

# 장거리 무선 통신을 위한 빔형성 훈련 신호와 안테나 위상 추정에 관한 연구

김영균, 이우용\*

(주)위즈노바, \*한국전자통신연구원

ykim@wiznova.com, \*wylee@etri.re.kr

## A Study on the training signal and antenna phase estimation of beamforming systems for long distance wireless communication

Kim Younggyun and Lee Woo Yong\*

Wiznova, Inc., \*Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요 약

본 논문은 장거리 무선 통신을 위한 빔 형성 기술에 대한 것으로, 빔 형성 훈련 신호로 단일 주파수의 정현파(sine wave) 신호를 사용하고, 수신기에서 피할 수 없는 잔여 운반파(carrier) 주파수의 영향을 최소화 하여 각 안테나의 위상을 추정하는 방법을 제시하였다. 빔 형성을 이용하여 얻는 안테나 이득이 크면 클수록, 빔 형성 없이 계산되어야 하는 초기 안테나 위상 추정은 더욱 더 낮은 SNR 에서 수행되어야 한다. 위상 오차에 따른 안테나 손실을 계산하여 필요한 위상 추정의 정확도를 먼저 얻었다. 수신기에서 위상 추정을 위하여 각 안테나 별 신호 관측 구간을 여러 개로 나누고, 훈련 신호의 중간 지점을 기준으로 이전과 이후의 동일한 시점에 동일한 안테나 신호를 관측하게 하여 위상 추정에 대한 운반파 주파수 오차의 영향을 최소화하였다. 수신 안테나 선택 순서는 안테나 별 위상 추정 오차의 크기에 차이가 없도록 결정하였다. 훈련 신호의 길이 별로 위상 추정의 정확도를 평가하여 필요한 훈련 신호의 길이를 산정하였다.

### I. 서 론

본 논문에서는 장거리 무선 통신에서 사용할 수 있는 빔 형성 기술에서 안테나 위상 추정을 위한 훈련 신호를 제안하고, 위상 추정을 위한 절차와 성능 시뮬레이션을 수행한다. 여기에서 고려하는 통신 환경은 시분할 송수신(TDD: Time Division Duplexing) 통신 방식이고, 가시선이 확보되고, 스펙트럼 효율 0.5, 최대 30km/h 로 움직이는 단말과 고정된 기지국간 통신을 가정한다.

구현의 용이함을 위하여 빔 형성 기술은 RF 신호의 위상을 안테나 별로 조절하여 송신하거나 수신하는 RF 빔 형성 방식을 고려한다[1]. 동일한 빔 형성기를 송신과 수신을 위해 사용한다. 시분할 송수신 통신 방식으로 수신 안테나 위상 추정 값을 송신을 위해서도 사용할 수 있다.

안테나 위상 추정을 위한 훈련 신호로 단일 주파수의 정현파 사용을 제안한다. 수신된 정현파의 관측 기간을 조절하여 임의의 신호 대 잡음비(Signal to Noise power Ratio, SNR)를 얻을 수 있어서 목표로 하는 안테나 위상 추정의 정확도를 얻을 수 있다. 각 안테나 별 위상 추정은 해당 안테나만을 사용하여 수신된 RF 신호를 중심 주파수가 직류(DC)에 있는 기저대역 신호로 변환한다. 이 기저대역 신호의 위상은 안테나 위치에 따른 위상뿐만 아니라, 운반파 주파수 오차, 운반파 위상 오차에 영향을 받는다. 운반파 위상 오차는 안테나 위상 추정 기간 내에서 그 변화가 작은 것을 가정하여 무시할 수 있으나, 운반파 주파수 오차로 인한 위상 변이는 그 크기가 클 수 있어 무시할 수 없다. 운반파 주파수 오차는 별도의 추정 절차를 사용하여 보정할 수 있으나[2], 피할 수 없는 잔여 운반파 주파수 오차로 인하여 안테나 위상 추정의 정확도가 나빠질 수 있다. 여기에서 제안하는 안테나 위상 추정 절차는 각 안테나의 위상 추정을 여러 번에 걸쳐 수행하고, 안테나의 위상 추정 순서를 해당 안테나의 여러 추정 값을 더했을 때 운반파 주파수 오차로 인한 위상 값이

서로 상쇄되게 하여 안테나 위상 추정이 잔여 운반파 주파수 오차로 인하여 열화되는 것을 최소화한다.

아래에서는 안테나 위상 추정 시 수신기의 동작 SNR 값을 예시로 산정하고, 안테나 위상 오차로 인한 안테나 이득 감소를 계산하여 안테나 위상 추정의 정확도 요구 사항을 파악한다. 그리고 안테나 위상 추정을 위한 절차와 그에 따라 얻어진 위상 추정의 정확도에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

### II. 본론

빔 형성을 위한 안테나 위상 추정이 이루어지는 수신 SNR 값을 파악하기 위하여 예시로 사용하는 통신규격으로 IEEE802.11g 의 OFDM 변조 방식으로 QPSK 부반송파 변조, 1/2 convolutional code 를 사용하며, 20MHz 신호 대역과, 20MHz 샘플링 주파수를 가정한다. 패킷 오류율 0.1% 이하를 달성하기 위해 필요한 SNR 은 4.5dB 이상이 되어야 한다[3]. 빔 형성을 위해 움직이는 단말은 4 개의 안테나를, 그리고 고정된 기지국은 16 개의 안테나를 사용한다. 초기 통신 상대방의 위치를 모르는 상태에서 각 안테나의 위상 값을 추정하기 위해서 기지국과 단말에서 하나의 안테나만을 사용하여 빔 형성 훈련 신호인 정현파 신호를 각각 송신하고 수신하는 것을 가정한다. 모든 안테나를 이용한 데이터 통신의 경우 4.5dB 수신 SNR 에서 동작한다면, 기지국과 단말에서 각각 하나의 안테나만을 사용하여 안테나 위상 추정을 하는 경우에는 -13.5dB(=4.5-6(단말)-12(기지국)) 수신 SNR 에서 동작하여야 한다. 아래 성능 평가에서는 이 수신 SNR 근처의 값을 사용한다. 아래에서 별도의 언급이 없는 경우 SNR 값은 -14.5dB 를 사용한다.

빔 형성 안테나 위상의 오차로 인한 수신기 안테나 이득 감소에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 1 과 같다[4]. 4 개와 16 개의 안테나에서 RMS 위상 오차가 15 도 이하이면 90%이상의 경우 이득 감소는 0.5dB 이하이다.

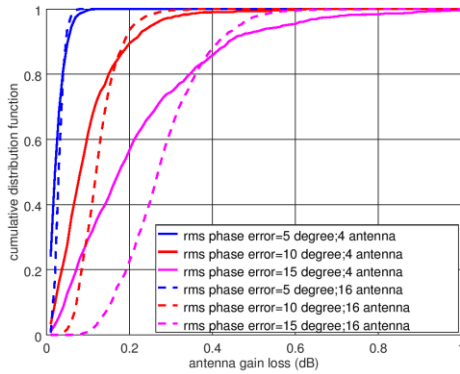


그림 1: 위상 오차에 따른 안테나 이득 감소

4 개의 수신 안테나에 대한 위상 추정 순서는 아래 그림 2 와 같은 순서로 수행할 수 있다. 각 안테나는 1 부터 4 까지 번호로 표시되어 있다. 선택된 각 안테나에 대하여 해당 구간에서 수신 신호를 모두 더하고, 다시 4 번의 덧셈 결과를 모두 더하여 최종 위상을 추정한다.

1	2	3	4	4	3	2	1	1	2	3	4	4	3	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

그림 2: 안테나 위상 추정 순서

잔여 운반파 주파수 오차로 인한 수신 신호의 위상 변이는 시간이 지나감에 따라 선형적으로 증가하거나 감소한다. 잔여 운반파 주파수 오차가 만드는 그림 2 의 중간 위치에서의 위상 변이가 모든 안테나 위상 추정 값에 동일한 크기로 존재한다. 빔 형성을 위해 각 안테나에 적용되는 위상은 서로간의 차이 만이 의미가 있기 때문에 동일한 값이 더해진 위상은 안테나 이득에 아무런 영향이 없다. 마찬가지로 수신 신호의 초기 위상은 모든 안테나에 동일하기 때문에 고려하지 않는다.

안테나 별 위상 추정의 오차는 그림 3 과 같다. 이 시뮬레이션의 잔여 운반파 주파수 오차는 1kHz 이다. 각 안테나 별로 4 회 위상 추정을 하는 경우 안테나 1 의 추정 오차가 가장 크다. 안테나별 오차를 줄이기 위하여 각 안테나 별로 8 회 위상 추정을 하는 경우도 함께 표시하였는데, 그 차이가 많이 줄어든 것을 볼 수 있다. 각 안테나는 총 2048 개의 샘플을 위상 추정에 사용한 결과이다. 아래에서는 각 안테나 별로 8 회 위상 추정을 하는 경우를 사용하는데 그 추정 순서는 그림 2 와 같이 2 회 반복되는 안테나 선택 순서를 갖는다.

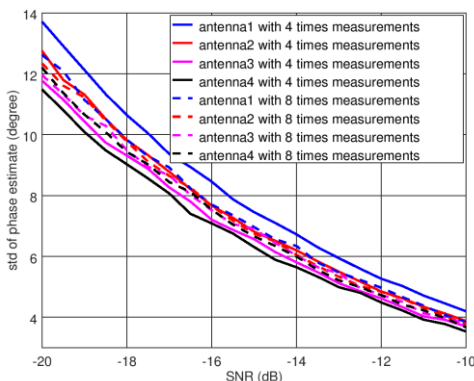


그림 3: 안테나별 위상 추정 오차

각 안테나 별로 사용하는 전체 신호 샘플의 개수에 따른 위상 추정 오차는 그림 4 와 같다. 안테나 1 에 대한 위상 추정 오차만 표시하였다. 잔여 운반파 주파수 오차는 1kHz 이다. 1024 개 이상의 샘플을 각 안테나 위상 추정에 사용하면 95% 이상에서 15 도 이하의 위상 오차를 갖는다.

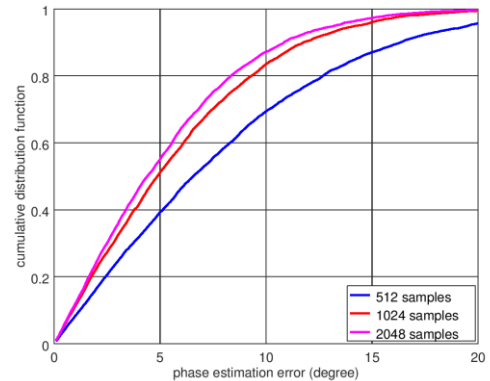


그림 4: 신호 길이에 따른 위상 추정 오차

### III. 결론

본 논문에서는 장거리 무선 통신을 위하여 빔 형성 기술을 사용하는 경우에 안테나 위상 추정을 위한 훈련 신호로 정현파를 하나의 송신 안테나에서 송신하는 것을 제안하였다. 안테나를 번갈아 가며 수신된 기저 대역 신호의 위상을 잔여 운반파 주파수 오차에 무관하게 추정하는 방법을 그 성능과 함께 제시하였다. 여기에서 제시된 방법을 사용하면 빔 형성 이득이 없는 매우 낮은 SNR 의 초기 통신 환경에서 안테나의 위상을 충분히 정확하게 추정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다. [No.2021-0626, IoET 를 위한 극한지 통신 및 장비 기술 개발].

### 참 고 문 헌

- [1] 백정훈, 김남호, 지민기, "빔형성을 적용한 2.4GHz 대역 중장거리 영상 전송 무선 기술," 방송공학회 논문지, pp. 693-700, 2018 년 9 월.
- [2] D. Rife and R. Boorstyn, "Single-tone parameter estimation from discrete-time observations," IEEE Trans. Information Theory, pp.591-598, Sep. 1974.
- [3] J. Terry and J. Heiskala, *OFDM wireless LANs: A theoretical and practical guide*, Sams Publishing, 2002.
- [4] O. Bakr and M. Johnson, "Impact of phase and amplitude errors on array performance," Technical Report No. UCB/EECS-2009-1, Univ. of California at Berkeley, Jan. 2009.