

## 유니버설 공간-주파수 분할 다중 접속 기술

김종현, 이진녕, 전기준, 최경준, 김광순  
연세대학교 전기전자공학과

{jhkim, jnlee, puco201, kjchoi}@dcl.yonsei.ac.kr, ks.kim@yonsei.ac.kr

### Universal Spatio-Frequency Division Multiple Access

Jong Hyun Kim, Jinnyeong Lee, Ki Jun Jeon, Kyung Jun Choi, Kwang Soon Kim  
Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei Univ.

#### 요 약

본 논문은 5G의 새로운 서비스 카테고리로서 제시되는 초저지연 고신뢰 고용량 서비스의 요구사항을 만족할 수 있는 기술로 유니버설 공간-주파수 다중 접속 기술 (universal spatio-frequency division multiple access, USFDMA)을 소개하였다. USFDMA는 각 사용자 별로 할당된 통신자원에 대해 공간-주파수 필터를 사용하여 서로 간섭이 적은 3차원 웨이브폼을 구성한다. OFDM, GFDM과의 비교 시뮬레이션을 통해 높은 빔형성 해상도와 좋은 대역의 채널 성능으로 주어진 서비스 요구조건에서 주파수 효율이 높음을 보였다.

#### I. 서 론

5G에 대한 다양한 연구가 여러 연구기관을 통해 진행됨에 따라 앞으로 새롭게 등장하게 될 것으로 예상되는 서비스들이 구체화 되고 있으며, 이러한 서비스를 지원하기 위한 요구사항 또한 함께 정리되고 있다. 5G의 새로운 서비스 카테고리로서 초저지연 고신뢰 고용량 서비스는 1ms 이내의 무선 구간 지연시간과 99.999% 신뢰도 조건 및 최대 100Mbps 급의 데이터 전송 용량을 요구한다 [1][2].

위와 같은 서비스 조건을 달성하기 위해서는 다음과 같은 요구사항을 만족시켜야 한다. 각 사용자 별로 다른 이동성 및 채널환경에 맞는 웨이브폼 구성이 필요하며 이렇게 구성된 여러 웨이브폼들이 효율적으로 공존할 수 있어야 한다. 송수신단에서 다수의 안테나를 활용하는 경우 각 사용자 특성에 맞는 시간, 주파수, 공간의 3차원 웨이브폼 구성이 가능하므로, 이를 통해 웨이브폼 간의 간섭을 낮추고 다이버시티를 높여 요구되는 신뢰성을 제공할 수 있어야 한다. 시간, 주파수, 공간으로 할당되는 자원들에 대하여 비직교 다중접속 방식이 사용될 수 있으며 시간에 따라 또는 채널 환경에 따라 비직교성이 변화할 수도 있다 [2].

본 논문에서 소개하는 유니버설 공간-주파수 분할 다중 접속 기술 (universal spatio-frequency division multiple access, USFDMA)은 사용자 기반 공간-주파수 필터를 사용하는 시간, 주파수, 공간 도메인의 3차원 웨이브폼을 제공하며, 채널 환경에 따라 시변적 비직교성을 갖는 공간-주파수 자원 분할 다중 접속 방식을 지원한다. 또한 각 사용자 별 채널부호에 대하여 서로 다른 공간-주파수 자원에 서로 다른 변조방식을 사용할 수 있으며, 이를 통해 요구되는 초저지연 고신뢰 조건과 데이터 전송 용량 조건을 만족시키면서도 효율적인 자원관리가 가능하다.

#### II. 본 론

기지국에서 사용 가능한 부반송파의 개수가  $K$ 이고, 서브스트림(substream)의 개수는  $L$ 이라고 할 때, 기지국에서 할당 가능한 공간-주파수 자원  $(k, l)$ 들의 집합을  $R_{BS}$ 라 하고 사용자  $i$ 에 할당되는 자원을  $R_i$ 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{BS} = \{(k, l) | k = 0, \dots, K-1, l = 0, \dots, L-1\} = \bigcup_{i=1}^{N_{UE}} R_i. \quad (1)$$

이때 사용자  $i$ 의  $j$ 번째 서브스트림에 보내고자 하는 길이  $M$ 의 심볼 벡터를  $\mathbf{c}_{i,j}$ 라 정의하고, 기지국에서의  $(k, l)$  자원 인덱스를 통해 송신하는 심볼 벡터를  $\mathbf{d}_{\mu,k,l}$ 로 표기하면 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\mathbf{d}_{\mu,k,l} = [d_0 \ d_1 \ \dots \ d_{M-1}] = \mathbf{c}_{i(k,l),j(k,l)}, \quad j = 1, \dots, |R_i|. \quad (2)$$

여기서  $i(k, l)$ 과  $j(k, l)$ 은 각각  $(k, l)$  자원 인덱스로부터 해당하는 사용자와 서브스트림을 가리킨다. 이로부터 기지국에서  $\mu$ 번째 블록의 송신신호의 주파수 도메인 신호  $\mathbf{w}_{\mu} \in \mathcal{C}^{L \times MK}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{w}_{\mu} = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{p}_{L,l}^T \mathbf{d}_{\mu,k,l} \mathbf{F}_M \mathbf{P}_{M,MK,k} = [\mathbf{w}_{\mu,0} \ \dots \ \mathbf{w}_{\mu,MK-1}], \quad (3)$$

$$\mathbf{p}_{L,l} = \left[ \underbrace{0, \dots, 0}_{l}, 1, 0, \dots \right], \mathbf{P}_{M,MK,k} = \left[ \underbrace{0_M \ \dots \ 0_M}_k \ \mathbf{I}_M \ \mathbf{0}_M \ \dots \right]. \quad (4)$$

위에서,  $\mathbf{F}_M$ 는 크기  $M$ 인 DFT 매트릭스이며  $\mathbf{p}$ 과  $\mathbf{P}$ 는 각각 순열 사용자 다중화(multiplexing)를 위한 순열 벡터와 순열 매트릭스이다.

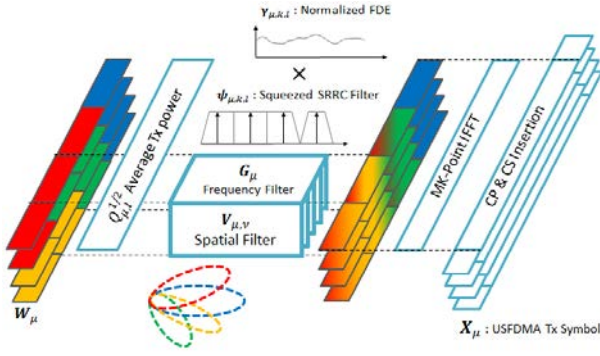


그림 1. USFDMA 송신방식

이로부터  $\mu$  번째 블록의 USFDMA 전송 신호  $X_\mu \in \mathbb{C}^{L \times MK}$ 는 주파수 도메인 신호  $W_\mu$ 에 주파수 필터와 공간 필터를 다음과 같이 적용함으로써 얻어진다.

$$X_\mu = \left( \sum_{v=0}^{MK-1} V_{\mu,v} g_{\mu,v} \circ Q_\mu^{1/2} w_{\mu,v} p_{MK,v} \right) F_{MK}^H, \quad (5)$$

$$G_\mu = \Gamma_\mu \circ \Psi_\mu = \sum_{k=0}^{K-1} \left( \sum_{l=0}^{L-1} p_{L,l}^T \gamma_{\mu,k,l} \circ \psi_{\mu,k,l} \right) P_{M,MK,k}. \quad (6)$$

여기서  $\circ$ 는 아다마르 곱 연산을 나타내고,  $Q_\mu \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 는  $\mu$  번째 블록의 사용자 전력 할당을 나타내는 대각행렬이며,  $G_\mu \in \mathbb{C}^{L \times MK}$ 와  $V_\mu \in \mathbb{C}^{L \times L}$ 는 각각  $\mu$  번째 블록 사용자들의 주파수 도메인 필터와 공간 도메인 필터를 묶어놓은 행렬이다. 주파수 필터 행렬  $G_\mu$ 는 주파수 도메인 등화 필터  $\Gamma_\mu$ 와 펄스성형필터  $\Psi_\mu$ 로 이루어진다. 주기적 전치 부호(cyclic prefix)를 추가하여 D/A 컨버터에 인가되는 시간 도메인 신호 샘플은 다음과 같다.

$$\tilde{X}_\mu = [x_{\mu,MK-N_{CP}} \dots x_{\mu,MK-1} x_{\mu,0} x_{\mu,1} \dots x_{\mu,MK-1}], \quad (7)$$

$$s[m] = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \tilde{X}_\mu[m - \mu(MK + N_{CP})]. \quad (8)$$

전송된 신호가 MIMO 채널을 통과하고 수신단에서 수신 후 다운컨버팅과 A/D 컨버터를 통과한 후 동기를 맞추고 주기적 전치 부호를 제거한 신호를  $Y_\mu = [y_{\mu,0} y_{\mu,1} \dots y_{\mu,MK-1}]$ 라 하면, 이를  $MK$  크기 DFT 하고 수신단 공간필터  $U_\mu$ 와 주파수 필터  $A_\mu$ 를 적용하여 수신 필터 통과 후 신호  $Z_\mu$ 를 얻는다.

$$\begin{aligned} Z_\mu &= \sum_{v=0}^{MK-1} a_{\mu,v} \circ U_{\mu,v} [Y_\mu F_{MK}]_v p_{MK,v} \\ &= \sum_{v=0}^{MK-1} a_{\mu,v} \circ U_{\mu,v} (H_\nu V_{\mu,v} g_{\mu,v} \circ Q_\mu^{1/2} w_{\mu,v} + n_\nu) p_{MK,v}. \end{aligned} \quad (9)$$

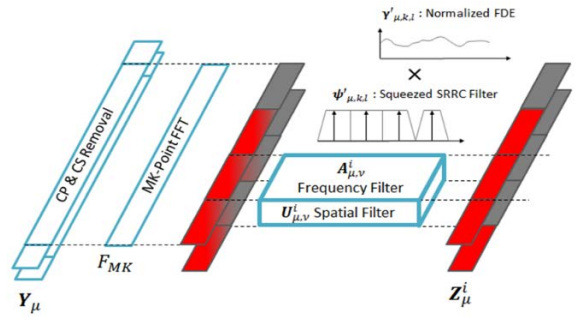


그림 2. USFDMA 수신방식

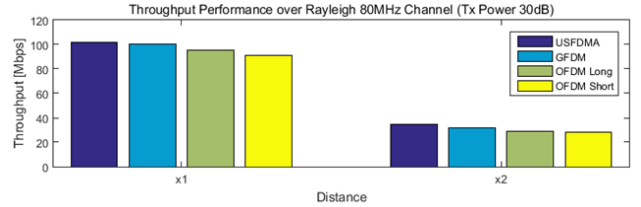


그림 3. 데이터 전송 용량 성능비교

이어서 수신단 공간-주파수 필터 통과 후 신호  $Z$ 를 다음과 같이 처리하면 송신단에서 보낸 데이터를 복조할 수 있다.

$$\hat{c}_{i,j} = \hat{d}_{\mu,k,l} = p_{L,l}^T Z_\mu P_{M,MK,k} F_M^H. \quad (10)$$

[그림3]의 실험결과는 초저지연 고신뢰 고용량 서비스 요구조건을 만족하는 USFDMA와 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing), GFDM (general frequency division multiplexing)의 성능을 비교한 것이다. 시뮬레이션에서 각 사용자는 하나의 기지국으로부터 동일 거리 감쇄를 갖는 레일리 페이딩 채널환경으로 가정하였고 고이동성 (500km/s)과 저이동성 (0km/s)을 갖는 사용자로 절반씩 나누며 도플러 페이딩을 방지하기 위해 USFDMA와 GFDM의 경우 이동성에 따라 심볼 길이가 다른 웨이브폼을 공존시켰다. 길이가 서로 다른 OFDM 심볼은 낮은 대역외 채널(out of band, OOB) 성능으로 공존이 불가능하므로 나누어 실험하였다. 시뮬레이션에서 중심 주파수는 5Ghz, 대역폭은 80MHz, 부반송파간 간격은 16.875KHz로 길이가 긴 심볼은 8192 FFT 크기를 사용하였고 짧은 심볼은 1024 FFT 크기를 사용하였다. OFDM과 GFDM은 심볼레벨 빔형성을, USFDMA에서는 샘플레벨 빔형성을 사용하여 GFDM보다 빔형성 성능이 높으며 이동성에 맞는 웨이브폼 공존으로 OFDM 대비 주어진 조건 하에서 데이터 전송 용량 성능이 높다.

### III. 결론

본 논문에서는 초저지연 고신뢰 고용량 서비스의 요구조건을 만족시킬 수 있는 기술로 유니버설 공간-주파수 분할 다중 접속 기술을 소개하였고, 높은 빔형성 해상도와 좋은 대역외 채널 성능으로 서비스 요구조건에서 GFDM과 OFDM 대비 주파수 효율이 높음을 보였다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신 방송연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [B0126-

15-1012. IoT 환경에서 촉감통신 서비스 실현을 위한 차세대  
초저지연/고효율 무선접속기술 연구]

**참 고 문 헌**

- [1] 5G-PPP White Paper on eHealth, Factories-of-the-Future, Automotive Vertical Sector, The 5G Infrastructure Public Private Partnership, October 2015
- [2] 김종현, 이진녕, 전기준, 최경준, 김광순, “초저지연 고신뢰 서비스를 위한 무선 접속 기술 요구사항”, 한국통신학회 동계종합학술발표회