

# 장거리 무선 통신을 위한 빔형성 기술 구현에 관한 연구

김영균, 김남호, 지민기, 이우용\*  
(주)위즈노바, \*한국전자통신연구원

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

## A study on the beamforming implementation for long distance wireless communication

Kim Younggyun, Kim Namho, Jee Minki, Lee Woo Yong\*  
Wiznova, Inc., \*Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요 약

본 논문은 장거리 무선 통신을 위한 빔 형성 기술의 구현에 대한 것으로 빔형성은 2차원 평면에서 송수신되는 RF 신호의 위상을 안테나 별로 조절하는 방식을 고려하였다. 송수신 신호의 방향에 따른 안테나 위상을 계산하고, 모든 방향의 신호에 대하여 빔 형성 이득을 얻을 수 있는 빔의 개수를 결정하였다. 안테나에서 조절되는 신호의 위상을 양자화하고 그로 인한 손실을 평가하였다. 빔 선택 하드웨어의 복잡도 지표로 선택할 수 있는 위상의 전체 개수를 사용하여 구현의 복잡도를 최소화할 수 있는 방법을 제시하였다. 16 개의 안테나를 4x4 의 형태로 배열하는 빔 형성 경우를 사용하여 14 개의 빔으로 45 도의 위상 양자화를 이용하여 2 차원 평면에서 최대 빔 형성 이득을 모든 신호 방향에 대하여 2dB 변화 범위 이내에서 얻을 수 있는 것을 보였다. 위상 조절의 복잡도를 최소화한 결과로 선택할 수 있는 양자화된 위상의 전체 개수가 76 인 위상 조합을 얻었다.

### I. 서 론

무선 신호의 송수신 방향으로 안테나의 빔을 조절하여 이득을 얻는 빔 형성 기술은 통신 거리를 늘리기 위한 효과적인 방법 중의 하나이다 [1]. 본 논문은 안테나에서 송수신되는 RF 신호의 위상을 조절하여 빔을 형성하는 기술의 구현에 대한 것이다. 빔 형성 기술의 구현은 먼저 2 차원 평면에서 모든 방향의 신호를 송수신할 수 있는 빔의 개수를 정하고, 각 빔을 만들기 위한 안테나 별 위상을 계산하며, 그리고 위상의 양자화를 결정하여야 한다. 빔 형성을 위한 하드웨어의 복잡도를 낮추기 위하여 조절하여야 하는 양자화된 전체 위상의 개수와 안테나별 위상 개수의 최대값을 최소화하는 최적화 과정을 수행을 수행하여 안테나 빔 별로 최종 위상을 선정한다.

여기에서 고려하는 안테나는 16 개로 정사각형의 4 x 4 로 배열된다. 안테나간 간격은 RF 신호의 반 파장과 같다. 안테나 위상 계산을 위한 RF 신호의 주파수는 5GHz 를 가정한다.

아래에서는 2 차원 평면에서 모든 방향의 신호 송수신을 위해 필요한 빔의 개수와 안테나 위상을 결정하는 과정에 대하여 기술하고, 하드웨어 구현을 위한 안테나 위상의 양자화 과정을 설명한다. 구현의 복잡도를 줄이기 위하여 양자화된 위상 값의 개수를 최소화하는 절차를 마지막으로 최종 선정된 빔 별 위상 값을 제시한다

### II. 본론

4x4 배열의 16 개 안테나 위치는 2 차원 복소수 평면에서  $c_1 = -0.75\lambda + j0.75\lambda$ ,  $c_2 = -0.25\lambda + j0.75\lambda$ ,  $c_3 = 0.25\lambda + j0.75\lambda$ ,  $c_4 = 0.75\lambda + j0.75\lambda$ ,  $c_5 = -0.75\lambda + j0.25\lambda$ ,

$c_6 = -0.25\lambda + j0.25\lambda$ ,  $c_7 = 0.25\lambda + j0.25\lambda$ ,  $c_8 = 0.75\lambda + j0.25\lambda$ ,  $c_9 = -0.75\lambda - j0.25\lambda$ ,  $c_{10} = -0.25\lambda - j0.25\lambda$ ,  $c_{11} = 0.25\lambda - j0.25\lambda$ ,  $c_{12} = 0.75\lambda - j0.25\lambda$ ,  $c_{13} = -0.75\lambda - j0.75\lambda$ ,  $c_{14} = -0.25\lambda - j0.75\lambda$ ,  $c_{15} = 0.25\lambda - j0.75\lambda$ ,  $c_{16} = 0.75\lambda - j0.75\lambda$  이다. 여기에서  $\lambda$ 는 RF 신호의 파장 길이이다. 안테나의 간격은  $\lambda/2$  이다. 원거리에 있는 송신기의 위치를  $s$  라고 하면 송신기로부터 수신기 안테나  $c_i$  까지의 거리는 아래와 같다.

$$d_i = \left| s - \text{Re} \left\{ c_i \times \frac{s^*}{|s|} \right\} \right| \cdot \frac{s^*}{|s|} \quad (1)$$

이 거리를 지나온 신호의 위상 변이는 다음과 같이 계산한다.

$$p_i = \frac{2\pi d_i}{\lambda} \quad (2)$$

360 도의 전체 신호 방향을  $N$  개이 균등한 각도로 나누고 각각의 신호 도착 각도 즉 빔의 방향에 대하여 안테나별 신호 위상 변이를 (2)를 이용하여 계산한다. 해당 빔을 만들기 위한 안테나 별 위상은 계산된 위상 변이를 보상하는 값 즉 부호가 반대이며 그 크기가 같은 위상 변이와 같다. 하나의 신호 수신 각도에 대하여  $N$  개의 빔을 이용하여 수신된 신호 중에서 그 크기가 가장 큰 신호를 선택하여 빔 형성 이득을 얻는다. 빔의 개수를  $N=12, 16$ , 그리고 24 개를 사용할 경우 빔형성으로 얻을 수 있는 신호 이득은 그림 1 과 같다. 안테나 1 개를 사용할 경우 수신 신호의 크기는 1 이다. 하늘색의 선은 1dB 간격이다. 16 개의 빔을 사용하면 수신 신호 크기 이득으로 약 2dB 변화 범위 이내에서 최대 이득을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

16 개의 빔에 대하여 안테나의 위상을 45 도 단위로 양자화 한 각 안테나별 위상 값은 표 1 과 같다.

노란색으로 표시된 빔은 다른 신호 각도에 대하여 동일한 빔이 존재한다. 마지막 행은 안테나별로 선택 가능한 위상의 개수이다. 45 도 단위로 양자화된 빔 형성 이득은 그림 2 와 같이 양자화되지 않은 경우와 비교할 때 그 손실이 미미하다.

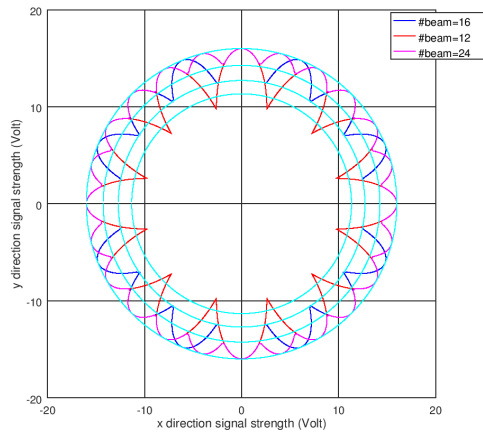


그림 1: 빔의 개수에 따른 빔 형성 이득

표 1: 양자화된 빔 별 안테나 위상

각도	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14	c15	c16
0	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180
22.5	45	-135	90	-90	90	-90	90	-90	90	-90	90	-90	90	-90	90	-90
45	0	-135	90	0	135	0	-135	90	-90	135	0	-135	90	-90	135	0
67.5	0	-90	-135	135	180	90	45	-45	-45	-90	180	135	135	90	0	-90
90	0	0	0	0	180	180	180	180	0	0	0	0	180	180	180	180
112.5	0	90	135	-135	180	-135	-45	0	-45	45	90	180	135	-135	-90	0
135	0	135	-90	0	135	-90	0	135	-90	0	135	-90	0	135	-90	45
157.5	0	180	-45	135	90	-135	45	-135	135	-45	90	-90	-135	0	180	0
180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180
202.5	0	180	-45	135	-90	90	-90	90	-135	45	180	0	135	-45	135	-90
225	0	135	-90	0	-135	0	135	-90	90	-135	0	135	0	90	-135	0
247.5	0	90	135	-135	180	-90	-45	45	45	90	180	-135	-135	-90	0	90
270	0	0	0	0	180	180	180	180	0	0	0	0	180	180	180	180
292.5	0	-90	-135	135	180	135	45	0	45	-45	-90	180	-135	135	90	0
315	0	-135	90	0	-135	90	0	-135	90	0	-135	90	0	-135	90	-45
337.5	0	180	45	-135	-90	135	-45	135	-135	45	-90	90	135	0	180	0
#각도	1	6	7	4	6	6	8	8	7	8	6	6	4	8	6	6

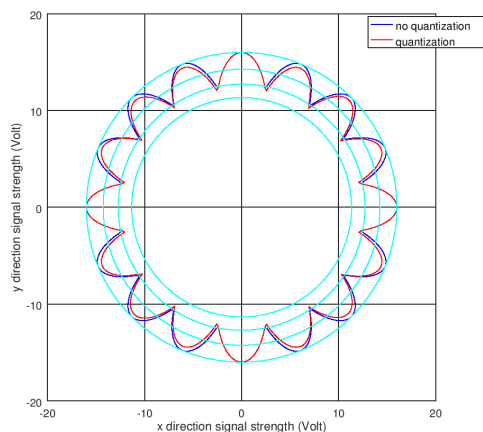


그림 2: 안테나 위상 양자화로 인한 손실

하나의 빔은 표 1 에 따라 안테나 별로 위상을 선택하여 만들어 진다. 각 안테나 별로 선택할 수 있는 양자화된 위상의 개수는 하드웨어 복잡도 평가를 위한 한 지표로 사용될 수 있다. 표의 마지막 행에 안테나 별로 선택할 수 있는 위상의 개수가 표시되어 있다. 하나의 빔에 대하여 동일한 위상을 모든 안테나 위상에 더해도 빔의 방향에는 영향이 없다. 45 도 각도로 양자화된 경우 표 1 의 각 행에 8 가지의 다른 각도를 더할 수 있으며, 이 모든 조합을 조사하여 안테나별로 선택할 수 있는

양자화된 위상의 개수를 최소화하면 위상 선택에 관한 하드웨어 복잡도를 최소화할 수 있다. 표 1 의 선택할 수 있는 위상의 전체 개수는 마지막 행을 모든 더한 값 97 과 같다. 빔 별로 양자화된 단위 위상의 배수를 더하여 선택할 수 있는 전체 위상의 개수를 최소화한 결과는 표 2 와 같다. 최소화는 트리 서치 알고리즘을 이용하여 수행할 수 있다[2]. 전체 위상의 개수가 같은 경우에는 안테나 당 선택할 수 있는 위상의 개수 중 최대 값이 최소가 되는 위상의 조합을 선택하였다. 선택할 수 있는 전체 위상의 개수는 76 개로 작아졌다. 이 개수는 표 2 의 마지막 행의 각 안테나별 위상의 개수를 모두 더한 값이다. 표 1 의 노란색으로 표시된 중복된 빔은 표시하지 않았다.

표 2: 위상의 개수를 줄인 빔 별 안테나 위상

각도	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14	c15	c16
0	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180
22.5	45	-135	90	-90	135	-45	135	-45	180	0	-135	45	-90	90	-90	135
45	0	-135	90	0	135	0	-135	90	-90	135	0	-135	0	-90	135	0
67.5	-135	135	90	0	45	-45	-90	180	180	135	45	0	-45	-135	135	0
90	0	0	0	0	180	180	180	180	0	0	0	0	180	180	180	180
112.5	-45	45	90	180	135	180	-90	-45	-90	0	45	135	90	180	-135	-45
135	-90	45	180	-90	45	180	-90	45	180	-90	45	180	-90	45	180	-45
157.5	-45	135	-90	90	45	180	0	180	90	-90	45	-135	180	-45	135	-45
202.5	-135	45	180	0	135	-45	135	-45	90	-90	45	-135	0	180	0	135
225	0	135	-90	0	-135	0	135	-90	90	-135	0	135	0	90	-135	0
247.5	45	135	180	-90	-135	-45	0	90	90	135	-135	-90	-90	-45	45	135
292.5	-45	-135	180	90	135	90	0	-45	0	-90	-135	135	180	90	45	-45
315	180	45	-90	180	45	-90	180	45	-90	180	45	-90	180	45	-90	135
337.5	-45	135	0	180	-135	90	-90	90	180	0	-135	45	90	-45	135	-45
#phase	6	5	4	4	5	5	5	5	4	5	3	6	4	5	6	4

### III. 결론

본 논문에서는 안테나 별로 RF 신호의 위상을 조절하는 빔 형성 기술의 구현에 대하여 기술하였다. 2 차원 평면에서 신호 방향에 따른 빔 형성을 위한 안테나 위상을 계산하고, 모든 방향의 신호에 대하여 빔 형성을 할 수 있는데 필요한 빔의 개수를 결정하였다. 안테나 별로 선택하는 위상의 양자화와 그로 인한 이득의 감소를 조사하였다. 각 빔에 대하여 모든 안테나에 동일한 위상 조절이 되어도 빔의 방향에 영향이 없는 것을 이용하여 안테나 별로 선택할 수 있는 위상의 개수를 최소화한 빔 형성을 위한 위상 조합을 찾았다.

16 개의 안테나가 4x4 의 배열을 갖는 경우 수신 신호의 크기가 16 배되는 것을 계산으로 확인하였으며, 14 개의 빔을 사용하고, 45 도 단위의 양자화된 위상을 사용하여 2dB 변화 범위 이내에서 2 차원의 모든 방향에서 신호 수신 이득을 최대한 얻을 수 있는 결과를 제시하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022 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] Van Veen, B. D. and Buckley, K. M. "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP Magazine, Volume 5, Issue 2, pp. 4-24, Apr. 1988.
- [2] N. Christofides, *Graph Theory: An Algorithmic Approach*, Academic Press, 1975.