

物联网中双重非正交多址接入技术的性能分析

李东博^{1,2}, 贾敏¹, 郭庆¹, 顾学迈¹, 刘晓锋¹

(1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室, 河北 石家庄 050081)

摘要: 随着智慧城市、人工智能、边缘计算等技术的快速发展, 未来物联网将面临海量终端接入和频谱资源紧张等问题, 基于高频谱效率的非正交安全接入 (HSESA) 提出一种双重非正交多址接入 (D-NOMA) 技术, 结合了码域的非正交接入和频域的非正交复用, 具有很好的频谱效率性能。发送端和接收端被优化, 多用户通过稀疏码本直接映射到重叠的子载波上。通过在莱斯信道下的性能分析表明, D-NOMA 比 HSESA 具有更好的误码率性能。

关键词: 物联网; 双重非正交多址接入; 非正交安全接入; 频谱效率; 误码率

中图分类号: TP336

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00092

Performance analysis of dual non-orthogonal multiple access technology in the Internet of things

LI Dongbo^{1,2}, JIA Min¹, GUO Qing¹, GU Xuemai¹, LIU Xiaofeng¹

1. School of Electronics and Information, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: With the rapid development of many technologies such as smart city, artificial intelligence and edge computing, the future Internet of things will face the problems of massive terminal access and spectrum resource constraints. A dual non-orthogonal multiple access (D-NOMA) technology based on high spectral efficiency secure access (HSESA) was proposed, which combined non-orthogonal access in the code domain and non-orthogonal multiplexing in the frequency domain, and had good spectral efficiency performance. The sender and receiver were optimized, and multiple users were mapped directly to the overlapping subcarriers through the sparse codebook. The performance analysis under the Rician channel shows that D-NOMA has better bit error rate performance than HSESA.

Key words: Internet of things, dual non-orthogonal multiple access (D-NOMA), high spectral efficiency secure access (HSESA), spectral efficiency, bit error rate

1 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 是一种新兴且有前景的技术, 通过红外识别、射频识别 (RFID, radio frequency identification) 以及导航定位等多类型传感器获取信息, 借助多种通信网络连接海量传感器终端设备实现应用集成、互联互通 (M2M,

machine-to-machine) 和基于云计算的软件即服务 (SaaS, software-as-a-service) 运营等模式, 形成庞大的交织网络^[1-2]。IoT 支持大量不同类型的终端, 这些终端基于不同类型的无线接口, 在资源利用方面有不同需求, 以分布式方式形成综合信息网络, 将现实世界和数字世界日益交汇融合, 构建覆盖全球、无缝连接的网络^[3]。IoT 技术的快速发展对我

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671183, No.61771163); 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室开放基金资助项目 (No.SXX18629T022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671183, No.61771163), The Open Fund Project of CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications (No.SXX18629T022)

国的城市建设具有重要作用，智慧城市的提出对社会发展与进步有重要意义，目前已延伸至交通、安防、农业、环保以及照明等多个行业^[4]中，智慧城市的行业应用如图 1 所示。

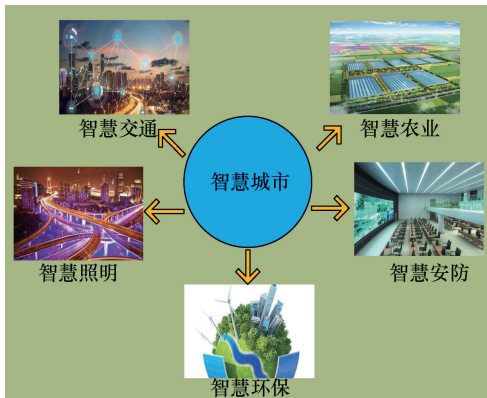


图 1 智慧城市的行业应用

5G 时代的来临对 IoT 的发展提出了更多要求^[5-6]，5G 通信技术使得一些新兴的科技领域有了发展的基础与保障，如无人驾驶、智能安防、人工智能以及边缘计算等领域^[7]。IoT 技术不断革新，使得 IoT 能够更好地为人民服务。

新兴 IoT 领域的发展，产生了大规模智能终端的连接、海量数据访问和异构网络环境，为了满足大量用户同时接入并且实时通信的需求，引发了巨大的频谱资源压力和带宽效率问题^[8]，IoT 接入分布如图 2 所示。



图 2 IoT 接入分布

通信接入技术作为 IoT 发展的重要基础和保障，经历了以频分多址接入（FDMA, frequency division multiple access）为主要技术的第一代无线通信系统（1G）、运用全球移动通信（GSM, global system for mobile communications）和通用分组无线

服务（GPRS, general packet radio service）技术的第二代无线通信系统（2G）、以码分多址接入（CDMA, code division multiple access）为主要技术的第三代无线通信系统（3G）和以正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiple）为主要技术的第四代无线通信系统（4G）等 4 个阶段，随着数据接入需求的增大，通信技术在不断革新并快速发展。

正交频分多址接入（OFDMA, orthogonal frequency division multiple access）是 OFDM 技术的演进，结合了 OFDM 和 FDMA 技术，OFDMA 系统将传输带宽划分成正交的互不重叠的一系列子载波集，将不同子载波集分配给不同用户以实现多址接入。从整个系统带宽来看，每个子载波分配了合适的用户，使得各子载波上的有效信道增益显著提高。

以上都是正交多址接入（OMA, orthogonal multiple access）方案，通过正交接入和正交传输方式进行通信，目前 IoT 的主要接入方式以 OMA 为主。当稀缺带宽资源仅由具有较差信道条件的用户占用时，频谱效率较差。正交资源总量限制了传统 OMA 方案支持的最大用户数，因此，OMA 方案很难满足未来 IoT 的高数据速率、频谱资源和海量接入需求^[9]。

3GPP-LTE（the third generation partnership project long-term evolution）提出了非正交多址接入（NOMA, non-orthogonal multiple access）方案，并且设想它是未来 IoT 的关键技术。与传统的 OMA 方式不同，NOMA 将多个用户分组、信息进行叠加，通过更少的资源块传播。NOMA 的主要特点是在同一时间/频率/码上提供多个用户，与传统的 OMA 相比，频谱效率增益更显著^[10]。

NOMA 通常分为两类，即功率域复用和码域复用。功率域复用由日本通信公司 NTT DoCoMo 提出，其核心思想是在发送端使用叠加编码，在接收端使用连续干扰消除（SIC），在相同的时频资源块上，通过不同功率级在功率域实现多址接入^[11-12]。在码域复用方面，文献[13]提出了低密度签名（LDS, low density signature）；文献[14]中 EETAL 提出了稀疏码多址接入（SCMA, sparse code multiple access）技术，得到学者的深入研究，其可以适应大规模连接，可用于先进通信系统，确保高速、低时延和最大频谱效率；文献[15]提出了多用户共享接入（MUSA, multiuser shared access）。LDS 和

SCMA 都是低复杂度接收技术,但 SCMA 通过引入多维复杂码本/星座提供了超过 LDS 的额外编码增益。目前,业界还提出了一些其他多址方案,如文献[16]提出格分割多址接入(LPMA, lattice partition multiple access);文献[17]提出模式分割多址接入(PDMA, pattern division multiple access);文献[18]提出比特分割多路复用(BDM, bit division multiplexing);文献[19]提出高频谱效率的安全接入(HSESA, high spectral efficiency secure access)等。在 NOMA 方案中,每个正交资源块服务于多个用户,确保了具有不同信道条件的用户可以同时利用相同的带宽资源,从而实现用户公平性和系统频谱效率之间的良好平衡^[20-22]。

目前已经提出的时域和频域上的非正交传输技术,比传统的 OFDM 具有更好的带宽利用效率。频谱高效频分复用(SEFDM, spectrally efficient frequency division multiplexing)和超奈奎斯特(FTN, faster-than-nyquist)是以超过奈奎斯特极限正交性的速率进行传输的两个重要研究方向,用于给定信道无干扰传输,SEFDM 和 FTN 都是通过减

小子载波之间的间隔来实现高频谱效率传输,在相同符号率的带宽情况下,具备显著优势^[23-26]。

本文基于 HSESA 提出一种在频域和码域均具备双重非正交多址接入(D-NOMA, dual non-orthogonal multiple access)特性的方法,该方法包含非正交稀疏码接入和非正交频分复用。通过具有稀疏性的码本映射实现多用户接入更少的资源块,采用非正交重叠副载波用于非正交复用,通过减小子载波之间的频率间隔来增强带宽利用率,D-NOMA 通过改变带宽压缩因子可以在非正交频分复用过程中灵活切换正交性和非正交性,以适用于多种场景。

2 系统模型

在本系统中,基于文献[19]提出了 D-NOMA,对 HSESA 的发送端和接收端进行了优化,省去安全映射和安全解映射,将 HSESA 发送端的 4 点映射改为映射到多维星座空间中。假设 J 个用户共享 N 个非正交子载波,且 $J > N$ 。D-NOMA 系统模型框架如图 3 所示。

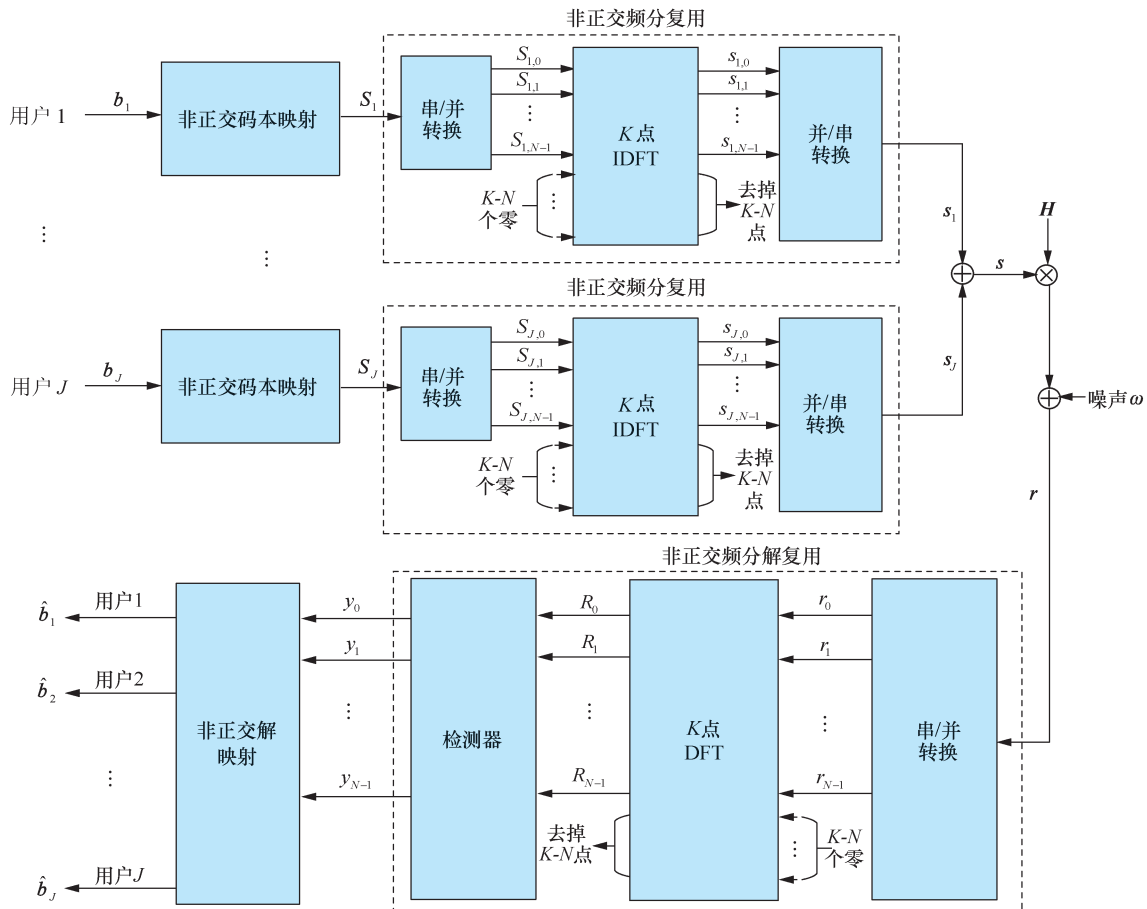


图 3 D-NOMA 系统模型框架

2.1 非正交码本映射

D-NOMA 的编码器被定义为从 $m = \log_2 |\mathfrak{M}|$ 比特到具有 \mathfrak{M} 尺寸的 N 维复数码本的映射。定义 $\mathbf{b}_j = [b_{j,0}, b_{j,1}, \dots, b_{j,m-1}]^T$ 和 $\mathbf{x}_j = [x_{j,0}, x_{j,1}, \dots, x_{j,N-1}]^T$ 分别表示第 j 个用户的输入二进制位和多维码字。

D-NOMA 体制的固有特性限制了每个用户可以访问的子载波数量，这意味着用户层需要以稀疏方式传播信号。因此，该功能可以被表示为

$$\mathbf{d}_j = p_j(\mathbf{b}_j) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{d}_j = [d_{j,0}, d_{j,1}, \dots, d_{j,L-1}]^T$ 是第 j 个用户发送的 \mathbf{b}_j 对应的 L 维星座点， p_j 是第 j 个用户的星座函数。然后，通过映射矩阵 \mathbf{V} 将 L 维度星座点映射到 N 维度码字，可以实现

$$\mathbf{S}_j = \mathbf{V}\mathbf{d}_j \quad (2)$$

其中， \mathbf{V} 是通过将 $N-L$ 个零行插入 L 维单位矩阵而构成的 $N \times L$ 矩阵。定义 $N > L$ 以确保码字的稀疏性，

$\mathbf{S}_j = [S_{j,0}, S_{j,1}, \dots, S_{j,N-1}]^T$ 是 N 维列向量。

2.2 非正交频分复用

\mathbf{S}_j 通过 N 个共享的子载波传输。在非正交复用过程中， K 点离散傅里叶逆变换 (IDFT, inverse discrete Fourier transform) 用于产生 D-NOMA 时间信号， $K-N$ 个零被填充在 \mathbf{S}_j 后。 K 点离散傅里叶变换 (DFT, discrete Fourier transform) 块的输出被截断，只剩下前 N 个样本，而剩余样本被丢弃。

生成的基带 D-NOMA 采样信号矢量可以表示为 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_J]^T$ ，并且第 j 个用户的采样信号矢量可以表示为 $\mathbf{s}_j = [s_{j,0}, s_{j,1}, \dots, s_{j,N-1}]^T$

$$\mathbf{s}_j = \mathbf{F}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{S}_j^T & \mathbf{0}_{(K-N) \times 1}^T \end{bmatrix} = \mathbf{F}_N^{-1} \cdot \mathbf{S}_j \quad (3)$$

其中， \mathbf{F}^{-1} 是标准的 K 点 IDFT 矩阵， \mathbf{F}_N^{-1} 是 \mathbf{F}^{-1} 的前 N 行和前 N 列。 \mathbf{F}^{-1} 的第 k 行和第 n 列元素的定义如下

$$F_{k,n}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j2\pi \frac{kn}{K}}, 0 \leq n \leq K-1, 0 \leq k \leq K-1 \quad (4)$$

第 j 个用户的第 n 个发射信号矢量采样可以表示为

$$s_{j,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} S_{j,m} e^{j2\pi \frac{kn}{N} \alpha}, 0 \leq n \leq N-1, 0 \leq k \leq N-1 \quad (5)$$

其中， $\alpha = N/K$ 表示带宽压缩因子。假定采样频率

被选择为 $F_s = N\Delta f$ ，其中，D-NOMA 的子载波间隔为 Δf ，则在一个 D-NOMA 信号周期 T 中将存在 N 个样本，并且 $\Delta f = \alpha/T$ 。当 $\alpha=1$ 时， $\Delta f = 1/T$ 就是一个正交方案。

2.3 非正交频分解复用

时域信号 \mathbf{s} 被调制，然后通过莱斯信道发送。由建筑物、树木或其他反射物造成的反射波形成的多径信号分量，与直射波信号分量合成的接收信号的包络服从莱斯分布，其概率密度函数为

$$f(r, z, \sigma) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2 + z^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{rz}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

其中， r 是接收信号的包络， z 是直射波信号的幅度， σ^2 是平均多径功率， $I_0(\cdot)$ 是第一类零阶修正贝塞尔函数。

从 D-NOMA 接收器中莱斯信道接收的时域采样信号 \mathbf{r} 可以表示为

$$\mathbf{r} = \sum_{j=1}^J \mathbf{h}_j \cdot \mathbf{s}_j + \omega \quad (7)$$

其中， \mathbf{h}_j 是第 j 个用户的信道状态信息， $\mathbf{h}_{j,n}$ 代表第 j 个用户在第 n 个子载波上的信道信息，本文主要考虑莱斯信道下的小尺度衰落因素，莱斯因子 $K_j = 2z^2 / \sigma^2$ ， ω 代表高斯噪声。

时域采样信号 $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_{N-1}]^T$ 通过在时域采样信号的尾部后插入 $K-N$ 个零，来实现 DFT。

类似地，提取 DFT 块输出对应前 N 个样本以进一步解复用。因此，频域接收信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= [R_0, R_1, \dots, R_{N-1}]^T \\ \mathbf{R} &= \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{r}^T & \mathbf{0}_{(K-N) \times 1}^T \end{bmatrix} = \mathbf{F}_N \mathbf{r} \end{aligned} \quad (8)$$

其中， \mathbf{F} 是 K 点的 DFT 矩阵， \mathbf{F}_N 是 \mathbf{F} 的前 N 列。 \mathbf{F} 的第 k 行和第 n 列元素定义为

$$F_{k,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j2\pi \frac{kn}{K}}, 0 \leq n \leq N-1, 0 \leq k \leq N-1 \quad (9)$$

由于 D-NOMA 系统中子载波之间的正交性损失而导致的内插失真，需要额外的解调器消除。ID 检测方案被应用于 D-NOMA 系统，来缓解由于复用重叠载波产生的严重的信道间干扰 (ICI, inter-channel interference)。

ID 检测算法是针对由线性或非线性操作引起失真的补偿方法，以消除插值失真。 \mathbf{R} 是由失真矩

阵 \mathbf{G} 描述的失真操作，即 $\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{R}$ ，然后 \mathbf{R} 可以从失真版本重构。这种迭代方法可以在数学上表示为

$$\mathbf{y} = \lambda \mathbf{R}_0 + (\mathbf{I} - \lambda \mathbf{G}) \mathbf{R}_{n-1} \quad (10)$$

其中， λ 是松弛参数， \mathbf{y} 是 n 次迭代后的输出， \mathbf{R}_{n-1} 是 $n-1$ 次迭代后的输出， \mathbf{I} 表示酉矩阵。对于这种迭代方法，如果失真功率小于信号功率，即 $\|\mathbf{R} - \mathbf{G}\mathbf{R}\|_2 < \|\mathbf{R}\|_2$ ，则可以通过迭代方法在无限次迭代后重建期望信号；如果是非线性失真操作，正确选择松弛因子 λ 可以加速重建。

2.4 非正交码解映射

频域信号 \mathbf{R} 由 ID 检测器转换成 $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$ ， \mathbf{y} 通过并/串转换被发送到 D-NOMA 系统的解码器。

解码器采用消息传递算法 (MPA, message propagation algorithm)，此算法用于在因子图的帮助下降低计算复杂度。MPA 通过在用户层和子载波之间传递星座点的外在信息来迭代更新与因子图中的边缘相关联的信念，消息是双向的。

假定 $I_{v_j \rightarrow r_n}$ 和 $I_{r_n \rightarrow v_j}$ 是从第 j 个用户层到第 n 个子载波上传递的消息以及从第 n 个子载波传递到第 j 个用户层的消息。消息在 q 次迭代中反复更新，更新进度可以通过式(11)和(12)来表示

$$I_{r_n \rightarrow v_j}^q(\tilde{\mathbf{x}}_j) = \sum_{\substack{\mathbf{X} \in \mathcal{X}^{[\eta_n]} \\ \mathbf{x}_j = \tilde{\mathbf{x}}_j}} \mathbf{M}_n(\mathbf{X}) \prod_{\delta \in \eta_n / j} (I_{v_\delta \rightarrow r_n}^{q-1}(\mathbf{x}_\delta)) \quad (11)$$

$$I_{v_j \rightarrow r_n}^q(\tilde{\mathbf{x}}_j) = \text{normalize}(\prod_{\delta \in \varepsilon_j / n} (I_{r_\delta \rightarrow v_j}^q(\tilde{\mathbf{x}}_j))) \quad (12)$$

其中， $\mathbf{X}^{[\eta_n]} = \{\mathcal{C}_{\eta_{n,1}} \times \mathcal{C}_{\eta_{n,2}} \times \dots \times \mathcal{C}_{\eta_{n,d_c}}\}$ 和 \mathbf{X} 是 $\mathbf{X}^{[\eta_n]}$ 的组合， $\delta \in \varepsilon_j / n$ 表示除去第 j 个用户与非正交子载波 n 连接用户的集合， η_n 表示与非正交子载波 n 连接用户的集合， r_n 表示函数节点， r_δ 表示集合 δ 内的函数节点， v_i 表示变量节点， v_δ 表示集合 δ 内的变量节点， \mathbf{x}_δ 表示占用第 n 个非正交子载波用户的发送码字集合， $\tilde{\mathbf{x}}_j$ 表示最佳估计码字， $\text{normalize}()$ 表示归一化， ε_j 表示与用户 j 连接非正交子载波的集合，同时有

$$\mathbf{M}_n(\mathbf{X}) = \exp\left(-\frac{1}{N_0} \left(y_n - \sum_{j \in \eta_n} x_{j,n}\right)\right) \quad (13)$$

其中， N_0 表示噪声平均功率，若迭代次数达到最大值或用户层的码字收敛到特定水平，则算法将停止并估计每个用户层最可靠的码字，可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}}_s^m = \arg \max_{\mathbf{x}_s \in \mathcal{C}_s} \left(\prod_{\delta \in \varepsilon_j} (I_{r_\delta \rightarrow v_s}^m(\mathbf{x}_s)) \right) \quad (14)$$

3 仿真分析

本节给出了在 IoT 莱斯信道下 D-NOMA 上行链路的仿真分析，D-NOMA 接收端为 ID 结合 MPA 检测方案。给出了 D-NOMA 在不同带宽压缩因子的情况下，与 OFDMA、HSESA 和 SCMA 的误码率 (BER, bit error ratio) 性能比较和频谱效率性能比较，其中，SCMA 为 D-NOMA 带宽压缩因子为 1 时的情况。

为了公平比较，采用相同的带宽，D-NOMA 的带宽压缩因子 $\alpha = N/K$ ， K 为快速傅里叶变换 (FFT, fast Fourier transform) 或快速傅里叶逆变换 (IFFT, inverse fast Fourier transform) 点数，子载波带宽为 $\alpha \cdot \Delta f_{\text{OFDM}}$ ， Δf_{OFDM} 为 OFDMA 的子载波间隔，D-NOMA 的过载因子为 $OV = J/N$ ，一个子载波对应的用户数为 $d_v \cdot J/N$ 。

BER 性能比较如图 4 所示。其中，OFDMA 采用 QPSK 方式调制，D-NOMA 和 HSESA 的子载波数量为 4，用户数量为 6，所以过载因子为 150%，参数设置主要参考文献[14]和文献[19]。SCMA 为 D-NOMA 的带宽压缩因子 $\alpha = 1$ 时的情况。D-NOMA 采用 DL 结合 MPA 作为接收端的检测方案，DL 和 MPA 的迭代次数均为 6。由仿真结果可知，当 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 4/5$ 时，D-NOMA 比 HSESA 的 BER 性能有所提升。

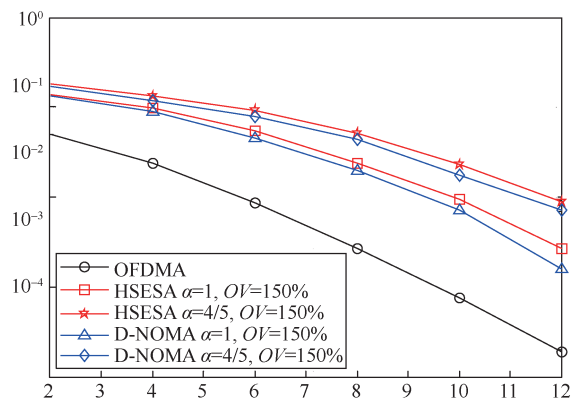


图 4 BER 性能比较

本文涉及实数运算和复数运算，以实数浮点数的数学运算数目 (Flops)，即实数加法和乘法的数目总和对复杂度进行定量，一次复数乘法相当于 6 Flops，一次复数加法相当于 2 Flops。

在 MPA 中, 单次迭代 $I_{v_j \rightarrow r_n}$ 的 Flops 为

$$\text{Flops}_{j \rightarrow n} = Jd_v M(d_v - 2) \quad (15)$$

其中, 变量 d_v 为连接一个用户层的子载波数量, 变量 d_c 为连接一个子载波的用户层数量。单次迭代 $I_{r_n \rightarrow v_j}$ 的 Flops 为

$$\text{Flops}_{n \rightarrow j} = Nd_c M^{d_c} a \quad (16)$$

其中, $a = 3d_c + 5$, 对于 I_{MPA} 次迭代, 每检测一个符号需要的 Flops 为

$$\text{Flops}_{\text{MPA}} = I_{\text{MPA}} (Nd_c M^{d_c} a + Jd_v M(d_v - 2)) \quad (17)$$

ID 检测的计算复杂度可以表示为 $N^3 + (N^2) \cdot (I_{\text{ID}} + 1) + N$ 复乘和 $N^3 + (N^2) \cdot I_{\text{ID}}$ 复加, 其中, v 表示迭代次数。则 ID 的 Flops 为

$$\text{Flops}_{\text{ID}} = 8N^2 (I_{\text{ID}} + 1) + 6N(N + 1) \quad (18)$$

不同算法下的计算量如表 1 所示, 用计算复杂度缩小比例 (CCRR) 衡量算法的复杂度性能, CCRR 定义为

$$\text{CCRR}(\text{Algorithm}) = \frac{\text{Algorithm 计算量}}{\text{信息传递算法计算量}} \quad (19)$$

| 检测方案 | 计算量 |
|--------|---|
| D-NOMA | $I_{\text{MPA}} (Nd_c M^{d_c} a + Jd_v M(d_v - 2) + (d_c - 2)u) + (u - J) + 8N^2 (I_{\text{ID}} + 1) + 6N(N + 1)$ |
| HSESA | $I_{\text{MPA}} (Nd_c M^{d_c} a + Jd_v M(d_v - 2) + (d_c - 2)u) + (u - J) + N^2 M + 8N^2 (I_{\text{ID}} + 1) + 6N(N + 1)$ |

由上述定义可知, $\text{CCRR}(\text{MPA})=1$, 并且 CCRR 的值越小, 则说明该算法的复杂度越低。同时仿真得出三维复杂度对比图, 复杂度性能比较如图 5 所示。其中, 用户数为 6, 载波数为 4, 码本尺寸 M 为 4, d_v 为 2, d_c 为 3, 非零项 u 为 12。可以看出, D-NOMA 比 HSESA 的复杂度有一定降低。

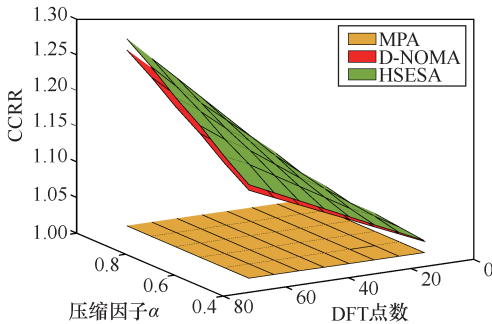


图 5 复杂度性能比较

假设信号带宽被选择为 $B = N\Delta f$, 其中, Δf 是 D-NOMA 的子载波间隔, 则在一个 D-NOMA 信号周期 T 内存在 N 个样本, 并且 $\Delta f = \alpha/T$ 。为了在不同系统之间进行公平比较, 所有考虑的系统都应使用相同的信道带宽 B 。为此, D-NOMA 的子载波数量应设置为

$$N = N_{\text{OFDM}} / \alpha \quad (20)$$

D-NOMA 系统的吞吐量为

$$\begin{aligned} C &= \Delta f \sum_{n=1}^N \log(1 + \gamma_n) \\ &= \Delta f \sum_{n=1}^N \log \left(1 + \frac{\sum_{j=1}^J h_{j,n}^2 \sigma_{j,n} p_{j,n}}{N_0 + P_I} \right) \\ &= N\Delta f \log \left(1 + \frac{d_c \cdot p / d_v \cdot \sum_{j=1}^J h_{j,n}^2}{N_0 + P_I} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, P_I 是子载波间干扰的平均功率, 第 j 个用户的平均功率可以定义为 p_j , 并且 $p_1 = \dots = p_j = \dots = p_J = p$ 。

因此, D-NOMA 系统的频谱效率为

$$SE = \log \left(1 + \frac{d_c \cdot p / d_v}{N_0 + P_I} \right) \quad (22)$$

不同带宽压缩因子下的 D-NOMA 频谱效率如图 6 所示, 考虑不同带宽压缩因子 α 情况下, D-NOMA 和 OFDMA 在上行链路的频谱效率性能进行比较。OFDMA 的子载波带宽是 15 kHz。因此, D-NOMA 的子载波带宽是 15α kHz。每个用户的发射功率为 1 dBm, OFDMA 子载波的数量为 4, 连接一个用户层的子载波数量为 2。D-NOMA 的增益明显, 且随着带宽压缩因子的增加而增长。

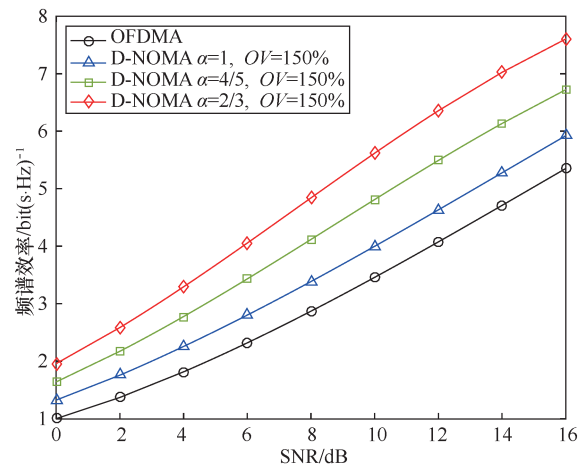


图 6 不同带宽压缩因子下的 D-NOMA 频谱效率

过载因子 (OV) 是系统的重要指标, 受码本的限制, 本系统 OV 取 150%。对于相同带宽, D-NOMA 的频谱效率性能比 OFDMA 更好。对于不同带宽压缩因子 $\alpha=1$ 、 $\alpha=4/5$ 和 $\alpha=2/3$, 表明了 D-NOMA 的频谱效率。从图 6 可以看出, D-NOMA 的较小带宽压缩因子具有更好的频谱效率性能。

4 结束语

本文基于 HSESA 提出了具有双重非正交特性的多址接入方法, 该方法能够解决未来 IoT 频谱资源紧缺、多用户接入等问题。D-NOMA 结合非正交码映射和非正交频分复用, 在相同载波数下支持多用户接入, 通过减少子载波间的频率间隔来提高带宽利用率。同时, D-NOMA 可以通过改变带宽压缩因子在正交与非正交间进行切换, 采用 IoT 的莱斯信道模型对上行链路进行分析。通过仿真可以看出, D-NOMA 具有比 HSESA 更好的 BER 性能, 同时复杂度更低。

参考文献:

- [1] STANKOVIC, JOHN A. Research directions for the Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 3-9.
- [2] RAZZAQUE M A, MILOJEVIC-JEVRIĆ M, PALADE A, et al. Middleware for Internet of things: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 3(1):70-95.
- [3] AL-FUQAHA, GUIZANIM, MOHAMMADIM, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [4] ZANELLA A, BUI N, CASTELLANI A, et al. Internet of things for smart cities[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 22-32.
- [5] PALATTELLA M, DOHLER M, GRIECO A, et al. Internet of things in the 5G era: enablers, architecture and business models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(3): 510-527.
- [6] AGI WAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(3):1617-1655.
- [7] LIN J, YU W, ZHANG N, et al. A survey on Internet of things: architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(5): 1125-1142.
- [8] LIEN S Y, CHEN K C, LIN Y. Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(4): 66-74.
- [9] XU L D, HE W, LI S. Internet of things in industries: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2233-2243.
- [10] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [11] HIGUCHI K, KISHIYAMA Y. Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink[C]//Vehicular Technology Conference. IEEE, 2014.
- [12] HAN S F, SUN Q. Energy efficiency and spectrum efficiency Co-design: from NOMA to network NOMA[J]. IEEE MMTTC E-Letter, 2014, 9(5): 21-24.
- [13] HOSHIA R R, WATHAN F P, TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(4): 1616-1626.
- [14] NIKOPOUR H, BALIG H H. Sparse code multiple access[C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2013: 332-336.
- [15] YUAN Z, YU G, LI W, et al. Multi-user shared access for Internet of things[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2016: 1-5.
- [16] FANG D, HUANG Y C, DING Z, et al. Lattice partition multiple access: a new method of downlink non-orthogonal multiuser transmissions[C]//2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2016: 1-6.
- [17] CHEN S, REN B, GAO Q, et al. Pattern division multiple access—a novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185-3196.
- [18] HUANG J, PENG K, PAN C, et al. Scalable video broadcasting using bit division multiplexing[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2014, 60(4): 701-706.
- [19] JIA M, LI D, YIN Z, et al. High spectral efficiency secure communications with non-orthogonal physical and multiple access layers[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018(99): 1.
- [20] DING Z, LIU Y, CHOI J, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2):185-191.
- [21] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C]//2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2013: 1-5.
- [22] TIMOTHEOUS S, KRIKIDIS I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10): 1647-1651.
- [23] RODRIGUES M, DARWAZEH I. A spectrally efficient frequency division multiplexing based communications system[C]//8th OFDM Workshop. IEEE, 2003: 48-49.
- [24] JIA M, YIN Z, GUO Q, et al. Downlink design for spectrum efficient IoT network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017(99): 1.
- [25] ANDERSON J B, RUSEK F, OWALL V. Faster-than-nyquist signal-

ing[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(8): 1817-1830.

- [26] DASALUKUNTE D, RUSEK F, OWALL V. Multicarrier faster-than-nyquist transceivers: hardware architecture and performance analysis[C]//IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. IEEE, 2011, 58(4): 827-838.

[作者简介]



李东博（1989- ），男，黑龙江哈尔滨人，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院博士生，主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。



贾敏（1982- ），女，黑龙江哈尔滨人，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院副教授、博士生导师，主要研究方向为卫星、无线通信、天地一体化。



郭庆（1964- ），男，黑龙江哈尔滨人，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授、院长、博士生导师，主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。



顾学迈（1957- ），男，黑龙江哈尔滨人，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为卫星和无线通信、天地一体化。



刘晓锋（1961- ），男，黑龙江哈尔滨人，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院教授、硕士生导师，主要研究方向为卫星无线通信、天地一体化。