

밀리미터파 시스템에서의 반송파 집성을 위한 빔 선택 방법

강운성*

Beam Selection Method for Carrier Aggregation in Millimeter Wave Systems

Yun-seong Kang*

요약

본 논문에서는 밀리미터파 통신에서의 반송파 집성을 위한 빔 선택 방법을 연구한다. 밀리미터파 통신은 높은 경로 손실을 가지므로, 이를 완화하기 위한 빔포밍 기법을 요구한다. 하지만 빔포밍을 위한 RF 체인은 높은 비용을 가져 단말에서 사용할 수 있는 수가 제한된다. 따라서 집성된 반송파 내에 있는 요소 반송파 들은 각 RF 체인을 공유해야한다. 본 논문에서는 RF 체인을 공유하는 상황에서 데이터 유효를 최대화 하는 빔 선택 문제를 제안한다. 제안한 최적화 문제의 최적 해는 요소 반송파 수와 RF 체인 수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가한다. 따라서 이 최적화 문제를 해결하기 위한 효과적인 알고리즘을 추가로 제안한다. 제안한 방법으로 완전탐색 기반의 최적 해 대비 약 0.5%의 복잡도로 0.8dB 이내의 데이터율을 얻었다.

Key Words : Beam selection, millimeter wave, carrier aggregation, 5G, capacity

ABSTRACT

This paper investigates a beam selection method for carrier aggregation (CA) in millimeter wave (mmWave) systems. MmWave systems require a beamforming technique due to a large path loss in its band. However, the high cost of a mmWave radio frequency (RF) chain limits the number of RF chains in the terminal. Thus, some component carriers

(CCs) should share each RF chain during CA. To maximize the sum-rate achieved with sharing each RF chain, an optimization problem is first formulated. The corresponding problem has an exponentially increasing computational complexity according to the numbers of RF chains and CCs. To reduce the complexity, an effective algorithm is additionally proposed in this letter. The performance of the proposed algorithm approaches an optimal performance within 0.8 dB gap, with only 0.5% computational complexity compared to an exhaustive search-based method.

I. 서론

밀리미터파 통신은 넓은 대역폭 사용이 용이하여 큰 관심을 받고 있다. 3GPP 단체에서는 28 GHz 대역과 39 GHz 대역을 이용하는 5G 표준기술을 채용하였다^[1]. 하지만 높은 주파수에서의 통신은 큰 경로 손실을 완화하기 위한 빔포밍 기술이 수반되어야 한다^[2]. 또한, 밀리미터파 통신이 제공하는 넓은 대역폭을 효과적으로 사용하기 위해선 반송파 집성(Carrier aggregation)기술이 필요하다^[3]. 반송파 집성기술은 요소 반송파(Component carrier)들의 결합으로 구성되는데, 반송파 집성 통신이 최대 통신 효율을 얻기 위해서는 각 요소 반송파들에 대해 개별적인 빔포밍이 요구된다. 하지만 밀리미터파에서 빔포밍을 위한 RF 체인은 높은 비용을 가져 모든 요소 반송파에 적용하기가 용이하지 않다. 따라서 일부 요소 반송파들은 RF 체인을 공유하여 통신을 해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 요소 반송파들이 RF 체인을 공유하는 상황에서의 효율적인 빔 선택 방법을 제안한다. 첫째로, 해당 상황에서의 데이터율을 최대화하는 최적화 문제를 제안한다. 제안하는 문제의 최적 해는 완전(exhaustive) 탐색 방식으로 구할 수 있지만 RF 체인 수와 요소 반송파 수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하는 문제가 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 탐욕(greedy) 방식의 저복잡도 알고리즘을 연구한다. 제안한 greedy 선택 방법은 최적의 성능에 0.8 dB 이내로 근접하면서 완전선택 대비 약 0.5%의 복잡도를 가지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

* First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-6816-5643)R&D Center, LG Display, yskang0111@gmail.com, 정회원
논문번호 : 201909-204-A-LU, Received September 19, 2019; Revised September 20, 2019; Accepted September 22, 2019

II. 시스템 모델

본 논문에서는 반송파와 집성 기반의 하향링크 전송을 고려한다. 빔포밍을 사용한 전송 프레임은 그림 1과 같이 빔 훈련 구간과 데이터 전송 구간으로 나뉜다. 단말은 빔 훈련 구간에서 N_b 개의 빔에 대한 수신 신호의 크기를 각각 측정한다. 측정된 수신 신호 크기를 바탕으로 단말은 빔을 결정하고, 결정된 빔을 이용하여 데이터를 수신한다. 고려하는 반송파와 집성 시스템에서는 요소 반송파들이 독립적으로 데이터 수신을 한다고 가정한다. 따라서 각 요소 반송파들은 N_b 개의 빔에 대한 수신신호대잡음비(SNR) 크기를 측정하고 이를 바탕으로 자기 자신의 빔을 결정한다. 요소 반송파의 개수 N_c 는 빔포밍을 위한 RF 체인의 개수 N_r 보다 작다고 가정한다. 따라서 일부 요소 반송파들은 RF 체인을 공유하여 동일한 빔을 사용하여야 한다. c 번째 요소 반송파가 r 번째 RF 체인을 이용하여 b 번째 빔으로 수신할 때, 수신 신호는 아래와 같다.

$$y_{c,r,b} = h_{c,r,b}x_c + n_{c,r,b} \quad (1)$$

여기서, x_c 는 c 번째 요소 반송파에 해당하는 전송 심볼로 $E\{x_c^2\} = 1$ 을 만족한다. $h_{c,r,b}$ 는 c 번째 요소 반송파가 r 번째 RF 체인을 이용하여 b 번째 빔을 사용했을 때의 기지국과 단말사이의 채널이다. 여기서, 채널은 평균 0, 분산 1인 복소가우시안 분포를 따르며 데이터를 전송하는 동안에는 변함이 없다고 가정한다. n_c 는 평균 0, 분산 N_0 의 복소 가우시안 잡음이다.

III. 제안하는 시스템

본 논문은 반송파와 집성과정에서 요소 반송파들이 RF 체인을 공유할 때의 빔 선택 방법을 다룬다. 이를 위해 빔 선택을 위한 최적화 문제를 제안한다. 제안한 문제의 최적 해는 RF 체인 수와 요소반송파 수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하는 문제가 있기 때문에 이를 해결하기 위한 저복잡도 알고리즘을 추가로 제안한다.

3.1 제안하는 최적화 문제

본 논문에서 제안하는 최적화 문제는 요소 반송파들이 RF 체인을 공유하는 상황에서 시스템 전체의 데

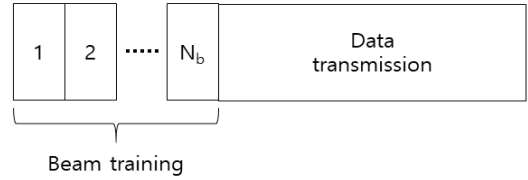


그림 1. 빔 훈련을 가지는 프레임 구조
Fig. 1. Frame structure with beam training

이터율을 최대화하고자 한다. 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$b^* = \operatorname{argmax}_{b \in \Omega} \sum_{c=1}^{N_c} \log_2(1 + \Gamma_{G(F(c))}) \quad (2)$$

$s. t. F(c) \in \Omega, G(F(c)) \in \Psi,$

여기서, $F(c)$ 는 c 번째 요소반송파를 각 RF 체인에 대응해주는 함수이고 $G(r)$ 는 r 번째 RF를 각 빔에 대응해주는 함수이다. 두 집합 Ω 와 Ψ 는 $\Omega = \{1, 2, \dots, N_r\}$, $\Psi = \{1, 2, \dots, N_b\}$ 으로 정의한다. 따라서 $\Gamma_{G(F(c))}$ 는 $F(c)$ 번째 RF 체인을 통해 $G(F(c))$ 번째 빔을 수신했을 때 발생하는 c 번째 요소 반송파에서의 SNR이다. 수식 (2)의 최적화 문제는 이산 집합(discrete set)에서의 최적 해를 구하는 문제로 대응되며, 이는 완전 탐색(exhaustive) 방법으로 구할 수 있다. 이때의 복잡도는 $N_b^{N_r} N_r^{N_c}$ 으로 요소 반송파와 RF 체인의 수에 따라 지수적으로 증가한다.

3.2 저복잡도 알고리즘

식 (2)에서 제안된 최적화 문제를 풀기 위한 저복잡도 알고리즘으로써 Greedy 탐색 기반의 방법을 제시한다. 제안하는 알고리즘은 다음과 같다.

알고리즘은 초기화 과정에서 함수 $F(c)$ 와 $G(r)$ 을 0으로 설정한다(step 1). 그 후, 빔 훈련을 통해 c 번째 요소 반송파에서 r 번째 RF 체인으로 b 번째 빔을 사용했을 때의 SNR값인 $\Gamma_{c,r,b}$ 을 계산한다. 이어서 각 RF 체인은 하나의 요소 반송파에서 데이터율을 최대화 할 수 있는 빔을 선택한다(step 4). 각 RF 체인이 자신의 빔을 선택한 후, 각 요소 반송파들은 자신의 데이터율을 최대화할 수 있는 RF 체인(혹은 빔)을 다시 선택한다(step 8).

알고리즘 1. 제안하는 알고리즘	
1.	초기화 $G(i) = 0, \forall i, F(i) = 0, \forall i$
2.	빔 훈련을 통해 모든 c, r, b 에 대해 $\Gamma_{c,r,b}$ 을 획득
3.	for $r = 1 : N_r$
4.	$b^* = \operatorname{argmax}_{b \in \Psi} \log_2(1 + \Gamma_{c,r,b})$
5.	$G(r) \leftarrow b^*$
6.	end for
7.	for $c = 1 : N_c$
8.	$r^* = \operatorname{argmax}_{r \in \Omega} \log_2(1 + \Gamma_{c,r,B(r)})$
9.	$F(c) \leftarrow r^*$
10.	end for
11.	Return $(c, G(c), G(F(c))), \forall c, \forall r, \forall b$

IV. 결과 및 결론

시뮬레이션을 위해 $N_c=8, N_r=2$, 그리고 $N_b=4$ 를 가정하였다. 채널은 Rayleigh 채널을 가정하였고 각 빔에 대해 독립적으로 생성되었다. 제안한 최적화 문제의 계산량은 빔 훈련 과정에서 $\Gamma_{c,r,b}$ 을 계산할 때 대부분 발생하므로, 시스템의 복잡도로는 $\Gamma_{c,r,b}$ 를 비교하는 총 횟수를 사용하였다.

그림 2는 제안한 방식과 완전 탐색의 성능을 SNR에 따라 비교한 그래프이다. 제안한 방식과 완전탐색 기반방법은 약 0.8 dB의 성능 차이가 발생하였다. 하지만 표 1에서와 같이 완전 탐색 기반방법은 N_c, N_r 에 대해 지수적으로 복잡도가 증가하지만 제안한 방식의 복잡도는 N_c, N_r, N_b 에 대해서 선형적으로 증가한다. 예를 들어, $N_c=8, N_r=2$, 그리고 $N_b=4$ 인 경우, 제안한 방식은 완전 탐색의 0.58%의 복잡도를 가진다.

본 논문에서는 반송과 집성 시스템에서의 빔 선택 문제를 고려하였다. 요소반송과들이 RF 체인을 공유하는 상황을 효과적으로 해결하기 위해 최적화 문제를 제안하였고, 보다 효율적으로 최적해를 찾는 저복

표 1. 제안한 방식과 완전 탐색의 복잡도 비교
Table 1. Complexity comparison of the proposed method and exhaustive search.

	Computational complexity	Total*
Proposed	$N_r N_b + N_c N_r$	24
Exhaustive	$N_b^{N_r} N_r^{N_c}$	4096

* Calculated when $N_c=8, N_r=2, N_b=4$

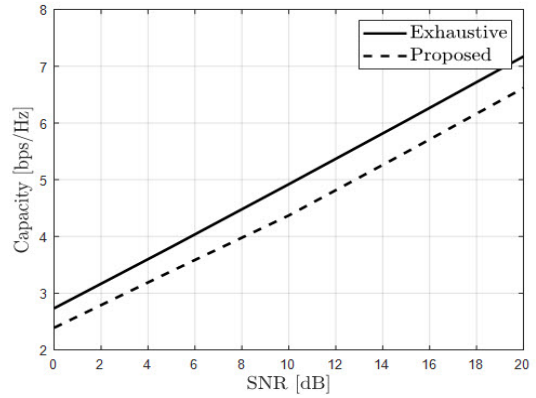


그림 2. 제안한 방식과 완전 탐색의 데이터율 비교
Fig. 2. Comparison of capacity for the proposed method and exhaustive search.

잡도 알고리즘을 추가로 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 제안한 방식의 데이터율이 완전 탐색 방식보다 약 0.8 dB 가량 낮지만 복잡도 측면에서는 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

References

- [1] 3GPP TS 38.104, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15)," V1.0.0, Dec. 2017.
- [2] H. Park, J. Youn, J. N. Shim, M. Yang, and D. Kim, "A study on millimeter wave channel transceive beam estimation algorithm," in *Proc KICS Summer Conf.*, vol. 60, pp. 1394-1395, Jun. 2016.
- [3] K. Pedersen, F. Frederiksen, C. Rosa, H. Nguyen, L. Garcia, and Y. Wang, "Carrier aggregation for LTE-advanced: functionality and performance aspects," vol. 9, no. 5, pp. 1780-1789, 2010.