

OFDM 시스템에서 PAPR의 감소를 위한 사전-스크램블링 기법의 성능분석

정회원 최광돈*, 김시철**, 정회원 박상규***

Performance Analysis of a Pre-Scrambling Scheme for Reducing the PAPR in OFDM Systems

Kwang-Don Choe* *Regular Member*, Si-Chul Kim**, Sang-Kyu Park*** *Regular Member*

요 약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 주파수 이용 효율을 높이고 고속의 데이터 전송이 가능하며 주파수 선택적 페이딩에 강한 전송 방식이지만, 다수 반송파(sub-carrier)들의 중첩현상으로 인해 전송 신호의 PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 크다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 PAPR의 감소와 PAPR의 연산량 감소를 위해, PAPR값 분석을 통하여 상관기를 도입하는 사전-스크램블링 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안한 기법과 기존의 PTS(Partial Transmit Sequence) 기법의 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)값을 비교하여 복잡도를 크게 줄이면서도 PAPR을 낮출 수 있음을 보여준다.

Keyword : OFDM, PAPR reduction, pre-scrambling

ABSTRACT

OFDM is a very attractive technique for achieving high-bit-rate data transmission and high spectrum efficiency. However, one of disadvantages of OFDM signal is the high PAPR characteristic when multi-carriers are added up coherently. In this paper, we propose a pre-scrambling scheme using correlator for PAPR reduction and reducing the amount of PAPR calculations. The simulation results show that this scheme has less computational complexity and reasonable PAPR reduction capability compared to PTS technique.

I. 서론

차세대 이동통신 환경에서의 신호변조 방식은 한정되어 있는 무선채널의 전력과 주파수 대역을 가능한 한 효율적으로 사용하여야 하며, 요구되는 BER 성능에 대하여 최대의 효율을 보일 수 있는 특성을 가져야 한다. 이러한 조건을 만족시키며 고속의 데이터 전송에 적합한 방식으로 OFDM에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다[1].

OFDM은 차세대 광대역 무선 통신 서비스를 위한 높은 신뢰성과 큰 용량을 가지는 디지털 통신방

식으로, 단일 반송파를 사용하는 시스템에 비해 다중경로 페이딩에 대해 강한 특성을 보인다[2]. 뿐만 아니라 송수신단에서 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)와 FFT 알고리즘을 이용하여 고속으로 간단하게 시스템을 구현할 수 있다[1][2].

그러나 대부분의 무선 시스템은 충분한 송신 전력을 얻기 위해, TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier)와 같은 비선형 증폭기를 사용하는데, OFDM 시스템과 같이 다중 반송파를 사용하는 경우 각각의 반송파들의 신호들의 중첩으로 인하여 PAPR 값이 커질 수 있게 된다. 전송신호에 큰

* 안양과학대 전자통신전자학부(kdc5590@ianyang.ac.kr) ** AMtel (saint73@amtel.co.kr)

*** 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(skpark@hanyang.ac.kr)

논문번호 : 030509-1118 접수일자 : 2003년 11월 8일

PAPR이 발생하는 경우 증폭기는 포화영역에서 동작하게 되어 통신채널에 비선형 왜곡(nonlinear distortion)을 일으킨다. 즉 ADC(Analog to Digital Converter)와 DAC(Digital to Analog Converter)의 복잡성을 증가시키고, RF 전력 증폭기의 효율을 감소시키는 등 OFDM 시스템의 성능에 큰 문제점이 되고 있다.

따라서 OFDM 신호의 큰 PAPR을 감소시키기 위해 신호왜곡 기법(signal distortion technique), 부호화 기법(coding technique) 그리고 스크램블링 기법(scrambling technique) 등 많은 기법들이 연구되어 오고 있다[2].

스크램블링 기법은 기본적으로 서로 다른 여러 개의 스크램블링 시퀀스로 각 OFDM 심볼을 스크램블링하고 그 결과 중에서 가장 작은 PAPR을 갖는 시퀀스를 선택하는 방식으로, 선택적 매핑(SLM: Selected Mapping)기법과 부분 전송 시퀀스(PTS: Partial Transmit Sequence)기법이 있다. SLM 기법은 스크램블링을 모든 부반송파에 적용하여 위상을 독립적으로 회전시키는 반면, PTS 기법은 스크램블링을 부반송파 그룹별로 적용하여 위상을 회전시키는 것에 그 차이점이 있다.

SLM과 PTS 기법 모두 훌륭한 PAPR 저감 효과가 있지만, 많은 수의 IFFT를 요구함으로써 연산량이 증가하는 문제점이 있다. 따라서 여기에 적응적 개념을 도입하면 PAPR의 연산량을 줄이면서 PAPR 값도 줄일 수 있다[3]. 그러나 기존의 PTS 기법은 부블록의 수에 따라 지수함수적으로 증가하는 PAPR의 연산량은 여전히 문제가 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 논문에서는, 상관기를 도입하여 PAPR값을 예측하고, 사전에 스크램블링을 사용하는 방식을 제안하여 기존의 방식에서 PAPR 연산량이 증가하는 문제점을 해결하고 차세대 이동통신에서 요구되는 고속의 데이터 처리가 가능한 PAPR 감소 기법을 제안한다. 모의실험 결과, 제안한 사전 스크램블링 기법은 기존의 PTS 기법과, 랜덤 데이터일 경우 비슷한 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function)값을 가지며, PAPR값이 높은 데이터일 경우 성능이 우수함을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 PTS를 이용한 PAPR의 감소 기법에 대해 살펴보고, III장에서 상관기를 이용한 사전-스크램블링 기법을 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통해 성능을 분석하며 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. PTS를 이용한 PAPR 감소 기법

PTS 기법은 입력 데이터 블록을 여러개의 부블록(sub-block) 또는 클러스터(cluster)로 나누고, PAPR을 감소시키기 위해 각 부블록에 적절한 가중요소(weighting factor)를 곱해준다. 입력의 데이터 블록을 $\{X_n, n = 0, 1, \dots, N-1\}$ 라 할 때, 이것의 벡터 표현은 $\mathbb{X} = [X_0 X_1 \dots X_{N-1}]^T$ 이다. \mathbb{X} 를 M 개의 부블록으로 나누었을 때, 각 부블록을 \mathbb{X}_m 이라 하면 \mathbb{X} 는 다음과 같다.

$$\mathbb{X} = \sum_{m=1}^M \mathbb{X}_m \quad (1)$$

여기서 M 개의 부블록은 서로 크기가 같고, 부블록 분배방법은 인접분배 방법이라 가정한다[4]. PTS 기법의 목적은 M 개의 부블록에 가중요소를 적절하게 곱하여 PAPR을 감소하는 것이며, 가중요소를 곱한 부블록은 다음과 같다.

$$\mathbb{X}' = \sum_{m=1}^M b_m \mathbb{X}_m \quad (2)$$

여기서 $\{b_m, m = 1, 2, \dots, M\}$ 은 M 개의 각 부블록에 곱해지는 가중요소로 각 부블록의 위상을 조절하여 PAPR 값을 줄이는 역할을 한다. 이 값은 크기가 1인 복소수 값으로써 시스템의 복잡도를 간단히 하기 위해 일반적으로 1 또는 -1의 binary 값(즉 부블록의 위상조절은 0 또는 180)을 사용한다. 또 M 개의 부블록에서 첫 번째 부블록은 제외하고 나머지 $M-1$ 개의 부블록에만 가중요소를 적용한다. 따라서 M 개의 부블록에 대해 ± 1 의 가중요소를 사용할 경우 위상조절이 가능한 경우는 총 2^{M-1} 가지가 된다 [5][6]. 식 (2)를 시간 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$x' = \sum_{m=1}^M b_m x_m \quad (3)$$

여기서 벡터 x_m 은 부분 전송 시퀀스(partial transmit sequence)이며 \mathbb{X}_m 의 IFFT이다. 위상 조절을 하기위한 가중요소 b_m 은 x' 의 PAPR 값이 최소가 되는 조합을 선택해야 한다.

그림 1은 PTS 기법의 송신기에 대한 구성도이다. 입력 데이터를 QPSK 매핑하고 직-병렬 변환한 후

M개의 부분블록으로 나눈다. 이때 N개의 부분송파를 M개의 부분블록으로 나누면 각 부분블록에는 $N/M=k$ 개의 부분송파가 할당된다. 그리고 각각의 부분블록을 N-IFFT를 수행한 후 각 부분블록에 PAPR 값이 최소가 되는 가중요소 $\{b_m, m=1, 2, \dots, M\}$ 를 곱해서 병직렬 변환 후 전송한다. 이 때, 곱해진 가중요소 값은 수신단에도 알려주어야 복조가 가능하므로 이 가중요소 대한 부가정보(side information)를 수신단에 함께 전송해 주어야 한다. 부가정보 삽입에 대한 연구는 L. J. Cimini와 N. R. Sollenberger에 의해 제안되었다[7].

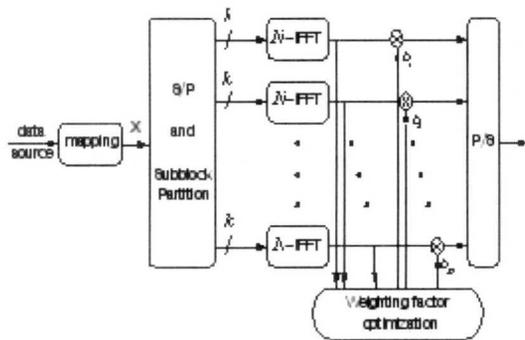


그림 1. PTS 기법의 구성도

III. 상관기를 가지는 사전-스크램블링 기법

기존의 PTS 기법은 모든 경우의 PAPR을 측정하기 때문에 최저의 PAPR 값을 갖지만 부분블록 수가 증가할수록 지수 함수적으로 많은 PAPR의 연산을 수행해야 한다는 문제점이 있다. 따라서 PAPR 값을 미리 예측하여 IFFT전에 위상을 변화 시켜준다면 연산과 복잡도를 줄일 수 있다.

3.1 PAPR값 분석

데이터의 형태에 따라 다양한 PAPR값이 존재하는데 이를 분류하면, 최상위, 상위, 그 외의 세가지로 분류할 수 있다. 예를 들어 4-IFFT를 사용할 때 최상위의 데이터 형태는 1 1 1 1, 1 -1 1 -1, -1 1 -1 1, -1 -1 -1 -1의 4가지 형태를 가지며, 상위에 위치한 형태는 1 1 -1 -1, -1 1 1 -1, -1 -1 1 1, 1 -1 -1 1의 4가지 형태를 가진다. 이는 8, 16-IFFT 일때도 길이만 늘어나며 같은 형태를 가진다. 단

16-IFFT일때는 그림 2와 같이 최상위와 1비트 또는 2비트가 다른 데이터가 상위에 위치한다.

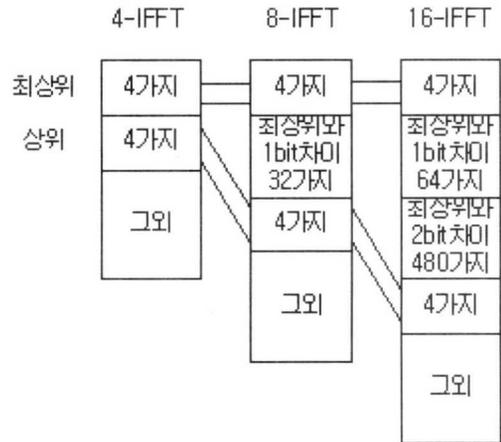


그림 2. 부분송파 개수에 따른 PAPR 존재 형태

이를 통하여 16-IFFT일 때 PAPR값을 알아보면 첫째 최상위 4가지, 둘째 최상위와 1비트 차이 나는 데이터 $16 \times 4 = 64$ 가지, 셋째 최상위와 2비트 차이 나는 데이터 $\binom{16}{2} \times 4 = 480$ 가지가 존재하며, 넷째 상위에 4가지가 존재한다. 이 PAPR값이 가장 큰 (worst case) 네 가지 부류에 데이터 최적의 반전위치를 찾을 때 여러 가지 경우가 존재하지만 부가정보(side information)의 수를 1비트로 만들기 위하여 반전시킬 수 있는 조건을 반전과 비반전(즉, 0° 와 180°)으로만 결정하고 데이터를 두 가지 부류로 나누어 반전시킬 것인지 아니면 그냥 보낼 것인지만 구분하면 부가정보를 1비트로 만들 수 있다.

3.2 상관을 통한 PAPR값 예측

송신기에서 실시간으로 들어오는 데이터를 지연 시간 없이 전송하는 것은 중요한 일이다. 블록부호화 방식은 적당한 부호어를 찾기 위해 데이터베이스가 필요하며, PTS에서는 PAPR값을 비교하여 최적 값을 찾기 위해 계산적 시간지연이 필요하다. 그러나 사전-스크램블링 기법에서는 상관기를 통하여 PAPR 값을 예측함으로써 시간지연을 방지할 수 있다.

3.1에서 분석한 부분송파 개수에 따르는 PAPR값의 분포와 최상위와 상위의 데이터 값을 알고 있고, 또한 최상위와 1비트, 2비트 차이로 인한 PAPR값의 위치를 알고 있으므로 알고 있는 값과 들어오는

데이터와의 상관값을 이용하여 PAPR값을 예측 할 수 있게 된다. 또한 이진수를 상관하기 때문에 부하로 작용하지 않는다는 장점이 있다. 예를 들어 부반송파를 16개를 사용할 때, 최상위값과 동일한 데이터가 들어온다면 상관값이 16으로 최대가 나올 것이며, 1비트 차이 나는 데이터는 상관값이 14가 나올 것이다. 또한 그 외의 자리에 위치한 데이터들은 낮은 상관값을 가질 것이다. 이를 통하여 PAPR값을 예측하고, 위상변화를 줄 것인지에 대한 결정을 내리면 시간적 지연 없이 실시간으로 송신기를 구성할 수 있다.

3.3 사전-스크램블링 기법 적용

기존의 스크램블링 방식인 PTS는 그 고유 특성상 다수의 IFFT가 필요하여 연산량이 많아지고, 최적의 PAPR값을 찾기 위해 계산적 시간지연이 필요하여 송신단에서 실시간 전송을 어렵게 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 먼저 PAPR값 분석을 바탕으로 상관기를 도입하여 계산적 시간지연을 보완하고, IFFT 전단에서 위상의 변화를 줄 것인지에 대한 정보를 상관값을 통하여 판단하여 다수의 IFFT 사용을 방지 할 수 있는 사전-스크램블링 기법을 제안한다. 제안한 방식인 사전-스크램블링 기법에 대한 송신기 시스템 모델은 그림 3과 같다.

직렬의 입력 비트 데이터가 BPSK 매핑(mapping)된 후, 상관기를 통하여 기존에 알고 있는 데이터 값과 상관을 시킨다. 이 상관값의 크고 작음에 따라 PAPR값을 예측하고, 이 정보를 사전-스크램블링 단에 보내줌으로써 사전-스크램블링단에서는 상관값이 높으면 PAPR값의 위치가 3.1절에 분류된 상위 이상에 위치할 것이므로 위상 변화를 주고, 상관값이 낮으면 위상의 변화를 주지 않고 그냥 보낸다는 두 가지 판단만 하면 된다. 스크램블링단에서 위상변화를 주는 방식은 부가정보를 1비트로 최소화하기 위해 위상변화를 반전과 비 반전으로만 한정한다. 여기서 생성된 부가정보는 파일럿 심벌을 통하여 전송한다. 스크램블링단을 통과한 데이터는 일반적인 OFDM 시스템과 같이 적용시킨다.

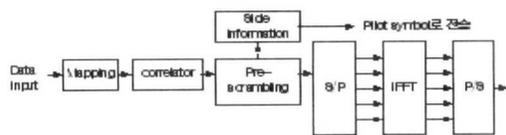


그림 3. 사전-스크램블링 기법의 블록도

IV. 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는, 첫 번째로 3.1절 PAPR값 분석에서 언급한 최적의 반전 위치를 찾기 위한 반전위치마다의 최대 PAPR값을 살펴본다. 두 번째로는 기존 PTS기법과 여기서 제안한 사전-스크램블링 기법의 CCDF를 비교한다. PTS와 정확히 비교하기 위해 부가정보를 1비트로 맞추고, PTS는 IFFT 두개를 사용한다.

모의실험을 위해 사용된 환경은 다음과 같다.

- 매핑방식 : BPSK
- 부반송파의 수 : 16
- IFFT 크기 : 16-IFFT
- 가중요소 : 로 한정함. (즉, 위상조절은 0 또는 180)
- 부가정보(side-information)는 파일럿(pilot) 심벌을 통하여 정확히 전송된다고 가정함.

그림 4는 부반송파를 16개 사용하였을 때 나올 수 있는 PAPR값들 중에서 PAPR값이 높은(8dB이상) 경우의 데이터 552가지의 경우에 대해 자리를 반전시켰을 때 최대 PAPR값을 나타낸 것이다. 부반송파 16개를 사용하였을 때는 앞에서 5자리 반전하는 것이 PAPR의 최대 값이 가장 작게 나오는 것을 알 수 있다. 그러므로 16개의 부반송파를 사용할 때는 5자리 반전이 최적이라 할 수 있다.

그림 5는 일반적인 경우와 PTS, 사전-스크램블링 기법의 CCDF값을 랜덤 데이터로 비교 분석한 것이다. 그림 5를 보면 랜덤 데이터일 때 PTS와 사전-스크램블링 기법 둘 다 아무 기법을 사용하지 않은 것보다는 낮게 나오며, 8dB이상은 둘 다 나오지 않는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 일반적인 경우와 PTS, 사전-스크램블링 기법의 CCDF값을 PAPR값이 높은(worst case) 데이터로 비교 분석한 것이다. 그림 5에서 비교한 랜덤 데이터의 경우 기존 PTS와 여기서 제안한 사전-스크램블링 기법의 차이가 나지 않았지만, 그림 6과 같이 PAPR값이 높은 데이터만을 고려하여 CCDF를 비교하면 PTS와 사전-스크램블링 기법이 0.5dB의 향상이 있음을 알 수 있다.

V. 결론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 각 부반송파들의 중첩현상으로 인한 전송신호의 PAPR(Peak to Average Power Ratio: 최대전력 대 평균전력비)을 감소시키는 사전-스크램블링(pre-scrambling) 이라는 새로운 기법을 제안하였다. 기존의 스크램블링 기법의 한가지인 PTS (Partial Transmit Sequence) 기법과 여기에서 제안한 사전-스크램블링 기법을 비교하면 위상변화를 IFFT 앞단에서 시행하므로 IFFT 개수가 여러 개 필요하지 않고, 상관기를 이용하므로 제한적 시간지연이 존재하지 않아 연산속도와 복잡도면에서 우수하다. 모의실험을 통하여 제안한 기법과 기존의 PTS 기법을 비교한 결과, 랜덤 데이터일 때 거의 같은 성능이 나오고, PAPR값이 높은 데이터일 때 제안된 사전 스크램블링 기법의 성능이 우수함을 볼 수 있다.

참고 문헌

- [1] Richard Van Nee and Ramjee Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.
- [2] Hara, S. Prasad, R. "Overview of Multi-carrier CDMA", IEEE Communications Magazine, Vol. 35, No. 12, pp.126-133, Dec. 1997.
- [3] A. D. S. Jayalath and C. Tellambura, "Adaptive PTS approach for reduction of peak-to-average power ratio of OFDM signal", Electronics Letters, Vol. 36, Issue 14, pp. 1226-1228, July 2000.
- [4] Seog Geun Kang, Jeong Goo Kim and Eon Kyeong Joo, "A Novel Subblock Partition Scheme for Partial Transmit Sequence OFDM", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 45, No. 3, pp. 333-338, Sep. 1999.
- [5] S. H. Muller, R. W. Bauml, R. F. H. Fishcher, and J. B. Huber, "OFDM with Reduced Peak-to-Average Power Ratio by Multiple Signal Representation", Annals of Telecommunications, Vol. 52, No. 1-2, pp. 58-67, Feb. 1997.

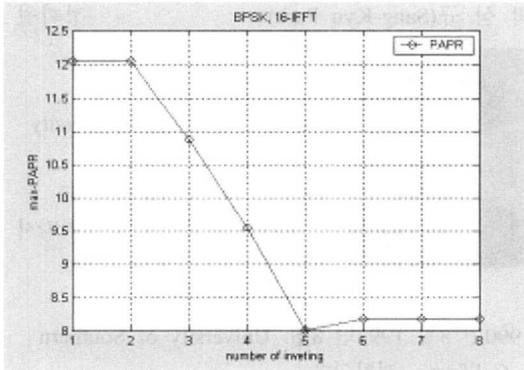


그림 4. 1~8 자리 반전 후 최대 PAPR값

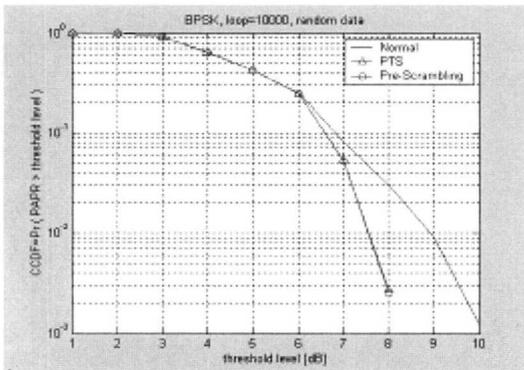


그림 5. PTS와 사전-스크램블링 기법의 CCDF 비교 (랜덤 데이터)

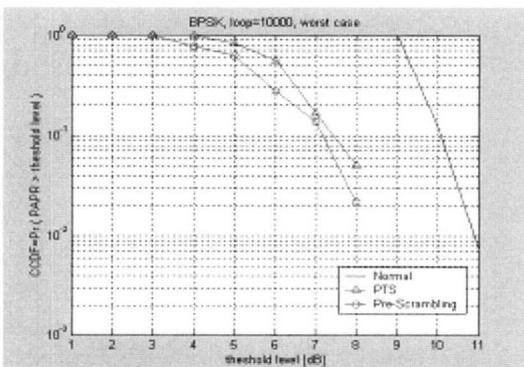


그림 6. PTS와 사전-스크램블링 기법의 CCDF 비교 (PAPR값이 높은 데이터)

- [6] L. J. Cimini and N. R. Sollenberger, "Peak-to-Average Rower Ratio Reduction of an OFDM Signal using Partial Transmit Sequences", IEEE International Conference on Communications, Vol. 1, pp. 511-515, 1999.
- [7] L. J. Cimini and N. R. Sollenberger, "Peak-to-Average Power Ratio Reduction of an OFDM Signal using Partial Transmit Sequences with Embedded Side Information", IEEE Global Communications Conference, Vol 2, pp. 746-750, 2000.

박 상 규(Sang-Kyu Park) 정회원



1974년 2월: 서울대학교
전기공학사
1980년 5월: Duke University
통신공학 공학석사
1987년 5월: University of
Michigan 통신공학 공학박사
1976년 7월~1978년 10월:
국방과학연구소
1990년 8월~1991년 8월: University of Southern
California 객원교수
1987년 3월~현재: 한양대학교 공과대학
전자전기컴퓨터공학부 교수
<관심분야> 디지털 통신, 확산대역 통신, 부호이론,
PCS, IMT-2000

최 광 돈(Kwang-Don Choe) 정회원



1979년 2월: 한양대학교
전자공학과 졸업
1985년 8월: 캘리포니아
주립대학 전기전자공학과 석사
2001년 3월~현재: 한양대학교
전자통신전파공학과 박사수료
1993년 3월~현재: 안양과학대학
전자통신정보학부 부교수

<관심분야> OFDM, ADM, MIMO-OFDM

김 시 철(Si-Chul Kim)



2001년 2월: 단국대학교
전자공학과 졸업
2003년 8월: 한양대학교
전자통신전파공학과 석사
2003년 8월~현재: AMtel 연구원