

基于滤波器组多载波的多点协作通信系统

Coordinated Multipoint Communication System Based on Filter Bank Multicarrier

宋国超/SONG Guochao
陈达/CHEN Da
江涛/JIANG Tao

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)
(Huazhong University of Science and
Technology, Wuhan 430074, China)

作为经典的多载波调制技术, 正交频分复用 (OFDM) 已经成为主流宽带通信的标准, 如长期演进 (LTE) 和 IEEE 802.11ac 等。通过在信号头部加入足够长的循环前缀 (CP), CP-OFDM 可以有效对抗多径衰落, 将频率选择性宽带信道转化为一组并行平坦窄带子信道, 降低信道估计与均衡实现复杂度。但是, CP-OFDM 还存在一些问题, 例如: CP 的加入降低了频谱利用率, 也增加了发送功率开销; CP-OFDM 信号基于矩形脉冲成形, 频谱带外泄漏较大, 难以对抗因时间或频率偏差导致的干扰, 要求不同用户之间的信号严格同步。

作为 OFDM 的升级技术, 最近兴起的滤波器组多载波 (FBMC) 被研究者认为是未来无线通信中最具潜力的多载波技术之一^[1-3]。FBMC 使用具有良好时频聚焦特性的滤波器, 信号带外泄漏极低, 用户间无需保护频

收稿日期: 2017-04-17

网络出版日期: 2017-05-03

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2015AA01A710)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 03-0024-005

摘要: 提出了一种基于滤波器组多载波 (FBMC) 的多点协作 (CoMP) 传输技术, 并搭建了基于软件无线电设备 (USRP) 的 FBMC-CoMP 通信系统原型验证平台, 认为通过设计预编码可以消除小区间干扰。为验证所提出 FBMC-CoMP 传输技术及预编码设计的可行性, 在原型验证平台上进行了 FBMC-CoMP 异步能力及误码率等性能的测试。测试结果显示: FBMC-CoMP 能够抵抗的最大基站延时差为 0.7 us, 此时通信误码率小于 0.003。

关键词: FBMC; CoMP; 异步传输; 原型验证平台

Abstract: In this paper, a new coordinated multipoint (CoMP) transmission technology based on filter bank multicarrier (FBMC) is proposed, and a prototype verification platform for FBMC-CoMP communication system using the universal software radio peripheral (USRP) is built. And the co-channel interference among cell edge users can be eliminated by the precoding design. In order to verify the FBMC-CoMP transmission technology and the precoding, a test on the asynchronous ability and the bit error rate of FBMC-CoMP is made. Experiment results show that the maximum base station delay difference which FBMC-CoMP could resist to is 0.7 us, and the bit error rate is less than 0.003.

Keywords: FBMC; CoMP; asynchronous transfer; prototype verification platform

带, 提高了频谱利用率, 并且 FBMC 不需要 CP 也可以有效抵抗多径衰落。此外, FBMC 基于非正交处理, 不要求严格的信号同步, 特别适用于异步通信场景, 例如: 上行非同步接入、认知无线电^[4]及多点协作 (CoMP) 等。

CoMP 传输技术在第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 的演进的 LTE (LTE-A) 方案中被提出, 是一种能够消除小区间干扰的新技术^[5], 同时也在第 5 代移动通信 (5G) 中备受关注^[5-6]。CoMP 也是一种多输入多输出 (MIMO) 技术, 利用空间信道上的差异进行信号传输, 通过多基站联合预编码, 为小区边缘用户提供更高的服

务质量, 能够大幅提高无线网络容量。但是, CoMP 基于非同步处理, 基站信号到达不同用户的时间存在很大差异。如果采用 OFDM 作为调制技术, 为保持信号的正交性, 必须采用很长的 CP, 从而严重降低系统容量。考虑到 FBMC 信号不需要严格同步的技术优势, 我们认为将 FBMC 与 CoMP 结合是一种极具潜力的未来通信技术^[7]。

1 FBMC 技术原理

FBMC 采用时频聚焦特性良好的原型滤波器 (例如: IOTA、PHYDYAS 等^[8-9]), 相比 OFDM 具有更低的带外

频谱泄漏和更高的频谱利用率。

图1是FBMC的系统原理,调制过程可分为下面3个步骤:

(1)发送端的数据经过串并转换后,进行脉冲幅度调制(PAM)生成实数符号 $a_{m,n}$,其中 m 为第 m 个子载波, n 为第 n 个PAM符号。PAM符号周期为 $MT_s/2$, M 为子载波个数, T_s 为采样间隔。

(2)将 $a_{m,n}$ 乘以相位旋转因子 $e^{\frac{j(m+n)\pi}{2}}$ 后进行 $M/2$ 点上采样,再将上采样得到的数据通过原型滤波器 $g[l]$ 。 $g[l]$ 具有实偶对称性,其长度为 KM ,其中 K 为重叠因子。

(3)将通过滤波器的信号乘以调制因子 $e^{\frac{j2\pi mi}{M}}$,对不同子载波求和后发送出去。

经过上述操作后,发送端的信号 $s[i]$ 可表示为:

$$s[i] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} a_{m,n} \underbrace{g[i - \frac{nM}{2}] e^{\frac{j2\pi mi}{M}} e^{\frac{j(m+n)\pi}{2}}}_{g_{m,n}(i)} \quad (1)$$

在理想信道下,接收信号与发送信号相同,即 $r[i] = s[i]$ 。FBMC的解调过程与调制过程类似,这里不再赘述。接收端得到的解调符号可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{m_0, n_0} &= \sum_{k=0}^{\infty} r[k] g[k - \frac{n_0 M}{2}] e^{-\frac{j2\pi m_0 k}{M}} e^{-\frac{j(m_0 + n_0)\pi}{2}} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} s[k] g[k - \frac{n_0 M}{2}] e^{-\frac{j2\pi m_0 k}{M}} e^{-\frac{j(m_0 + n_0)\pi}{2}} \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} a_{m,n} g_{m,n}[k] g_{m_0, n_0}^*[k] \end{aligned} \quad (2)$$

为了完美恢复出原始输入符号,滤波器组 $g_{m,n}[k]$ 需要满足如下条件:

$$\zeta_{m,n}^{m_0, n_0} = \sum_{k=0}^{\infty} g_{m,n}(k) g_{m_0, n_0}^*(k) = \begin{cases} 1, & (m_0, n_0) = (m, n) \\ \text{纯虚数}, & (m_0, n_0) \neq (m, n) \end{cases} \quad (3)$$

在满足上述条件时,解调符号 \hat{a}_{m_0, n_0} 可以改写为:

$$\hat{a}_{m_0, n_0} = a_{m_0, n_0} + \underbrace{\sum_{\substack{(m,n) \neq (m_0, n_0) \\ j a_{m,n}^{m_0, n_0}}}}_{j a_{m,n}^{m_0, n_0}} \quad (4)$$

其中 $j a_{m,n}^{m_0, n_0}$ 为纯虚数。可以看到:对

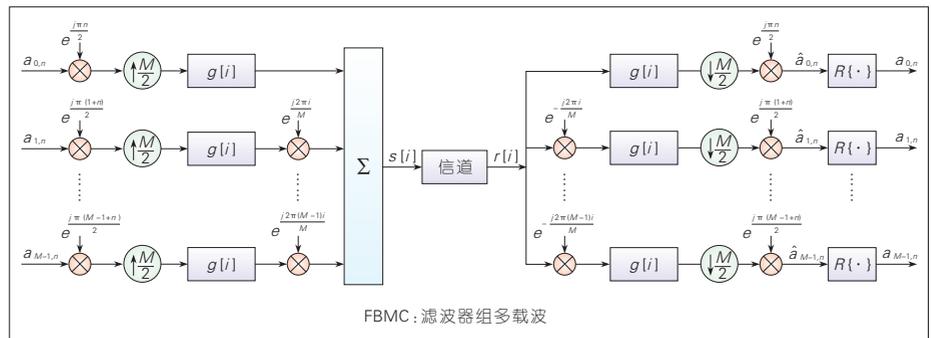


图1 FBMC原理

\hat{a}_{m_0, n_0} 进行取实操作 $\Re\{\cdot\}$ 后就能够完美恢复出原始输入符号 a_{m_0, n_0} 。

为了降低实现复杂度或提升解调性能,也可以借助于快速傅里叶变换将FBMC用频域扩展或者多相滤波器的方式实现^[10-11]。

2 FBMC-CoMP

2.1 FBMC-CoMP传输技术

为充分结合FBMC与CoMP的优势,我们提出基于FBMC的CoMP传输技术,其中所有基站使用FBMC作为调制技术,并同时同频向用户传输数据。基于FBMC-CoMP传输技术的通信场景如图2所示,其中我们定义处在小区面积70%以外的用户为小区边缘用户。不难看出小区边缘用户面临着通信质量降低的问题:小区

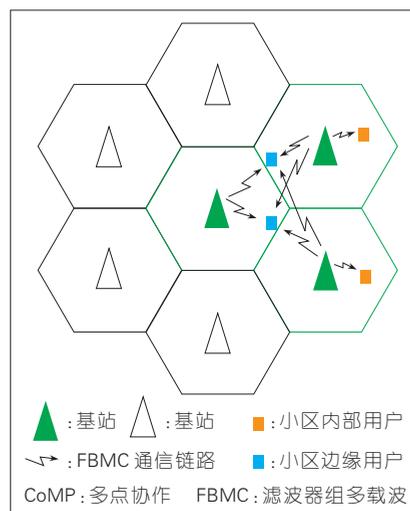


图2基于FBMC-CoMP传输技术的通信场景

边缘用户离本小区基站与其他小区基站距离相近,其他小区的基站会对小区边缘用户产生同频干扰,导致小区边缘用户的信干比较低;边缘用户所在不同基站的地理位置差异,不同小区的基站信号到达边缘用户存在不同时延,使信号之间正交性变差,进一步降低小区边缘用户的信干比。为克服上述问题,FBMC-CoMP传输技术利用FBMC波形的非完全正交特性,通过基站控制器对不同地理位置的基站信号进行联合处理,使得原来相互独立的通信链路组合成协作簇。

2.2 FBMC-CoMP通信系统原型验证平台

由于FBMC-CoMP信道信息状态的反馈、馈线的布置以及数据集中处理都具有极大挑战性,还未见FBMC-CoMP通信系统的原型验证平台。本研究团队经过多年技术攻关,搭建了一套基于软件无线电设备(USRP)的FBMC-CoMP通信系统原型验证系统,并验证了FBMC-CoMP的技术优势。FBMC-CoMP通信系统参数配置如表1所示。

2.2.1 硬件架构

基于USRP原型验证平台的硬件架构如图3所示,其中主要包括:基站控制器、基站、用户3个部分。整个系统可看成一个 $12 \times N_r$ 的分布式MIMO系统,其中 N_r 为用户个数。

基站控制器主要使用美国国家

▼表 1 FBMC-CoMP 通信系统参数配置

参数	配置
基站数	3 个
用户数	4 个
中心频率	3 GHz
滤波器类型	Phydyas
子载波个数	64 个
基站天线数	4 根
用户天线数	1 根
采样率	20 MHz
调制方式/码率	16 QAM 1/2
符号个数	20 个

QAM: 正交振幅调制

仪器公司(NI)的外围组建互连总线(PXIe)机箱搭建而成,机箱内插有一些不同的功能模块,其中包括主频为 2.3 GHz 8 核的嵌入式控制器 PXIe-8880,负责完成各个基站的调度、数据的汇集、预编码矩阵求解等;现场可编程门阵列(FPGA)协处理单元 Flex 可支配的输入输出(RIO),完成 MIMO 处理,如联合预编码、MIMO 检测等;PXI 数据路由器 CPS-8910,负责基站数据汇总与分发;时频同步器 6674T,用作基站的频率同步以及定时同步。

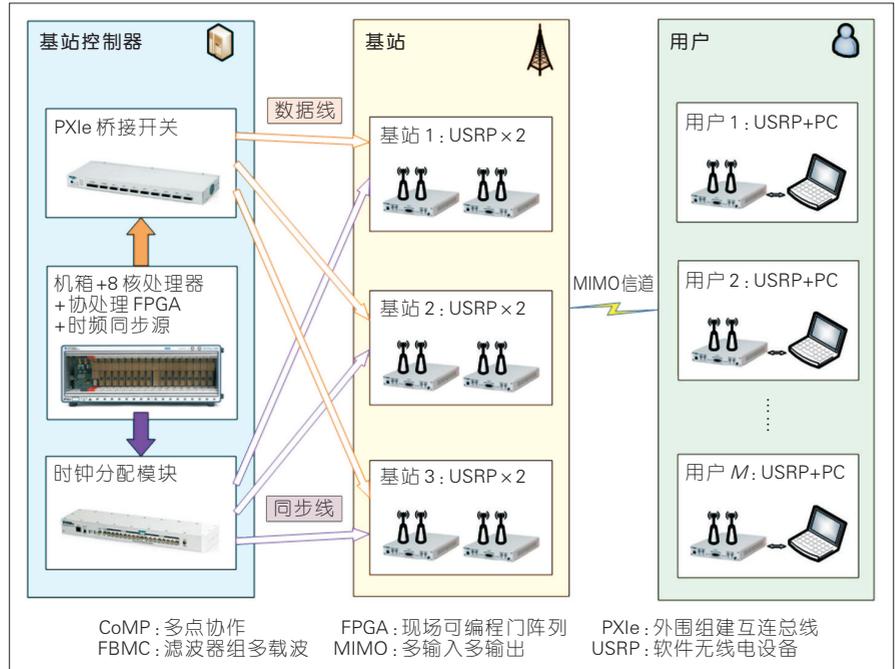
原型验证平台包含 3 个基站,每个基站由 2 个嵌有高性能 FPGA 处理单元的 USRP 组成,每个 USRP 则包含了 2 个射频单元,每个基站一共有 4 根发送天线。

用户由 1 台 USRP 与 1 台计算机组成,共有 4 个单天线用户。

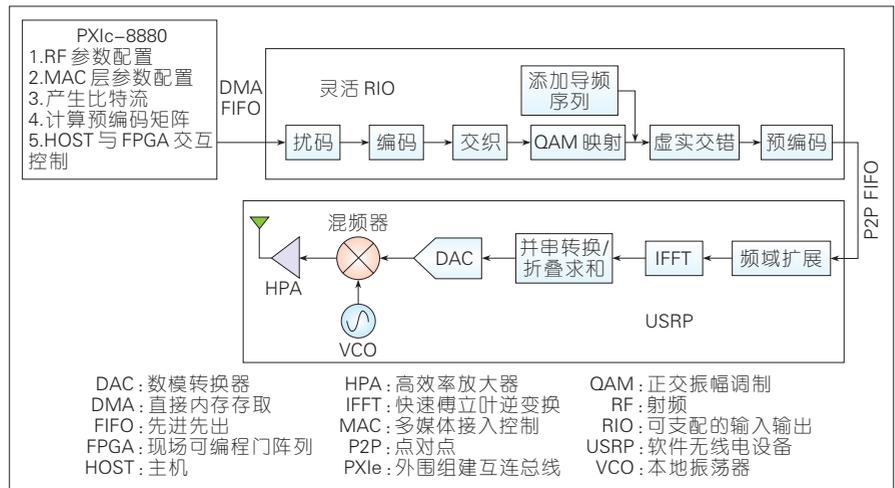
2.2.2 软件架构

FBMC-CoMP 通信系统的软件架构如图 4 所示,软件架构取决于硬件,同样将数据流进行分层处理。

在基站控制器中,通过 PXIe 总线完成射频参数的配置、多媒体接入控制(MAC)层数据的配置、预编码矩阵的计算,以及与 Flex RIO 和 USRP 的交互处理等操作,基站控制器与 Flex RIO 间的传输是通过直接内存存取(DMA)先进先出(FIFO)队列实现。



▲图 3 FBMC-CoMP 通信系统原型验证平台的硬件架构



▲图 4 FBMC-CoMP 通信系统原型验证平台的软件架构

Flex RIO 需要完成扰码、信道编码、正交振幅调制(QAM)映射及联合预编码等操作,我们分别使用了 FBMC-CoMP-ZF 算法与 FBMC-CoMP-MMSE 算法完成对基站数据的预编码操作, Flex RIO 预编码后的数据通过点对点(P2P)的队列传送给基站中的 USRP。

在基站 USRP 的 FPGA 中完成 FBMC 波形的调制及数字上变频,然后将 FPGA 生成的数字中频信号依次

经过数模转换与频谱搬移后由天线发送出去。我们使用 Phydyas 滤波器,重叠因子设置为 4,并利用频域扩展的方式实现 FBMC 的波形调制,具有实现架构简单、预编码更精细等优点。参考 5G NOW 的方案,在帧头插入块状导频,使用干扰近似法(IAM)完成信道估计。

3 FBMC-CoMP 预编码设计

在 FBMC-CoMP 通信系统中,多

个基站要对边缘用户同时进行信号的传输,在已知系统信道参数的情况下,基站通过设计预编码对每个发送天线赋予不同的加权系数,产生具有指向性的波束,从而消除小区间与用户间的同频干扰。

假设多基站与用户间的信道矩阵为 $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$, 预编码矩阵为 $W \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$, 所有用户数据信号矢量为 $S \in \mathbb{Z}^{N_t \times 1}$, 则用户接收到的信号为 $R = HWS + N$, 其中 $N \in \mathbb{Z}^{N_r \times 1}$ 为高斯噪声, N_t 与 N_r 分别为发送天线与接收天线的个数,且 $N_t \geq N_r$ 。

按照信号处理方式的不同,可将预编码分为线性预编码与非线性预编码。由于非线性预编码实现复杂度极高,不适用于实际通信场景。因此,下面我们将首先介绍两种常用的线性预编码方法,然后提出针对FBMC-CoMP的预编码设计方法,从而消除边缘用户小区间的同频干扰。

3.1 迫零预编码

迫零预编码可将等效信道矩阵完整对角化,从而消除其他用户的干扰,达到同一频率资源内传输多个并行数据流的目的。在迫零(ZF)预编码中,对信道矩阵求广义逆矩阵可以得到其预编码矩阵为 $W_{ZF} = H^+ = \beta H^H (HH^H)^{-1}$ 。此时,用户接收信号可以写为 $R = HW_{ZF}S + N = \beta IS + N$ 。ZF预编码算法易于实现,但会使基站的发送功率增大,且信道相关性越强则消耗功率越大。

3.2 MMSE 预编码

最小均方误差(MMSE)预编码的准则是使接收信号与发送信号的均方误差最小,从而在消除其他用户干扰时,减小信道中的高斯白噪声的干扰。MMSE的预编码矩阵为:

$$W_{MMSE} = H^H \left((HH^H)^{-1} + \frac{\sigma^2}{E_s} I \right)^{-1} \quad (5)$$

其中 σ^2 为加性高斯白噪声功率, E_s 为接收信号功率。MMSE算法可以有

效消除高斯白噪声,但是实现复杂度较大。

3.3 FBMC-CoMP-ZF 与

FBMC-CoMP-MMSE 预编码

当信道频率选择性较强时,不同子载波对应的信道矩阵会有很大差异,如果所有子载波使用同一个预编码矩阵,会导致波束赋形的效果很差,用户间的干扰不能消除,因此必须对每个子载波分别进行预编码。

假设第 m 个子载波的信道矩阵为 $H_m \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$, 其预编码矩阵为 $W_m \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$, 基站所有天线发送信号矢量 $S[i] = [s_1[i] \ s_2[i] \ \dots \ s_{N_t}[i]]^T$ 表示为:

$$S[i] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} W_m A_{m,n} g[i - \frac{nM}{2}] e^{\frac{j2\pi mi}{M}} e^{\frac{j(m+n)\pi}{2}} \quad (6)$$

其中 $A_{m,n} = [a_{m,n}^1 \ a_{m,n}^2 \ \dots \ a_{m,n}^{N_t}]^T$ 为 N_r 个用户在第 n 个符号与第 m 个子载波处的PAM符号的数据矢量。

发送信号经过信道后到达各个用户,所有用户在第 n_0 个符号与第 m_0 个子载波处的信号恢复矢量

$$\hat{A}_{m_0, n_0} = [\hat{a}_{m_0, n_0}^1 \ \hat{a}_{m_0, n_0}^2 \ \dots \ \hat{a}_{m_0, n_0}^{N_t}]^T$$
 表示为:

$$\begin{aligned} \hat{A}_{m_0, n_0} &= \sum_{m=0}^{M-1} H_m W_m S[k] g_{m_0, n_0}^*[k] + N \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n \in Z} \sum_{m=0}^{M-1} H_m W_m A_{m,n} g_{m_0, n_0}^*[k] g_{m_0, n_0}^*[k] + N \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n \in Z} H_m W_m A_{m,n} \delta_{m_0, n_0}^{m,n} + N \\ &= H_{m_0, n_0} W_{m_0, n_0} A_{m_0, n_0} + \sum_{(m,n) \neq (m_0, n_0)} H_{m_0, n_0} W_m A_{m,n} \delta_{m_0, n_0}^{m,n} + N \end{aligned} \quad (7)$$

假设信道相关带宽大于3个子载波间隔,则在第 m_0 个子载波相邻的子载波处有 $H_m \approx H_{m_0}$ 和 $W_m \approx W_{m_0}$ 。基于等效信道矩阵完整对角化的一系列思想,我们提出FBMC-CoMP-ZF预编码为:

$$W_{FBMC-CoMP-ZF} = H_m^+ = \beta H_m^H (H_m H_m^H)^{-1} \quad (8)$$

经过FBMC-CoMP-ZF预编码后,

\hat{A}_{m_0, n_0} 可以重写为:

$$\hat{A}_{m_0, n_0} = A_{m_0, n_0} + \sum_{(m,n) \neq (m_0, n_0)} A_{m,n} \delta_{m_0, n_0}^{m,n} + N_{real} + jN_{imag} \quad (9)$$

其中 $N_{imag} \in \mathbb{C}^{N_t}$ 和 $N_{real} \in \mathbb{C}^{N_t}$ 分别

为信道对 \hat{A}_{m_0, n_0} 的虚部与实部的高斯白噪声。对 \hat{A}_{m_0, n_0} 信号取实部后恢复出的信号为 $A_{m_0, n_0} + N_{real}$ 。为减小高斯白噪声 N_{real} 对 \hat{A}_{m_0, n_0} 的干扰,我们提出FBMC-CoMP-MMSE预编码为

$$W_{FBMC-CoMP-MMSE} = H_m^H \left((H_m H_m^H)^{-1} + \frac{\sigma^2}{E_s} I \right) \quad (10)$$

4 仿真与测试结果

4.1 MATLAB 仿真结果

为验证所提出的FBMC-CoMP传输技术及预编码的优势,我们对系统中一个基站引入 τ 个采样点的延时,并在高斯信道下评估应用FBMC-CoMP-ZF与FBMC-CoMP-MMSE预编码的系统误码率(BER)性能。图5是MATLAB仿真所得的FBMC-CoMP误码率曲线。从图5中可以看出:

(1)在高斯信道下FBMC-CoMP-MMSE算法优于FBMC-CoMP-ZF算法,并能够提供较好的BER性能。

(2)随着延时采样点 τ 的增大, BER性能会逐渐变差,但在采样点小于14时误码率小于5%,系统能够进行可靠的通信。

4.2 原型验证平台测试结果

为了模拟基站信号传播过程中的衰减,我们人为降低基站的发送功率,以FBMC-CoMP-ZF预编码算法为例子,分别测试了发送端在-5 dBmW、-3 dBmW、-2 dBmW的BER曲线。从图6中可以看出:当采样点小于14(延时差为0.7 us)时,系统仍然能够为用户提供可靠的服务,且随着FBMC调制子载波数目的增多,FBMC-CoMP能够适应的延时也会线性增大。基站同时同频对4个用户进行信号传输,所以容量增益为4倍(6 dB)。

5 结束语

我们首先提出了一种基于FBMC的CoMP传输技术,并搭建了基于USRP的FBMC-CoMP的原型验证平

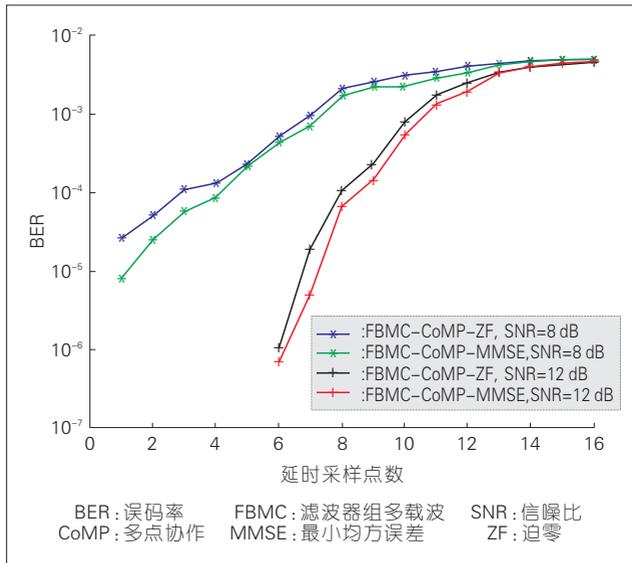


图5 仿真所得的FBMC-CoMP通信系统误码率

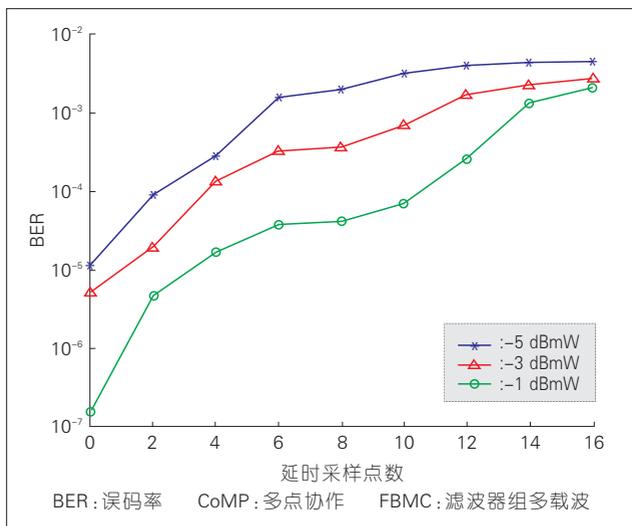


图6 原型验证平台测试的FBMC-CoMP通信系统误码率

台,然后提出了FBMC-CoMP中的预编码设计以消除小区间干扰。最后,我们通过MATLAB仿真与原型验证平台的测试,验证了FBMC-CoMP无需循环前缀且能够进行可靠通信的技术优势。测试结果表明:所提出的FBMC-CoMP传输技术能够忍受不同基站信号到达的时延差,并为边缘用户提供可靠的通信服务,大幅提高了通信容量。

参考文献

[1] FARHANG-BOROJENY B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2011, 28(3): 92-112. DOI: 10.1109/MSP.2011.940267

[2] SCHAICH F, WILD T. Waveform Contenders for 5G — OFDM vs. FBMC vs. UFMC[C]// 2014 6th International Symposium on Communications. USA: IEEE, 2014: 457-460. DOI: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912

[3] 5GNOW_D3.2_final: 5G waveform candidate selection[EB/OL]. [2014-04-07]. (2017-04-17). http://www.5gnow.eu/wp-content/uploads/2015/04/5GNOW_D3.2_final.pdf

[4] 3GPP. Multiplexing and Channel Coding: TS36.212 [S]. 2010

[5] JUNGNIKEL V. The Role of Small Cells, Coordinated Multipoint, and Massive MIMO in 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 44-51. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815892

[6] CUI Q. Evolution of Limited-Feedback CoMP Systems from 4G to 5G: CoMP Features and Limited-Feedback Approaches[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(3): 94-103. DOI: 10.1109/MVT.2014.2334451

[7] CHENG Y, LI P, HAARDT M. Coordinated Beamforming for the Multi-User MIMO Downlink Using FBMC/OQAM[C]//2014 6th

International Symposium on Communications. USA: IEEE, 2014: 465-469. DOI:10.1109/ISCCSP.2014.6877914

[8] PHYDYAS Deliverables D3.2: Optimization of transmitter and receiver[EB/OL]. [2010-06-01]. <http://www.ict-phydyas.org/delivrables/PHYDYAS-D3-2.pdf/view>

[9] HAAS R, BELFIORE J C. Multiple Carrier Transmission with Time-Frequency Well-Localized Impulses[C]//IEEE Second Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux. USA: IEEE, 1994:187-193. DOI:10.1109/SCVT.1994.574163

[10] BELLANGER M. FS-FBMC: A Flexible Robust Scheme for Efficient Multicarrier Broadband Wireless Access[C]//GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE. USA: IEEE, 2012: 192-196. DOI:10.1109/GLOCOMW.2012.6477568

[11] CHANG S L, KYUNG Y Y. Polyphase Filter-Based OFDM Transmission System[C]// IEEE 60th Vehicular Technology Conference. USA: IEEE, 2004: 525-528. DOI:10.1109/VETEFC.2004.1400062

[12] QU Q, QIU Y and JIANG T. Finer SVD-Based Beamforming for FBMC/OQAM Systems[C]// IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). USA: IEEE, 2016: 1-7. DOI: 10.1109/GLOCOM.2016.7841842

作者简介



宋国超, 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹)博士生; 主要研究方向为OFDM和FBMC等多载波技术。



陈达, 华中科技大学电子信息与通信学院讲师; 主要研究方向包括OFDM和FBMC等多载波通信技术、毫米波通信, 以及异构网络; 已发表论文10余篇。



江涛, 华中科技大学电子信息与通信学院二级教授、博士生导师; 研究方向为宽带无线通信和天地一体化信息网络理论与方法; 已发表论文160余篇, 出版专著2部、编著2部, 参编4部。