

# 6G背景下 超奈奎斯特技术的机遇

Opportunity of Faster-than-Nyquist Technology in 6G Era

王亚峰/WANG Yafeng<sup>1</sup>,金婧/JIN Jing<sup>2</sup>,王启星/WANG Qixing<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学,中国 北京 100876;
2. 中国移动研究院,中国 北京 100032)
(1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. China Mobile Research Institute, Beijing 100032, China)

摘要:超奈奎斯特技术是未来6G的关键技术之一。简要介绍超奈奎斯特技术的技术原理、实现方案和技术应用。结合目前的研究进展,探寻超奈奎斯特技术在未来6G中的应用前景,并 对该技术的发展做出展望。

关键词:超奈奎斯特技术;符号间干扰;6G

Abstract: Faster-than-Nyquist (FTN) technology is regarded as one of the key technologies of 6G in the future. The technical principle, implementation scheme, and application of the FTN technology are briefly introduced. Combined with the current research progress, the application prospect of FTN technology in 6G era is explored, and the future development of FTN technology is predicted.

Keywords: faster-than-Nyquist technology; inter-symbol interference; 6G

DOI:10.12142/ZTETJ.202102006 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/ detail/34.1228.TN.20210408.0903.002.html

网络出版日期:2021-04-08 收稿日期:2021-02-25

▶ 5G大规模商用以来,以超大规模物联网、智慧交通和远程医疗为代表的新型业务在各大行业产生了深远的影响。在产业升级和行业变革的飞速发展中,海量的数据传输需求对现有的通信体系提出巨大挑战,这势必会促进未来6G网络的研发。6G<sup>[1]</sup>将会在5G的基础上融合更多领域的技术,能够提供更高的传输速率、更低的传输时延、更深更广的覆盖,从而有更广泛、更多样化的应用场景。

更高的传输速率是6G的关键性 能指标之一,这对现有技术提出新挑 战。由于毫米波、太赫兹和可见光等 在实际应用中存在诸多限制,同时超 大规模天线无论是在实现上还是在 能效方面都面临着严峻挑战,加之传 统的星座调制方案很难实现较高的 频谱效率,因此,以高频谱利用率为 优势的超奈奎斯特(FTN)技术有望成 为6G的潜在关键技术。FTN技术通 过人为引入符号间干扰(ISI)来实现 符号间距压缩,可以在相同带宽下传 输更多的符号。通过采样技术和信 号设计,FTN技术可以极大地提升系 统容量。FTN技术凭借高频谱效率 和大容量的技术优势,可以满足6G 对高传输速率业务的需求。

## 1 FTN 系统

传统通信技术都尽量避免ISI,而

FTN 技术却能够利用 ISI。FTN 技术 打破符号间正交特性,使得相邻符号 混叠,从而获得在有限带宽下传输更 多比特信息的能力。FTN 采样系统 包括 FTN 传输<sup>[2]</sup>、高频谱效率频分复 用(SEFDM)<sup>[3]</sup>和重叠 X 域复用(OVX-DM)<sup>[4]</sup>。本节就 FTN 系统展开相应的 介绍。

#### 1.1 FTN技术

FTN 技术是一种非正交传输方式,它通过人为地引入更加复杂的ISI 来实现更快的传输速率。奈奎斯特 研究结果表明,带宽限于1/2T 赫兹的 脉冲不能以比1/T Baud 更快的码元 速率传输。研究普遍假定,更快的传

)

6G背景下超奈奎斯特技术的机遇 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

)

输速率将增加检测器的错误率。而 J. B. ANDERSON等却发现,即使脉冲 传输速率提升25%,检测器的错误率 也不一定增加<sup>[2]</sup>。

单载波 FTN 信号的表达式如公 式(1)所示:

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum_{n=0}^{N-1} x_n h(t - n\tau T), \qquad (1$$

其中, $x_n$ 为发送符号序列,N为序列长 度, $E_s$ 为每符号平均能量。h(t)为能 量归一化的脉冲成形波形,满足  $\int_{-\pi}^{\pi} h^2(t) dt = 1$ 。 $\tau T$ 为发送符号间隔 时间。 $\tau$ 为压缩因子,通常满足 $0 < \tau <$ 1。当且仅当 $\tau = 1$ 时,FTN信号成为传 统的正交传输信号。图1展示了奈奎 斯特信号和FTN信号( $\tau = 0.8$ )的时域 波形图。由图1中可知,FTN信号相 较于奈奎斯特信号压缩了符号间距。 同时,FTN信号引入了ISI,这使得相 应的FTN信号检测变得更加复杂。

引入ISI使得FTN相关的信号检 测变得非常困难,因此在接收端对FTN 信号进行均衡处理变得十分重要。图 2是一种FTN信号的收发流程方案。

#### 1.2 SEFDM技术

在传统的多载波调制系统中,正 交频分复用(OFDM)技术凭借出色性 能占据绝对地位。然而,伦敦学院大 学教授I. DARWAZEH于 2003 年提出 了 SEFDM<sup>[3]</sup>。SEFDM 信号不具有子 载波正交特性,即载波间隔  $\Delta B < \frac{1}{T}$ 。 该技术通过损失子载波正交性来实 现频谱压缩,从而节约大量的频谱资 源。如图 3 所示,与 OFDM 信号相比, SEFDM 信号的子载波更加紧凑。这 使得 SEFDM 技术在未来 6G 中具有广 阔的应用前景。

一个基带 SEFDM 的时域信号可 以用公式(2)表示:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{j2\pi\Delta ft},$$
 (2)

其中, $s_n$ 表示第n组数据流。 $\Delta f$ 是 SEFDM系统的子载波间隔,满足  $\Delta f = \frac{\alpha}{T}, \alpha < 1$ 。其中, $\alpha$ 是带宽压缩 因子,它表示带宽压缩程度。

图 4 展示了一种 SEFDM 信号的 收发过程。SEFDM 信号的非正交特 性引入了严重的载波间干扰,这使得 SEFDM信号的检测变得非常复杂。

### 1.3 OVXDM技术

OVXDM编码技术是基于北京邮 电大学李道本教授提出的重叠复用 原理<sup>[4]</sup>发展而来的。OVXDM突破了 相邻符号之间的重叠会在符号周期 内带来干扰的限制。通过传输符号



▲图1 奈奎斯特信号和超奈奎斯特信号的时域波形比较







▲图3 OFDM信号和SEFDM信号频域波形比较



▲图4 一种SEFDM信号的收发过程

在复用波形上的加权移位和重叠, OVXDM最终可实现高编码增益。 OVXDM编码模型如图5所示。

从图5可知,在编码过程中,模型 首先将每一个传输符号中的信息内 容映射到每一个复用波形上,然后将 携带信息的复用波形进行移位和相 互叠加,最终实现OVXDM编码。 OVXDM信号的生成过程可以表示为 公式(3):

$$s(x) = \sqrt{E_s} \sum_{n=0}^{N-1} x_n g(x - n\Delta X),$$
 (3)

其中, $x_n$ 表示传输符号。g(x)表示复 用波形,即时间有限的脉冲响应函数  $g(t), t \in (0, T)$ ,或者表示限带脉冲响 应函数 $G(f), f \in (0, B)$ 。相邻符号之 间的移位间隔为 $\Delta X$ ,且 $\Delta X = X/K(X)$  表示复用波形持续时间 T或者带宽 B,K代表重叠复用系数)。

OVXDM编码其实是一种波形卷 积过程,其模型如图6所示。在OVX-DM编码中,由于移位间隔远小于复 用波形的宽度,OVXDM编码的输出 序列之间会产生严重的重叠。重叠 重数越多,频谱效率越高,相应的译 码状态数越多,译码算法的复杂度也 就越高。这种编码的实质是以牺牲 复杂度为代价来换取系统容量的提 升。一般来说,OVXDM中的X可以 是*T*,即重叠时域复用(OVTDM),也 可以是*F*,即重叠频域复用 (OVFDM)。

#### 1.3.1 OVTDM

假设存在信息序列 $u = [u_0, u_1, \dots, u_{N-1}]^T, u_n \in \{-1, +1\}, 我$ 们用复用波形<math>h(t)来实现相邻符号 之间的移位和加权。OVTDM编码处 理是信息序列u和复用波形h(t)之间 的卷积运算。它可以用公式(4)来 表示:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} h \left( t - nT_s \right) u_n, \qquad (4)$$



▲图5 重叠 X 域复用编码模型(K=2)

专题

其中,N为序列长度,h(t)是周期为T 的复用波形。 $T_s = T/K$ ,表示OVTDM 相邻符号之间的移位间隔。x(t)表示 发送的OVTDM符号序列,其维数为  $(N + K - 1) \times 1$ 。

在加性高斯白噪声(AWGN)信 道上传输之后,接收信号可以用公式 (5)来表示:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} h(t - nT_s) u_n + \mathbf{n}(t), \qquad (5)$$

其中,n(t)是时域中均值为0、方差为  $\sigma^2$ 的AWGN。

由于移位和加权过程可以转换 为传输比特与复用波形的卷积,因 此,公式(5)可以用矩阵来表示,具体 如公式(6)所示:



其中,n(t)表示长度为N+K-1的序列, H(t)表示维度为(N+K-1)×N的编 码矩阵。图7是约束长度为K的 OVTDM波形卷积编码器模型。

#### 1.3.2 OVFDM

OVFDM 发送符号的重叠和移 位,如图8所示。OVFDM系统采用带 限复用波形 $H(f), f \in (0, B),$ 其中B是 H(f)的带宽。发送符号由U =  $(u_1, u_2, \dots, u_L)^T$ 来表示,其中*L*是数据 帧的长度, $(\cdot)^T$ 表示转置。相邻符号 之间的频率间隔是 $f\Delta = B/K$  Hz,其中 K表示重叠复用系数。

发射信号的频域波形如公式(7) 所示:

$$S(f) = \sum_{l=1}^{L} u_l H(f - (l-1) f\Delta)_{\circ} \qquad (7)$$

这里, *S*(*f*)也可以用公式(8)来 表示:

$$S(f) = U^{T}H(f) = \begin{pmatrix} u_{1}, u_{2}, \cdots, u_{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{1}(f) \\ h_{2}(f) \\ \vdots \\ h_{L}(f) \end{pmatrix},$$
(8)

(ℤ<sup>+</sup>表示正整数集)。在AWGN信道
上,接收的OVFDM信号频谱波形由
*H*(*f*)来表示。

#### 2 检测方案

在 FTN 系统中,人为引入 ISI 使 得信号检测变得非常复杂。传统适 用于奈奎斯特系统的检测算法将很 难再适用。为了获得最佳检测效果, 人们一般采用最大似然序列检测 (MLSD)算法。虽然这类算法能获得 最优的译码性能,但是这类算法的计 算复杂度会随着编码约束长度的增 加呈指数增长。这限制了MLSD在实 际工程中的应用。因此,开发快速检 测算法是 FTN 信号检测的关键。

以 FTN 为例,在接收端的信号 r(t)可以用公式(9)来表示:

(9)

$$(t) = s(t) + w(t),$$



r

▲图6 重叠X域复用卷积编码模型



▲图7 重叠时域复用的波形卷积编码器模型

其中,s(t)为FTN信号,w(t)为AWGN。

在接收信号经过匹配滤波器和 过采样后,系统会得到离散信号 $y_m$ , 如公式(10)所示:

$$y_{m} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h^{*}(t - k\tau T_{0}) dt + w'_{m}, \quad (10)$$

其中,y<sub>m</sub>和w'<sub>m</sub>分别表示接收端第m 个采样信号和高斯白噪声w(t)经过 匹配滤波器之后所引入的噪声序列。

由于接收信号 R是滤波器系数

和传输数据符号的卷积结果,因此公式(10)可以改写为公式(11):

$$Y = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{X} + \boldsymbol{W}' = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,k} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{N,1} & \cdots & h_{N,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w'_1 \\ \vdots \\ w'_1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中,X是传输的信号,W'表示相关 噪声,H表示FTN传输过程中引入的 ISI矩阵。当系统中没有ISI时,干扰 矩阵将变为单位矩阵。

由于ISI矩阵H的结构满足To-



eplitz矩阵要求,因此可以采用正交三 角(QR)分解等方式来构造预编码矩 阵,以满足信号检测的要求。结合 FTN信号的特点,该矩阵也可以等效 为准多输入多输出(MIMO)系统模 型,并利用相应的MIMO检测算法来 消除ISI。这些用于MIMO的线性算 法也可以用于FTN系统的信号检测。 然而,这些算法在使用时会暴露出缺 点:矩阵运算复杂度会随着检测数据 规模的增大而急剧增大。因此,结合 实际情况来选择合适的算法是非常 重要的。

在现有检测算法的基础上对 MLSD进行改良,并对结构进行优化, 可使系统复杂度得到进一步降低。 例如,在对SEFDM信号检测时,使用 基于排序QR分解的最小均方误差 (MMSE-SQRD)就可以实现很好的检 测效果<sup>[6]</sup>。

在 OVXDM 的快速检测算法方 面,研究者们在原有 Fano 算法、Stack 算法的基础上提出了新的快速检测 算法。文献[7]提出了一种基于递归 神经网络(RNN)的 OVTDM 次优快速 译码算法。该算法结合 OVTDM 系统 编码过程的数学模型,推导出了基于 梯度下降法的译码算法,并设计了基 于梯度更新规则的 RNN 解码器。仿 真结果表明,该算法具有较好的性



<sup>▲</sup>图9 多输入多输出重叠时域复用系统模

能。文献[8]提出了一种基于双向序 列译码的OVTDM双向Viterbi算法。 该算法在进行解码操作时,可以从相 应网格的两端同时开始,并在网格的 中间停止。仿真结果表明,与Viterbi 算法相比,双向维特比译码(BVA)算 法的译码时间可减少一半左右。此 外,多比特滑动堆栈译码(SSD)算 法<sup>[9]</sup>、多信号联合检测(MSJD)算法<sup>[10]</sup> 等新型检测算法在OVXDM快速检测 方面均取得了不错的效果。此外, FTN技术也可以和深度学习相结合, 利用神经网络结构来拟合其信号特 点,以有效降低检测的复杂度。

### 3 技术应用

FTN 技术不仅可以与 MIMO、信 道编码等多种技术相结合,也可以同 光通信、太赫兹等技术相结合。例 如,FTN 与 MIMO 相结合可以进一步 提高频谱效率<sup>[11]</sup>。图9给出了 MI-MO-OVTDM 的系统模型,它是 OVT-DM 与 MIMO 信道的结合。

信源数据流通过串并变换被分 配到 M 根发射天线上。假设每根发 射天线上的发送符号数均为 L, OVT-DM 的重叠重数为 K。 $b_m(l)$ 为第 m 根 发射天线上的第 1 符号。g(t) ( $t \in [0, T]$ )为发送端成型滤波器的 波形,且满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} g^2(t) dt = 1$ 。符号间 隔为  $T_s = T/K_s$ 

MIMO-OVTDM 的第 r 根接收天 线上的信号如公式(12)所示:

$$y_r(t) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=0}^{L-1} h_{rm} b_m(l) g(t - lT_s) + n_r(t), \qquad (12)$$

其中, $n_r(t)$ 是第r根接收天线上的噪声信号,其均值为0,方差记为 $\sigma_r^2$ 。 假设接收端的匹配滤波器的波形为g(T-t),则第r根接收天线上的接收 信号在经过匹配滤波器的第*iT*。时隙时的采样输出可表示为公式(13):

$$y_{r}(iT_{s}) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=0}^{L-1} h_{rm} b_{m}(l) \int_{iT_{s}}^{iT_{s}+T} g(t-lT_{s})g(t-iT_{s})dt + \int_{iT_{s}}^{iT_{s}+T} n_{r}(t)g(t-iT_{s})dt \quad 0$$
(13)

对应的信道容量如公式(14) 所示:

$$\begin{split} I(X,Y) &= \log_2 \left( \frac{\det \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \sigma^2 \hat{R} \right)}{\det \left( \sigma^2 \hat{R} \right)} \right) = \\ &\log_2 \left( \det \left( I + \frac{\tilde{H} \tilde{H}^H}{\sigma^2 \hat{R}} \right) \right) \quad \text{o} \quad (14) \end{split}$$

由此可见,与单一MIMO系统相比,MIMO-OVTDM信道容量得到了 大大提升。

#### 4 结束语

FTN 技术是一种极具潜力的 6G 关键技术。本文介绍了 FTN 技术的 原理和实现方法,并就 FTN 信号的特 点和检测方案展开说明,最后探讨了 FTN 技术在未来 6G 中的应用前景,进 一步阐述其性能优势。

#### 致谢

本研究由北京邮电大学-中国移 动研究院联合创新中心资助,在此表 示感谢。

#### 参考文献

- [1] 赛迪智库无线管理研究所.6G概念及愿景白皮 书 [N].中国计算机报,2020-05-11(8)
- [2] ANDERSON J B, RUSEK F, OWALL V. Faster-than-Nyquist signaling [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(8): 1817–1830
- [3] CHORTI A, KANARAS I, RODRIGUES M R D, et al. Joint channel equalization and detection of spectrally efficient FDM signals [J]. IEEE international symposium on personal indoor & mobile radio communications, 2010: 177– 182. DOI: 10.1109/PIMRC.2010.5671644
- [4] 李道本.重叠复用原理下加性白高斯噪声信道的容量 [J].北京邮电大学学报,2016,39(6):

1-10

- [5] ZHANG H, CHEN Y, LI D, et al. Low-complexity sliding window block decoding using bit-flipping for OVFDM systems [J]. IEEE access, 2017, 5: 25171–25180
- [6] WANG Y, ZHOU Y, GUI T, et al. Efficient MMSE-SQRD-based MIMO decoder for SEFDM-based 2.4 Gbit/s-spectrum-compressed WDM VLC system [J]. IEEE photonics journal, 2016, 8(4): 1–9
- [7] HU Y, WANG Y, WANG H. A decoding method based on RNN for OvTDM [J]. China communications, 2020, 17(4): 1–10
- [8] WANG H, WANG Y, HU Y. Bidirectional viterbi decoding algorithm for OvTDM [J]. China communications, 2020, 17(7): 183–192
- [9] LIN P, WANG Y, LI D. Multi-bit sliding stack decoding algorithm for OVXDM [J]. China communications, 2018, 15(4): 179–191
- [10] LIN P, WANG Y, LI D. A low-complexity multiple-signal joint decoding for overlapped X domain multiplexing signaling [J].
  IET communications, 2018, 12(11): 1273– 1282. DOI: 10.1049/iet-com.2017.1402
- [11] MCGUIRE M, DIMOPOULOS A, SIMA M. Faster-than-Nyquist single-carrier MIMO signaling [C]//2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Washington, DC, USA: IEEE, 2016: 1–7. DOI: 10.1109/GLO-COMW.2016.7848906

