

一种高频场景候选波形方案

段向阳 辛雨 暴桐* 华健

(移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室 深圳 518000)

(中兴通讯股份有限公司 深圳 518000)

摘要: 针对高频场景(>52.6 GHz)面临的主要问题: 路径损耗比较大、功率放大器的效率比较低和相位噪声比较高, 该文设计了一种高频场景候选波形方案。该候选波形方案包括基本符号结构的增强设计、发射端和接收端结构的增强设计, 以及尾部序列长度可变方案设计等。相比于5G现有波形DFT-s-OFDM, 该文提出的高频场景候选波形方案具有更高的频谱效率。仿真结果显示该候选波形方案具有峰均比低、相位噪声估计效果好和带外泄漏小等优点。

关键词: 无线通信; 高频场景; 候选波形; 频谱效率; 峰均比; 相位噪声

中图分类号: TN928

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)01-0060-08

DOI: 10.11999/JEIT200236

A Candidate Waveform Scheme for High-Frequency Scenarios

DUAN Xiangyang XIN Yu BAO Tong HUA Jian

(State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518000, China)

(ZTE Corporation, Shenzhen 518000, China)

Abstract: A candidate waveform scheme is designed to deal with the main problems in the high-frequency scenarios (>52.6 GHz) such as relatively large path loss, low efficiency of power amplifier and high phase noise. This candidate waveform scheme designs the enhanced fundamental symbol structure, the enhanced transmitter and the receiver structure, and tail sequence length variable schemes. Compared with the 5G waveform DFT-s-OFDM, the proposed candidate waveform scheme improves the spectrum efficiency. The simulation results show that the candidate waveform scheme has lower peak-to-average power ratio, better phase noise estimation and compensation effect, and lower out-of-band leakage.

Key words: Wireless communication; High frequency scenario; Candidate waveform; Spectral efficiency; Peak-to-average power ratio; Phase noise

1 引言

通信变革日新月异, 高速率、大容量、低时延高可靠的通信时代随着第5代移动通信技术(5G)的商用正扑面而来^[1]。5G新空口(5G New Radio, 5G NR)除了依托第4代移动通信(4G)良好的技术架构和新的技术构建, 一个显著的特点就是从匮乏的低频频谱资源扩展到了丰富的高频频谱资源, 使现在的移动网络不仅可以工作在相对较低的频段FR1(Frequency Range 1.45~6.0 GHz), 而且也可以应用在相对较高的频段FR2(Frequency Range

2, 24.5~52.6 GHz)^[2], 从而满足了人们当前日益增加的需求。移动通信技术的发展和人类未来可持续发展的个性需求服务是相互制约、相互促进的, 虽然5G无线移动通信系统可以支撑未来10年信息社会的无线需求, 但也有必要同步前瞻未来信息社会的通信需求。

目前, 通信领域的技术人员已经开展5G下一阶段的工作和下一代移动通信系统(The Sixth Generation, 6G)概念与技术研究。标准化组织3GPP(The 3rd Generation Partnership Project)将从2020年开始5G标准的下一阶段(可称为“Beyond 5G”)研究, 对应的标准版本为5G NR Release-17及后续版本, 标准化重点方向包括支持设计52.6 GHz以上毫米波频段的空口特性^[3]。2019年世界5G大会中国电信首席专家、美国贝尔实验室院士分别作了“移动通信十大趋势及6G展望”报告, 标志着全球正

收稿日期: 2020-04-03; 改回日期: 2020-10-20; 网络出版: 2020-11-07

*通信作者: 暴桐 bao.tong@zte.com.cn

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2019B010157001)

Foundation Item: The Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B010157001)

逐步达成6G研发的共识，具有丰富频谱资源、高传输速率的太赫兹通信被列为未来移动通信中极具优势的宽带无线接入(Terahertz bit/s级通信)技术^[4,5]。太赫兹频谱在通信等领域的开发利用受到了来自欧、美、日等国家和地区的高度重视，也获得了国际电信联盟的大力支持，将是6G研发的重要内容^[6]。

本文将52.6 GHz频谱以上的通信场景统称为高频场景。随着B5G和6G工作的推进，高频场景移动通信系统的研发将是下一阶段的主要工作内容之一，高频场景候选波形、帧结构、参数集(Numerology)、大带宽的设计等都是未来核心研究的技术，本文将重点研究一种高频场景的候选波形方案。

高频场景面临着一些问题，主要包括：路损比较大、功率放大器(Power Amplifier, PA)的效率比较低和相位噪声(Phase Noise, PN)比较高^[7-9]。本文以单载波为基础设计了高频场景候选波形方案，具体包括候选波形的基本符号结构，发射端、接收端结构，以及上行和下行链路尾部序列长度可变方案等，通过仿真验证了该候选新波形可以很好地克服高频场景的上述问题。

2 高频场景候选波形设计

针对高频场景的主要问题，本文以单载波为基础来设计高频场景候选新波形。单载波具有峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)较低的优点^[10-12]，不仅可以克服PA效率低的问题，也可以通过提高发射功率，在一定程度上减轻路径损耗比较大的问题；而且，单载波可以在时域上插入相位跟踪参考信号(Phase Tracking Reference Signal, PTRS)^[13]，这样可以更好地估计和补偿相位噪声。虽然LTE(Long Term Evolution)和5G NR的上行链路已经使用了单载波波形DFT-s-OFDM(Discrete Fourier Transform - single carrier - Orthogonal Frequency Division Modulation)，但现有的DFT-s-OFDM波形仍有些不足的地方，包括：(1)浪费了循环前缀(Cyclic Prefix, CP)资源，特别是在高频场景，由于子载波间隔大，符号短，对于

相同的多径时延环境，CP开销的占比就会更大；(2)需要额外的PTRS资源，而且，随着高频载频的升高，相位噪声会更大，就需要增加更多的PTRS开销。下面，本文将以DFT-s-OFDM波形为基础，通过增强和优化，设计出一种适合高频场景的候选新波形。

2.1 基本符号结构的增强设计

图1(a)是5G NR现有的波形DFT-s-OFDM时域数据的基本符号结构^[14]。图中，每个符号的长度为1个快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)操作的时域长度再加上CP长度，其中，本文将1个FFT操作的时域长度称为1个有效符号长度。有效符号长度为子载波间隔的倒数。接收端在解调数据时是对有效符号长度的数据进行FFT操作，CP就白白丢掉了，浪费了资源。而且，现有的DFT-s-OFDM波形无法灵活地自适应无线多径时延变化。因为，在保持子载波间隔不变的情况下，改变CP的长度会改变符号长度，从而影响了整个时隙结构。

图1(b)是增强和优化的新型候选波形时域数据的基本符号结构。图中给出了1个参考信号符号(Reference signal Symbol, RS)和2个数据符号(Data Symbol, DS)，其余符号用省略号表示。每个符号的长度为1个FFT操作的时域长度，即符号长度为子载波间隔的倒数。数据符号内的时域数据主要由数据Data和首尾插入序列(S2和S1)两部分组成。相邻数据符号的尾部插入序列(S1)是相同的，这样，前一个数据符号的尾部插入序列(S1)就可以看作后一个数据符号的循环前缀，可以抵抗无线信道的多径时延干扰。相邻数据符号的首部插入序列(S2)也是相同的，这样数据符号在过采样之后，可以减少数据部分(Data)对尾部插入序列(S1)的干扰，以保证过采样之后，相邻数据符号的尾部部分仍然是相同的。首尾插入序列(S2和S1)是接收端已知的参考信号序列，可以用作相位噪声估计、频偏纠正、辅助信道估计和辅助同步等。同时我们也设计该首尾插入序列(S2和S1)来自参考信号符号(RS)

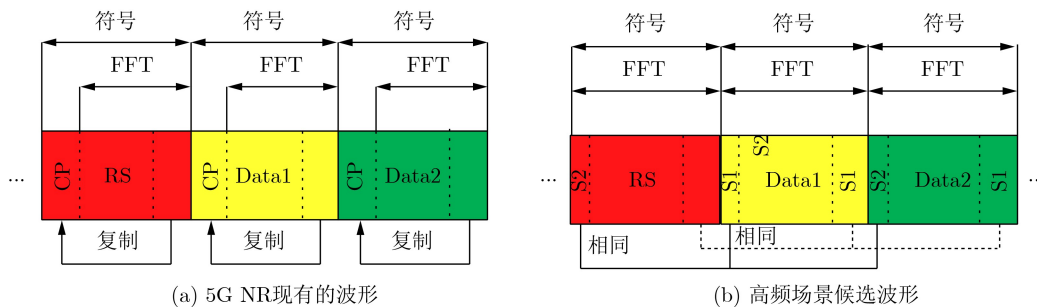


图1 5G NR现有的波形DFT-s-OFDM和高频场景候选波形时域数据的基本符号结构

的时域数据的首尾序列(S2和S1), 这样也保证了参考信号符号的尾部(S1)可以看作后一个数据符号的循环前缀。这种符号结构的设计可以节省额外的CP开销, 而且, 随着无线信道多径时延的变化, 尾部插入序列的长度也可以变化, 相当于改变了循环前缀长度, 这样可以灵活地自适应多径时延变化, 进一步提升频谱效率。比如, 当无线信道多径时延量变小时, 尾部插入序列(S1)的长度就可以变短, 在保持符号长度不变的情况下(即保持子载波间隔不变), 数据部分(Data)的长度就可以变长, 这样就可以提升频谱效率。

高频场景候选波形参考信号符号的时域数据序列 $RS(i)$ 和数据符号的时域数据序列 $DS(i)$ 分别表示为

$$\left. \begin{aligned} RS(i) &= [RS(0), RS(1), \dots, RS(N-1)] \\ DS(i) &= [DS(0), DS(1), \dots, DS(N-1)] \\ &= [RS(0), \dots, RS(H-1), \text{Data}(0), \dots, \\ &\quad \text{Data}(N-H-T-1), RS(N-T), \\ &\quad \dots, RS(N-1)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $i=0, 1, \dots, N-1$, N 表示参考信号符号(RS)和数据符号(DS)的长度, H 表示数据符号首部插入序列S2的长度, $N-H-T$ 表示数据符号中数据Data的长度, T 表示数据符号尾部插入序列S1的长度。

2.2 发射端和接收端结构的增强设计

图2(a), 图2(b)分别为本文设计的高频场景候选波形的发射端和接收端结构框图。

在发射端, 待发送的比特数据经过调制后, 按照新波形封装成符号级数据, 然后经过离散傅里叶

变换(Discrete Fourier Transform, DFT)从时域变换到频域, 在频域进行赋形(Frequency Domain Spectrum Shaping, FDSS)操作, 然后将频域数据映射在对应的子载波上, 然后再添加零数据子载波, 以实现过采样。然后经过离散傅里叶逆变换(Inverse DFT, IDFT)从频域变换到时域。在这整个处理过程中, 与5G NR DFT-s-OFDM波形处理过程不同的有: (1)基本符号结构发生了变化, 是按照新波形封装成符号级数据; (2)在频域添加了FDSS操作; (3)IDFT之后不需要添加传统循环前缀CP了。在频域添加FDSS的好处是, 可以进一步降低单载波信号的PAPR^[15], 并且可以抑制OFDM符号内数据部分在过采样之后对尾部插入序列的串扰, 这样就可以保证过采样后的前一符号尾部是后一符号的循环前缀。

在接收端, 不需要去循环前缀操作, 接收的数据经过DFT操作从时域变换到频域, 然后在相应的子载波上获取频域数据, 然后进行FDSS逆操作, 再进行频域均衡, 然后经过IDFT操作从频域变换到时域, 在时域上进行相位噪声补偿, 即使用每个符号首尾插入的序列(S2和S1)进行相位噪声估计及补偿, 最后去除首尾插入序列(S2和S1)恢复出原始数据信息。在这整个处理过程中, 与5G NR DFT-s-OFDM波形处理过程不同的有: (1)不需要去循环前缀操作; (2)在频域进行FDSS逆操作; (3)使用每个符号首尾插入的序列(S2和S1)进行相位噪声估计及补偿; (4)在相位噪声估计及补偿后去除首尾插入序列(S2和S1)。第3节将通

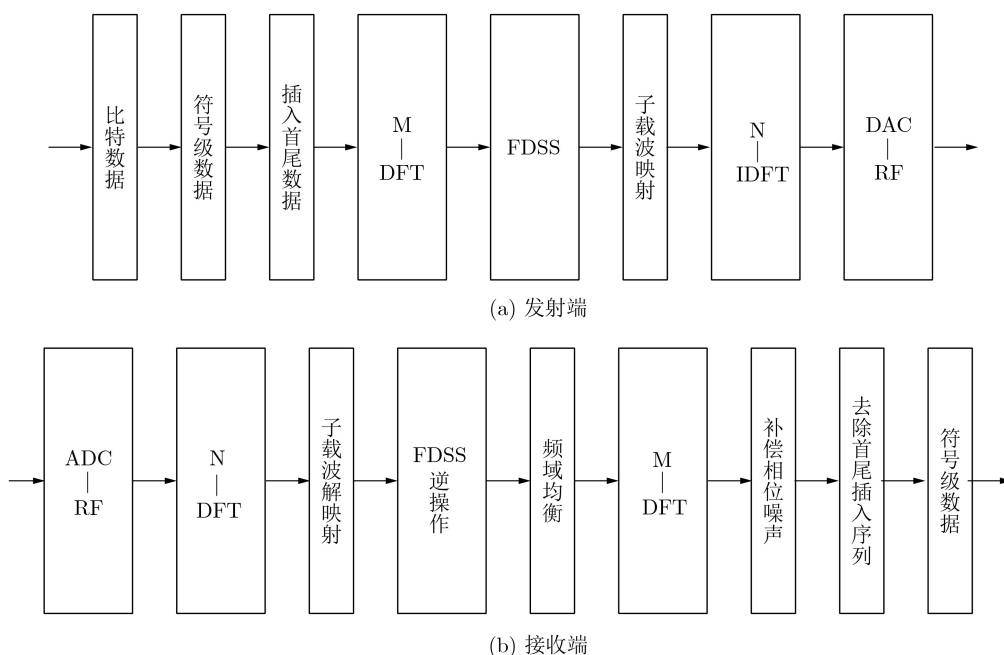


图2 高频场景候选波形的发射端、接收端结构的增强设计

过仿真显示，使用每个符号首尾插入的序列(S2和S1)进行相位噪声估计，可以更好地补偿相位噪声。

2.3 尾部序列长度可变方案

前面介绍了增强和优化的高频场景候选新波形尾部插入序列(S1)的长度可以随着无线信道多径时延的变化而变化，以进一步提升频谱效率。本节针对该特点，分别为高频场景候选新波形的上行和下行链路，设计了一种候选的尾部序列(S1)长度可变方案。

2.3.1 上行方案

在上行链路中，本文设计不同用户主要采用频分复用方式，每个用户占用频域上某个子带。系统根据用户经历的无线信道环境变化情况，以时隙为单位调整数据符号尾部序列长度以适应多径时延的变化。

假设在某个子带上某用户经历了无线信道时延由大变小的过程，图3给出该场景下该子带上新波形尾部序列(S1)长度可变方案的一个例子(图例仅用于辅助文字说明，不代表实际大小)。该例中显示了连续2个时隙，每个时隙包含15个符号，每个符号的长度均相同。该例中，每个时隙的第1个符号为参考信号符号(RS)，剩下的均为数据符号，每个数据符号的首部和尾部序列分别复制了参考信号符号的首部和尾部序列。其中，数据符号的首部序列长度是固定的，只有尾部序列(S1)长度自适应多径变化。假设在第1时隙区间，用户经历的无线信道时延扩展比较大，那么第1时隙数据符号中的尾部序列(S1)长度就比较大；假设在第2时隙区间，用户经历的无线信道时延扩展减少了，则从第2时

隙参考信号符号后面的数据符号开始，就可以减少数据符号后面插入的尾部序列(S1)长度，以提高频谱效率。

2.3.2 下行方案

在下行链路中，为了保持低峰均比的单载波类型，本文设计不同用户主要采用时分复用方式，每个用户在时域上占用不同的数据符号。由于每个用户所处的位置不同，基站给每个用户发送的数据所经历的无线信道也不相同，因此，为了保证前面数据符号的尾部序列(S1)有足够的长度作为后面数据符号的循环前缀，本文设计在两个参考符号之间的多个数据符号中，数据序列后边插入的尾部序列(S1)的长度按照从大到小次序依次进行排列，长度相同的就没有次序之分。也就是说，所经历的无线信道多径时延大的用户数据调度在前面的数据符号里传输，所经历的无线信道多径时延小的用户数据调度在后面的数据符号里传输。由于参考信号符号(RS)是多个用户共用的，因此，对于调度在最后一个数据符号的用户，虽然多径时延相对比较小，但为了保证该数据符号后面的参考信号符号有足够长度的循环前缀，本文设计最后一个数据符号尾部序列(S1)的长度大于等于该数据符号后面的参考信号符号后面的第1个数据符号的尾部序列(S1)的长度。

图4给出多个用户采用时分复用方式尾部序列(S1)长度可变方案的一个例子。该例子中下行链路有7个用户，每个用户经历的多径时延不相同，其中用户1(U1)和用户2(U2)经历的无线信道时延较大，因此分配了前4个数据符号给用户1和用户2，这4个数据符号的尾部序列(S1)长度比较长；用户

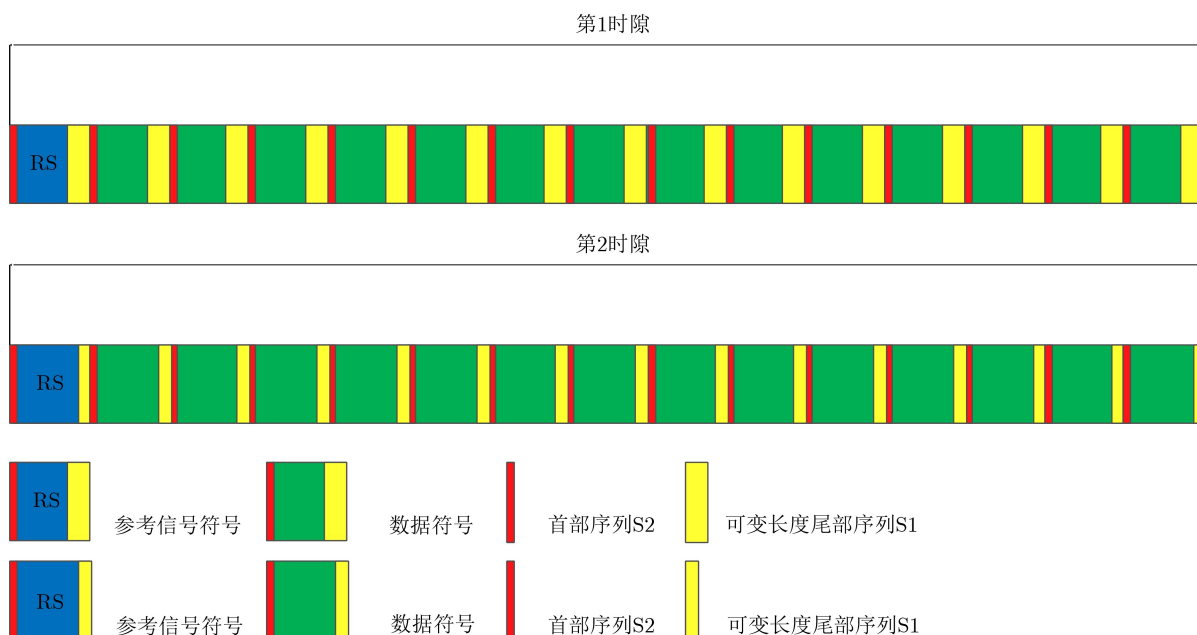


图3 上行链路尾部序列(S1)长度可变方案

3(U3)、用户4(U4)和用户5(U5)经历的无线信道时延较小,则分配了后10个数据符号给用户3、用户4和用户5,这10个数据符号的尾部序列(S1)长度比较小;虽然这里的用户5经历的多径时延比较小但由于占用了最末端符号,为了保证下一个参考信号符号后面的用户在对参考信号符号进行信道估计时有足够的循环前缀长度,因此,增加了用户5的尾部序列(S1)长度。在这里,每个用户是根据实际需要使用合适长度的尾部序列(S1),提高了系统整体的频谱效率。

3 仿真研究

本节对提出的高频场景候选新波形和5G现有波形DFT-s-OFDM进行峰均比PAPR、误块率(BLock Error Ratio, BLER)和功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)性能仿真研究,这里命名高频场景候选新波形为E DFT-s-OFDM(Enhanced DFT-s-OFDM)。

(1) PAPR: PAPR性能仿真参数如表1所示,仿真结果如图5所示。从仿真结果可以看出,在互

补累计分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)等于 10^{-4} 时, E DFT-s-OFDM比5G现有波形DFT-s-OFDM的PAPR要低大约3 dB。为了进一步比较,如果令5G现有波形DFT-s-OFDM也引入相同的FDSS技术,则仿真结果显示这两种波形的PAPR就是相同的了。因此说明,在E DFT-s-OFDM波形中采用的FDSS方案可以很好地降低PAPR。

(2) BLER: 图6是高频场景候选波形与5G现有波形DFT-s-OFDM的BLER仿真结果,仿真参数如表2所示,载频60 GHz,调制方式16 QAM,子带带宽24 RB,子载波间隔960 kHz,IFFT取4096点,信道类型为TDL-A信道^[16](无线信道多径时延大小为10 ns,多普勒频移为10 Hz)。该仿真中,5G现有波形DFT-s-OFDM的每个时隙包含14个符号,其中第4个符号配置为解调参考信号(DeModulation Reference Signal, DMRS),其余的配置为数据符号,每个数据符号配置8个PTRS用来估计相位噪声,PTRS开销大约为3%;该仿真中,高频场景候选波形的每个时隙包含15个符号,其中第1个

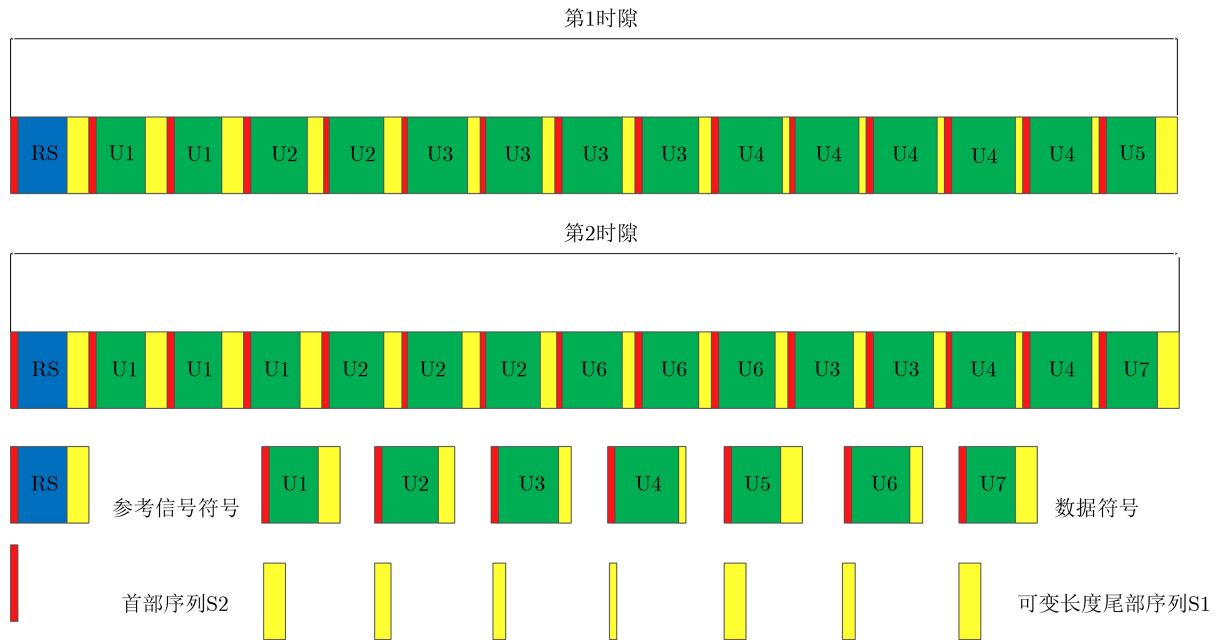


图4 下行链路尾部序列(S1)长度可变方案

表1 仿真参数

参数	DFT-s-OFDM	E DFT-s-OFDM
调制方案		$\pi/2$ BPSK
FFT点数		288
IFFT点数		4096
DMRS		ZC Sequence(ZadOff-Chu Sequence)
(S2, S1)序列长度	无(有CP)	(6,14)
FDSS	无或者根升余弦滤波器, 滚降因子: 0.3	根升余弦滤波器, 滚降因子: 0.3

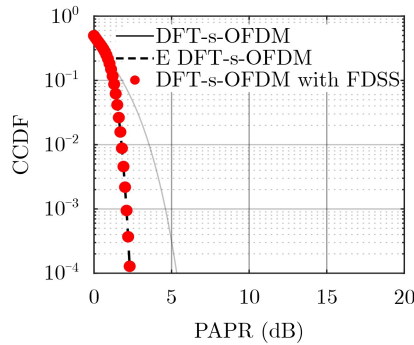


图5 高频场景候选波形(E DFT-s-OFDM)与5G现有波形DFT-s-OFDM的PAPR性能比较

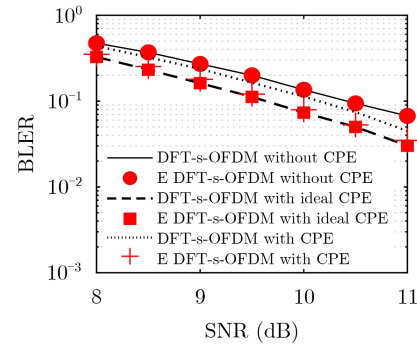


图6 高频场景候选波形(E DFT-s-OFDM)与5G现有波形DFT-s-OFDM的BLER性能比较

表2 仿真参数

参数	取值	
	DFT-s-OFDM	E DFT-s-OFDM
天线	SISO(Single Input Single Output)	
载频	60 GHz	
编码调制方案	LDPC(Low Density Parity Check, CodeRate=1/2), 16QAM	
子带带宽	24 RB(12 subcarriers per Resource Block)	
子载波间隔	960 kHz	
FFT大小	4096	
信道类型	TDL-A(延时扩展: 10 ns, 多普勒频移: 10 Hz)	
CP长度	0.037 μ s	
(S2和S1)序列长度	无(有CP)	(6,14)
DMRS	ZC Sequence(ZadOff-Chu Sequence)	
PTRS	时域密度为1; 有4组PTRS, 每组含有2个样点	无
FDSS	根升余弦滤波器, 滚降因子: 0.3	

符号配置为DMRS, 其余的配置为数据符号, 每个数据符号的首部和尾部插入序列(S2和S1)长度分别为6和14, 这个首部和尾部插入序列的开销与该仿真中5G现有波形DFT-s-OFDM循环前缀的开销相同, 该首部和尾部序列(S2和S1)用来估计相位噪声。由于该仿真中高频场景候选波形没有配置额外的PTRS开销, 因此在相同的时频资源里, 高频场景候选波形传输的数据块大于5G现有波形DFT-s-OFDM所传输的数据块, 也就是说, 如果该仿真显示的BLER相同, 仍然可以证明高频场景候选波形的频谱效率大于5G现有波形DFT-s-OFDM的频谱效率。如果考虑到尾部序列(S1)长度可变以自适应无线信道多径时延量, 则高频场景候选波形的频谱效率会更高一点。为了在PAPR相同的情况下对比BLER性能, 该仿真中5G现有波形DFT-s-OFDM也采用了FDSS方案。

从仿真结果可以看出, 当接收端没有进行公共相位误差(Common Phase Error, CPE)补偿或进行了理想CPE补偿时, 这两种波形的BLER都是相同

的, 这说明相位噪声对高频场景候选波形与5G现有波形DFT-s-OFDM的性能影响是相同的。当接收端利用首尾插入序列(S2和S1)或者PTRS来估计相位噪声并进行CPE补偿时, 高频场景候选波形的BLER性能明显好于5G现有波形DFT-s-OFDM, 并且接近理想CPE补偿时的性能。这是因为高频场景候选波形首尾插入序列(S2和S1)的元素个数(该仿真中元素个数为6+14=20)要大于5G现有波形DFT-s-OFDM每个数据符号配置的PTRS个数。高频场景候选波形没有配置额外的PTRS开销, 其相位噪声估计效果就已经接近理想的CPE估计, 如果再配置少量的PTRS, 则可以进一步提升相位噪声补偿效果。因此, 本文提出的高频场景候选波形更适合大相位噪声的高频场景。

(3) PSD: 本文设计的高频场景候选波形方案不但具有更低的PAPR和更好的相位噪声估计能力, 而且还能很好地降低带外泄漏。这是因为本文设计的高频场景候选波形方案中, 在一个时隙内的每个符号的首部和尾部序列(S2和S1)都是相同的, 这样

保证了符号之间时域信号的连续性,因此带外泄漏就比较小。

图7是高频场景候选波形与5G现有波形DFT-s-OFDM的功率谱密度仿真结果,仿真参数与表2相同。从仿真结果可以看出,高频场景候选波形的带外泄漏明显小于5G现有波形DFT-s-OFDM。

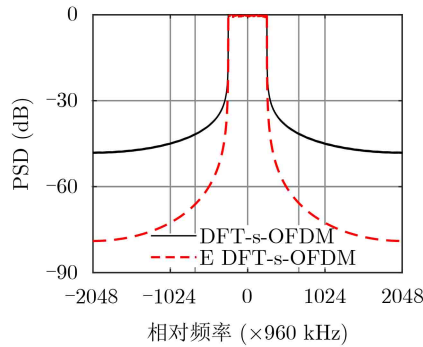


图7 高频场景候选波形(E DFT-s-OFDM)与5G现有波形DFT-s-OFDM的PSD比较

4 结束语

本文以DFT-s-OFDM波形为基础,通过增强和优化,设计了一种高频场景候选波形方案(E DFT-s-OFDM)。该候选波形增强设计了基本符号结构、发射端结构和接收端结构,并且根据时域数据基本符号结构特点设计了尾部序列长度可变的上行和下行链路方案。相比于5G现有波形方案,该高频场景候选波形方案具有更高的频谱效率。同时,性能仿真研究证明了该高频场景候选波形方案峰均比低、相位噪声估计效果好,可以很好地解决高频场景面临的主要问题。而且,该高频场景候选波形方案的带外泄漏也很小。因此,该高频场景候选新波形方案(E DFT-s-OFDM)是未来高频场景中极具有竞争力的一种新型候选波形方案。

参考文献

- [1] POPOVSKI P, TRILLINGSGAARD K F, SIMEONE O, *et al.* 5G Wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 55765–55779. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2872781](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781).
- [2] 3GPP R1–1803552 CR to 38.211 capturing the Jan18 ad-hoc and RAN1#92 meeting agreements[S]. 2018.
- [3] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(8): 963–987. doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033).
ZHAO Yajun, YU Guanghui, and XU Hanqing. 6G mobile communication networks: Vision, challenges, and key technologies[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(8): 963–987. doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033).
- [4] WELLS J. Faster than fiber: The future of multi-G/s wireless[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2009, 10(3): 104–112. doi: [10.1109/MMM.2009.932081](https://doi.org/10.1109/MMM.2009.932081).
- [5] 陈亮, 余少华. 6G移动通信发展趋势初探(特邀)[J]. *光通信研究*, 2019, 45(4): 1–8.
CHEN Liang and YU Shaohua. Preliminary study on the trend of 6G mobile communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2019, 45(4): 1–8.
- [6] SAAD W, BENNIS M, and CHEN Mingzhe. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 134–142. doi: [10.1109/MNET.001.1900287](https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287).
- [7] 刘西川, 宋堃, 高太长, 等. 复杂大气条件对微波传播衰减的影响研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(1): 181–188. doi: [10.11999/JEIT170253](https://doi.org/10.11999/JEIT170253).
LIU Xichuan, SONG Kun, GAO Taichang, *et al.* Research on the effect of complex atmospheric condition on microwave propagation attenuation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(1): 181–188. doi: [10.11999/JEIT170253](https://doi.org/10.11999/JEIT170253).
- [8] 邢金强, 马帅, 肖善鹏. 高频段5G终端射频实现与挑战[J]. *移动通信*, 2017, 41(7): 15–19. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2017.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2017.07.003).
XING Jinqiang, MA Shuai, and XIAO Shanpeng. Implementation and challenge of high-frequency 5G terminal[J]. *Mobile Communications*, 2017, 41(7): 15–19. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2017.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2017.07.003).
- [9] CHEN Zhi, MA Xinying, ZHANG Bo, *et al.* A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 1–35.
- [10] LEVINBOOK Y, EZRI D, and MELZER E. Low-PAPR OFDM-based waveform for fifth-generation cellular communications[C]. 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS), Tel-Aviv, Israel, 2017: 187–192. doi: [10.1109/COMCAS.2017.8244846](https://doi.org/10.1109/COMCAS.2017.8244846).
- [11] KIM J, YUN Y H, KIM C, *et al.* Minimization of PAPR for DFT-Spread OFDM with BPSK symbols[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 11746–11758. doi: [10.1109/TVT.2018.2874688](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2874688).
- [12] KIM J, YUN Y H, KIM C, *et al.* A further PAPR reduction for $\pi/2$ BPSK in 5G new radio[C]. The 88th IEEE Vehicular Technology Conference, Chicago, USA, 2018. doi: [10.1109/VTCFall.2018.8690859](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690859).
- [13] SIBEL J C. Pilot-based phase noise tracking for uplink DFT-s-OFDM in 5G[C]. The 25th International Conference on Telecommunications (ICT), St. Malo, France, 2018: 52–56.

- [14] 3GPP TS38.211 Technical specification group radio access network; NR; Physical channels and modulation[S]. 2016.
- [15] BOONKAJAY A and ADACHI F. Single-carrier transmission with frequency-domain based code-division multi-access[C]. The 20th Asia-Pacific Conference on Communication, Pattaya, Thailand, 2014: 233-238.
- [16] 3GPP TR38.901 Technical specification group radio access networks. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[S]. 2017.
- 段向阳：男，1973年生，研究方向为无线通信新技术，6G总体技术规划等。
- 辛 雨：男，1976年生，博士，研究方向为6G物理层关键技术等。
- 暴 桐：女，1992年生，硕士，研究方向为太赫兹场景新波形及调制技术等。
- 华 健：男，1991年生，硕士，研究方向为高频场景相位噪声及低峰均比方案等。
- 责任编辑：陈 倩