature Phase Shift Keying) 파형의 경우 복조 가능함을 도출하였다. 또한, 아날로그-디지털변환기(ADC : Analog to Digital Converter) 이후의 순방향 에러정정(FEC : Forward Error Correction) 입력 범위 제한을 고려하여 수신신호의 세기를 일정하게 정규화하여 FEC 입력 신호를 만드는 디지털 정규화 기술을 제안한다. 제안 설계기법들을 적용한 고속 주파수 도약 통신단말 제작 및 시험을 통해 RF 포화영역을 포함한 광범위한 수신 세기 범위에서 단말간의 동기신호 및 신호복조가 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

Key Words : Tactical datalink, Anti-jamming, Frequency hopping, AGC, RF fixed gain

ABSTRACT

Tactical datalink has to support fast frequency hopping for anti-jamming requirement due to the importance and security of tactical message. The fast frequency hopping based communication has a very short reception time at a specific frequency compared to the existing non-frequency hopping communication, so that the synchronization acquisition through the RF AGC of the receiving terminal is very limited. In this paper, we propose a synchronization technique with fixed RF gain that does not apply RF AGC. When RF AGC is not used, signal distortion due to RF amplifier saturation occurs. A simulation test was performed using the RF receiver of the prototype terminal, and it was found that even if there is signal distortion due to saturation of the RF element, demodulation is possible in the case of a QPSK waveform. In addition, considering the FEC

[°] First and Corresponding Author : Agency for defense development, arbor405@add.re.kr, 정희원

^{*} Agency for defense development, yicho@add.re.kr, mkbae@add.re.kr, jskim0407@add.re.kr

^{**} Hanwha system, kyungchan.shin@hanwha.com, jy8317.kim@hanwha.com

^{***} WWave, cruise71@wwave.com

논문번호 : KICS2017-09-264, Received September 26, 2017; Revised December 30, 2017; Accepted January 2, 2018

input range limitation after the ADC, we have devised a digital normalization technique that normalizes the received signal power to a certain constant. It is confirmed that the synchronization acquisition and signal demodulation between terminals applying the proposed design techniques are successfully performed in a wide range of received signal power including RF saturation region.

I. 서 론

전술데이터링크체계는 전술자료를 근실시간으로 공유하는 체계로서 네트워크중심전(NCW: Network Centric Warfare)의 핵심 기반통신체계 중 하나이다¹⁾. 전술자료란 상황인식·위협평가·지휘결심·교전통제 등 전술작전을 수행하기 위해 필요한 모든 자료를 포함한다. 전술데이터링크체계는 전술자료의 전송과 보안을 보장하기 위해 항재밍 성능을 보유해야 하며 선진 전술데이터링크체계인 Link-16의 경우 1초당 약 77,000회, 즉 13 μ s의 시간마다 주파수를 도약하며 통신한다²⁻⁴⁾. 국내에서 개발된 통신체계 중 위와 같이 고속 주파수도약을 수행하는 체계는 아직 없는 것으로 파악되며 지금까지의 전술데이터링크 체계 또한 주파수도약 기능을 보유하고 있지 않다. 최근 우리 군도 국내 전술데이터링크체계에 대해 Link-16과 유사한 수준의 주파수 도약 성능을 요구하고 있다. 본 논문에서는 전술데이터링크체계의 고속 주파수 도약 통신 방안을 개발함에 있어서 식별된 제한사항에 대해 알아보고, 이러한 제한사항을 극복하기 위한 고정 RF 이득 및 디지털 신호정규화 기법에 대해 기술한다.

II. 기존 비도약/저속도약 데이터링크 통신

기존의 국내에서 개발한 비도약이나 저속 도약 데이터링크 통신의 경우 RF부에서 수신신호 초기의 프리앰블(preamble) 신호 전력을 RF부 내에 있는 AGC 제어부를 통해 측정하고 이 값에 따라 가변감쇄기를 제어하여 전력을 일정하게 조정하였다. RF AGC를 통해 preamble 이후 메시지는 일정한 전력으로 수신 및 복조가 가능하다. 이와 같은 기존의 RF부 및 수신

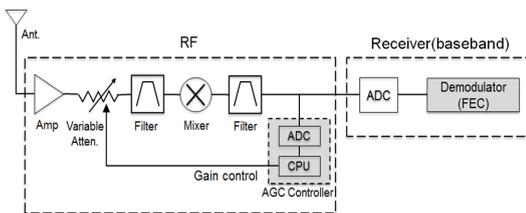


그림 1. 기존 데이터링크 단말의 개념도
Fig. 1. Diagram of previous terminal for datalink

기의 구조를 그림 1에 나타내었다.

이러한 RF부의 AGC는 수신신호의 경로상에 존재하는 필터의 물리적인 지연시간과 수신신호 전력 측정 및 제어를 위해 수 μ s의 시간이 필요하다. 수신신호 전력을 신뢰성 있는 범위내로 제어하기 위해서는 최소 2~3회의 AGC가 수행되어야 하므로 최소 12 μ s 이상의 시간이 소요된다. 기존의 비도약 또는 저속도약의 경우 12 μ s 정도의 시간을 AGC에 할당하는 것이 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 1초당 수 만회 수준의 고속 주파수 도약 통신 시스템에서는 1개의 주파수에서 송신하는 신호의 시간이 수십 μ s로 매우 짧아 RF부 AGC를 통한 수신신호의 전력 조절이 어렵다. 예를 들어 Link-16과 같이 13 μ s 마다 주파수를 변경하는 경우 AGC에 거의 모든 시간이 소모되므로 실제 필요한 동기신호를 획득하기는 매우 어렵다.

III. 고정 RF 이득 기법

고속 주파수도약 통신에서는 기존의 RF부에서 수행하던 AGC를 이용하여 수신신호 세기를 정규화하고 동기신호를 복조하기가 어렵다. 따라서, RF부의 AGC를 수행하지 않고 고정 RF 이득 상태에서 통신이 가능한 방법을 고안하였다.

RF부에서 AGC를 수행하지 않고 고정 이득을 사용할 경우 수신신호의 전력 범위가 매우 크면 RF 증폭기의 포화로 신호 왜곡이 발생하는 문제점이 있다. 전술데이터링크는 보통 각 통신단말이 동일한 전력으로 신호를 송신하지만, 송/수신 단말간의 거리가 최소 수백 m에서 최대 수백 km 범위이므로 단말들의 위치에 따라 수신단말이 수신하는 신호의 전력 범위가 매우 넓다. 또한 타임슬롯당 1개의 단말이 송신을 수행하고 나머지 단말은 수신하는 시분할다중접속방식(TDMA : Time Division Multiple Access)을 사용하므로 1개의 타임슬롯 시간인 7.8125ms의 짧은 시간 단위마다 송신하는 단말이 바뀔 수 있으며 송신하는 단말과의 거리변화에 따라 수신신호의 전력이 급격하게 바뀌게 된다. 수신신호의 전력을 조정하지 않아 신호의 전력 범위가 너무 크면 RF부의 증폭기의 포화로 신호 왜곡이 발생하고 복조 성능이 저하된다. RF 증

폭기의 포화영역에서 통신시스템을 운영하는 것은 일반적이지 않아 시도한다는 생각 그 자체가 어려웠으나, RF 증폭기 포화영역에서의 전술데이터링크 통신 가능성에 대해 모의실험을 수행하였다. 전술데이터링크에서 송신단말의 송신전력은 보통 일정하기 때문에, 송/수신 단말간의 거리가 매우 가까워 송신신호가 전파경로손실에 의한 감쇄가 크지 않고 강한 신호세기로 수신될 때만 수신단말의 RF 증폭기가 포화된다. 잡음은 송/수신 단말간의 거리에 관계가 없기 때문에, 이 경우 신호 대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)가 매우 좋아 신호가 RF 증폭기에 의해 왜곡이 되더라도 복조가 가능할 수도 있을 것이라 기대하였다.

포화로 인한 신호 왜곡에 따른 수신신호의 복조 가능성과 적합한 변/복조 과정을 도출하기 위해 최종 단말 이전에 제작한 프로토타입 단말을 활용하여 모의 실험을 진행하였다. 항재밍을 위한 전술데이터링크 시스템은 1초에 수 만회의 고속 주파수 도약을 수행하는 동시에 100MHz 이상의 광대역 주파수 범위에서 주파수 도약을 수행함으로써 재밍에 대한 대항 능력을 극대화한다. 하지만, 주파수 자원의 고갈 및 중요성으로 인해 광대역의 전용 주파수 자원 획득은 매우 어려워 기존의 체계와 주파수를 공유해서 통신하는 방향으로 개발이 이루어졌다. 기존 체계와의 주파수 간섭 및 공유 가능성을 입증하는 것이 본 시스템 개발 초기 매우 급하고 중요한 사항으로 주파수 간섭 및 공유 가능성 시험을 위한 프로토타입을 제작하였다.

프로토타입의 RF 수신부에 신호발생기로 수신감도부터 포화세기까지 신호세기를 조절하며 변조된 신호를 인가하고 프로토타입의 RF 수신부를 통과한 IF 대역 신호를 벡터신호분석기(VSA : Vector Signal Analyzer)로 복조하였다. 이렇게 복조된 신호의 오류 벡터크기(EVM : Error Vector Magnitude) 측정을 통

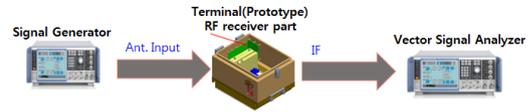


그림 2. RF 포화에 의한 신호왜곡 영향을 알아보기 위한 모의실험 구성도

Fig. 2. Simulation structure for the effect of signal distortion by RF Amp saturation

해 신호 왜곡에 따른 복조 가능성을 살펴보았으며 적합한 변조 방식을 도출하였다. 모의실험에 사용된 구성도를 그림 2에 나타내었다.

변/복조에 사용한 과정은 신호발생기 및 VSA에서 지원하는 QPSK 및 16-직교진폭변조(QAM : Quadrature Amplitude Modulation)이다. 그림 3은 QPSK일 때 측정된 VSA 결과로서, 그림 3(a)와 그림 3(b)는 각각 최소의 EVM 값을 가지는 비포화영역과 최대의 입력신호세기 포화영역에서의 결과이다. 그림 3(a)의 비포화영역 주파수 스펙트럼을 보면 신호주파수 성분이 잘 수신되는 것을 확인할 수 있으며, 이 때의 EVM 값도 1.37%로 매우 좋은 것을 알 수 있다^[5]. 또한, 그림 3(b)의 포화영역의 주파수 스펙트럼을 보면, RF 증폭기 포화에 의한 왜곡으로 주변 주파수 성분이 증가했으나 신호주파수 성분이 식별되는 것을 확인할 수 있다. QPSK의 경우 10^{-6} 비트오류률(BER : Bit Error Rate) 기준의 EVM 값이 문헌상 약 20% 정도인 반면, 포화영역에서 측정된 EVM 값은 13.45%로서 복조가 충분히 가능할 것으로 예측되었다^[5].

16-QAM인 경우는 앞서 제시한 QPSK와 동일한 포화영역에서의 EVM 값이 22.48%로서 복조 성능이 매우 저하됨을 알 수 있었다. 기존에 알려진 QPSK 및 16-QAM에 대한 EVM 대비 BER 그래프를 그림 4에 첨부하였다^[5].

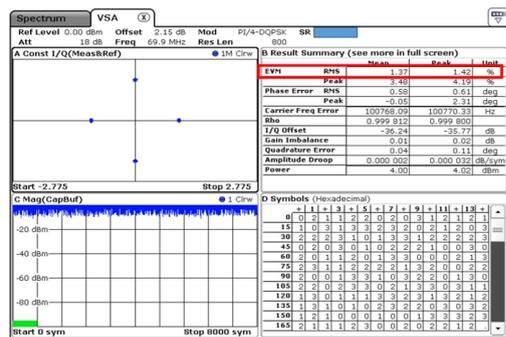
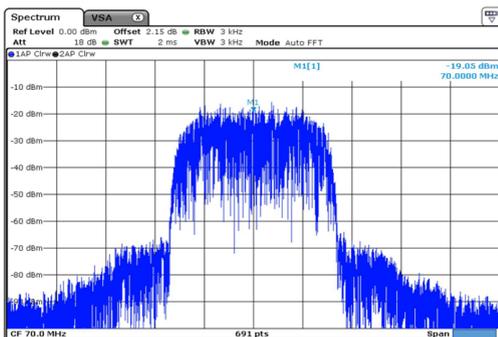


그림 3 (a). 비포화 영역에서의 VSA 측정 결과
Fig. 3 (a). VSA results for non-saturation region

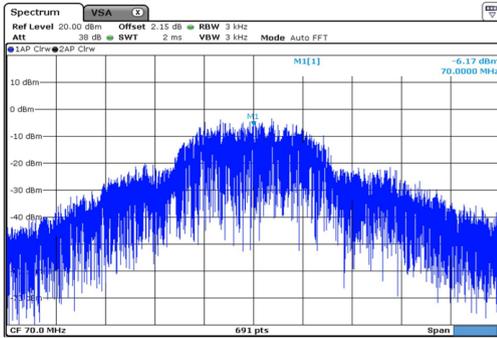
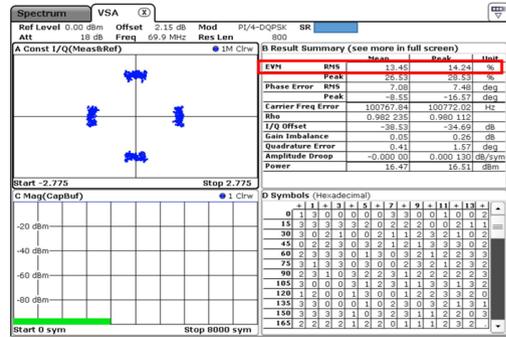


그림 3 (b). 포화 영역에서의 VSA 측정 결과
Fig. 3 (b). VSA results for saturation region



모의실험 결과 QPSK의 경우 RF 증폭기에 의한 신호 왜곡이 발생하더라도 복조가 가능할 것으로 판단되었다. 또한, 전술데이터링크는 그 전송정보의 중요성으로 인해 전송속도를 감소시키더라도 강력한 FEC 코드를 사용하므로 실제 시스템에서는 모의실험 결과보다 더 좋은 복조 성능을 보일 수 있다. 본 개발 단말에서는 FEC로서 컨볼루션터보코드(CTC : Convolution Turbo Code)를 사용하였으며 동일 데이터를 각각 다른 주파수에서 수차례 반복전송함으로써 항재밍 및 복조 성능을 향상시켰다.

것이다. QPSK 변조 방식을 사용하여 포화에 의한 영향을 최소화하더라도 RF부에서 AGC를 사용하지 않아 신호 전력을 조정하지 않은 경우, ADC 이후 복조 과정에서 신호세기가 FEC의 입력 범위를 벗어나 복조가 불가능한 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 ADC 이후 디지털 신호세기 정규화 기술을 도입했으며 이에 대한 전체 시스템 구성도를 그림 5에 나타내었다. 기존의 구성도인 그림 1과 비교했을 때 RF부의 AGC 제어부가 제거되어 RF부의 부피, 가격, 복잡성 측면의 장점이 있다. 또한, 수신기의 ADC 이후에 디지털 신호세기를 정규화하는 부분을 추가하여 수신신호의 세기를 동일하게 조정함으로써 FEC 입력 범위를 벗어나지 않도록 하였다.

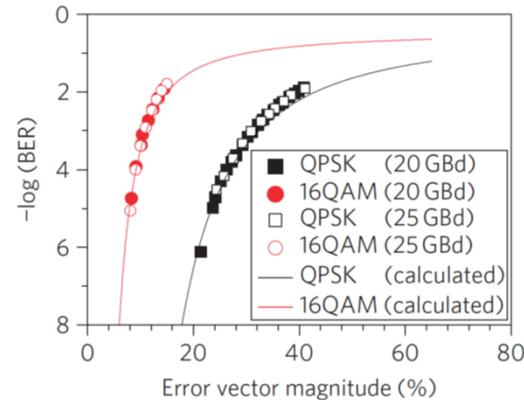


그림 4. QPSK 및 16-QAM 에 대한 BER vs EVR 그래프
Fig. 4. BER depending on EVM for QPSK and 16-QAM

IV. 디지털 신호세기 정규화 기법

RF 포화에 의한 신호 왜곡 영향 이외에 RF 고정 이득 사용에 의한 또 다른 문제는, 통신시스템에서 수신기의 복조성능을 향상시키기 위해 FEC를 사용하는 것이 필수적인데 FEC의 입력 범위가 제한적이라는

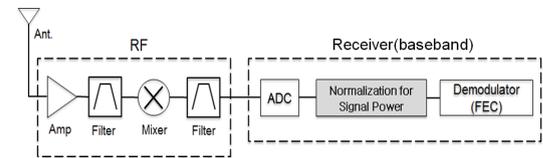


그림 5. 고속 주파수 도약을 위한 전술데이터링크 단말 개념도
Fig. 5. Diagram of terminal for fast frequency hopping datalink

디지털 신호세기 정규화에 대한 보다 자세한 설명은 다음과 같다. 전술데이터링크는 12초를 1536개의 타임슬롯으로 나누고 타임슬롯별로 송신 단말이 변경된다. 1개의 타임슬롯 시간 동안에는 송신단말이 변하지 않으며, 송/수신 단말이 이동하더라도 타임슬롯의 시간이 7.8125ms로 매우 짧아 단말간의 거리가 거의 일정하므로 수신되는 신호 전력이 유지된다는 점을 이용하여 정규화를 수행한다. 1개의 타임슬롯 내에서 송/수신하는 메시지 구조는 그림 6과 같으며, 동기

(Synchronization), TR(Time Refine), 헤더(Header), 전술메시지(information), 전파지연시간(Propagation delay) 순서로 송/수신한다.

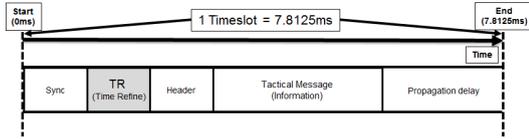


그림 6. 한 타임슬롯 내의 송신 메시지 구조
Fig. 6. Message structure in 1 time slot

처음의 동기 메시지로 송/수신 단말간의 대략적인 동기가 맞춰진 후 TR 신호를 통해 세부적인 동기 조율이 이루어지는데 이 TR 신호의 전력을 ADC 이후의 디지털단에서 측정한다. 수신 단말에서는 TR 신호의 ADC 이후에 수신되는 신호세기를 1펄스 단위로 측정하여 저장한다. 이때 측정된 신호세기로 이후 수신되는 헤더 및 전술메시지의 ADC 이후 신호세기를 나누어 주면 단말간의 거리에 따른 수신신호 전력의 크고 작음에 관계없이 그 값은 약 1이 된다. 즉 수신 신호의 전력에 관계없이 항상 일정한 값을 가지게 되므로 디지털 신호세기 정규화 이후에는 모든 신호에 동일한 가중치를 가해서 FEC 입력으로 넣어주면 된다.

또한 TR 신호의 세기를 측정하는 방법에 대해 제안하고자 한다. 점차 주파수 자원이 고갈됨에 따라 여러 체계가 주파수를 공유해서 사용하기를 원하고 있으며 이러한 환경에서 다른 체계의 신호(특히 레이더 같은 아주 큰 전력의 신호)나 강력한 적의 재밍신호가 수신될 수 있다. TR 신호의 전력 측정 시점에 이러한 다른 체계나 재밍의 강한 신호가 수신되어 이를 기준으로 신호세기 정규화를 수행할시 큰 오류가 발생할 수 있다. 현재 개발되는 전술데이터링크체계의 TR 신호는 총 15개의 펄스로 이루어져 있는데 15개 펄스 각각의 펄스당 신호 전력을 측정하여 15개의 펄스 신호 전력 중 중간값을 이용하여 신호세기 정규화를 수행한다. 15개 펄스 신호 전력의 평균으로 정규화를 할 경우 레이더나 재밍 같은 아주 큰 전력의 신호가 있으면 평균을 끌어올려 비정상적인 데이터가 측정될 수 있다.

위와 같은 설계로 고속 주파수도약 통신을 위한 단말을 제작하고 실제 시험을 수행하였으며, 수백m에서 수백km의 거리에 해당하는 광범위한 전력의 신호가 정상적으로 송/수신됨을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 전술데이터링크체계의 항재밍을 위한 고속 주파수 도약 통신 방안을 기술하였다. 기존의 주파수 무도약 또는 저속 도약 통신과는 달리 고속 주파수 도약에서는 RF AGC를 기존대로 적용시 단말간의 동기 획득이 매우 어렵다. RF AGC를 사용하지 않을 경우에는 RF 증폭기의 포화로 인한 신호 왜곡이 발생하여 복조 성능이 저하되고 이후 FEC의 입력범위 제한으로 복조가 불가능하게 된다. 프로토타입 RF 수신부를 활용한 모의실험을 통해 QPSK 파형의 경우 RF 포화영역에서도 신호가 복조될 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한, 단일 타임슬롯에서 전술메시지 이전에 송신되는 TR 신호의 전력을 측정하고 이들 전력의 중간값으로 이후 헤더 및 전술메시지 신호 세기를 정규화 함으로써 FEC 입력 범위를 벗어나지 않도록 하였다. 실제 단말을 제작하여 단말간의 통신시험을 수행한 결과, RF 고정 이득 및 디지털 신호정규화 기법 적용시 광범위한 수신 신호 세기에 대해서 고속 주파수 도약 통신이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

References

- [1] J. W. Kim, et al., "Two - channel modem design methods for improving the tactical datalink message reception," in *Proc. KIMST Conf. 2015*, pp. 815-816, Daejeon, Korea, Nov. 2015.
- [2] J. Yu, et al., "Group frequency hopping scheme for improving multi-net performance of link-16 waveform with limited frequency band," *J. KICS*, vol. 41, no. 1, pp. 110-121, Jan. 2015.
- [3] S. H. Choe, et al., "Tactical data link with cognitive anti-jamming capability and its simulator," in *Proc. SPECTS Conf. 2014*, pp. 607-611, Monterey, USA, Jul. 2014.
- [4] *Understanding voice and Datalink Networking*, 1st revision, Northrop Grumman Corporation, 2014.
- [5] D. Hillerkuss, et al., "26 Tbit s-1 line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing," *Nature Photon*, vol. 5, no. 6, pp. 364-371, Jun. 2011.

김 재 원 (Jaewon Kim)



2003년 2월 : 연세대학교 전기전
자공학과 학사
2005년 2월 : 연세대학교 전기전
자공학과 석사
2005년 2월~현재 : 국방과학연
구소 선임연구원
<관심분야> 전술데이터링크, 이
동통신

김 주 연 (Jooyeon Kim)



1999년 2월 한국해양대학교 전
파공학과 학사
2001년 2월 한국해양대학교 전
파공학과 석사
2008년 3월~현재 한화시스템
위성데이터링크팀 전문연구
원
<관심분야> 데이터링크, 이동통신

조 영 일 (Youngil Cho)



1999년 2월 : 아주대학교 전자
공학 학사
1999년~2008년 : LG전자 MC
연구원
2008년~2012년 : Texas Instru-
ments Korea
2015년 2월 : 한밭대학교 정보
통신 전파공학 석사

2012년~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> 국방전술이동통신, 전술데이터링크, 신
호처리 및 디지털 전치왜곡

이 정 훈 (Jeonghoon Lee)



1999년 2월 : 한국해양대학교 전
파공학과 학사
2002년 11월~현재 : (주)더블웨
이브 연구소 수석연구원
<관심분야> 초고속 주파수합성
기, 초고주파 시스템

신 경 찬 (Kyungchan Shin)



2006년 2월 : 성균관대학교 전
자전기공학과 학사
2008년 2월 : 성균관대학교 전
자전기컴퓨터공학과 석사
2008년 3월~현재 : 한화시스템
통신연구소 전문연구원
<관심분야> 항재밍통신, 이동통
신, 동기 및 채널추정 기술

김 종 성 (Jongsung Kim)



1984년 : 숭실대학교 전자계산
학과 학사
1986년 : 숭실대학교 전자계산
학과 석사
1997년 : 포항공과대학교 컴퓨
터공학과 박사
1986년~현재 : 국방과학연구소
수석연구원

<관심분야> 전술데이터링크, 통신시스템, 컴퓨터네
트워크

배 문 관 (Moonkwan Bae)



1990년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 학사
1992년 2월 : 경북대학교 대학
원 전자공학(정보통신전공) 석사
1993년 2월~현재 : 국방과학연
구소 선임연구원
<관심분야> 전술데이터링크, 통
신시스템