



专题：6G

超奈奎斯特传输技术：面向 6G 的应用价值与挑战

苏鑫¹, 王森¹, 杨鸿文², 金婧¹, 王启星¹

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要：超奈奎斯特 (FTN) 传输技术通过压缩发送符号时域/频域间隔, 在一个符号周期内重叠发送多流数据, 从而打破了奈奎斯特脉冲波形的正交性, 实现了在有限带宽内传输更多数据的目的。首先, 阐述了 FTN 的技术原理, 梳理了其发展现状; 其次, 分析相关的关键性问题——明确了 FTN 容量与香农容量的关系, 以及相关技术的内在联系; 最后, 讨论了 FTN 在 6G 通信中的应用可能性, 提出了其应用价值和挑战: FTN 是一种可逼近香农容量的高谱效传输方案, 但接收机复杂度过高可能成为其在 6G 应用中的关键阻碍。

关键词：超奈奎斯特传输; 香农容量; 码间干扰

中图分类号：TP393

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021222

Faster-than-Nyquist signaling: value and challenges of 6G-oriented applications

SU Xin¹, WANG Sen¹, YANG Hongwen², JIN Jing¹, WANG Qixing¹

1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The faster-than-Nyquist (FTN) signaling technology overlaps multiple streams of data within a symbol period by compressing the transmit symbol time/frequency-domain interval, thus breaking the orthogonality of the Nyquist pulse waveform and achieving the purpose of transmitting more data in a limited bandwidth. A relatively comprehensive explanation of the technical principles of FTN was elaborated, its development status was sorted out, and the related key questions—the relationship between FTN capacity and Shannon capacity, and the intrinsic connection of related technologies were answered. Finally, The possibility of FTN application in 6G was discussed, and its value and challenges in 6G were presented. That is, FTN is a highly spectrally efficient transmission scheme that approximates Shannon's capacity, but excessive receiver complexity may be a key impediment to its use in 6G applications.

Key words: faster-than-Nyquist signaling, Shannon capacity, inter-symbol interference

1 引言

正值 5G 商用方兴未艾之际, 2019 年 5 月国际电联 (ITU) 发布了《Network 2030》, 标志着下一代通信技术研发和标准化进程——6G, 正式拉开帷幕。针对 6G 的新愿景与新需求, 学术界和工业界先后发布了多部具有前瞻性的白皮书。2020 年 11 月, 中国移动发布 6G 系列白皮书^[1-3], 从愿景需求、网络架构到技术趋势, 对 6G 潜在发展方向进行了全面系统的阐述。“数字孪生, 智慧泛在”的 6G 愿景为网络性能指标提出了更高的要求, 如太比特级的峰值速率、10~100 Gbit/s 的用户体验速率、相比 5G 2~3 倍的频谱效率的提升等。作为一种可以获得更高频谱效率的新型传输技术, 超奈奎斯特 (faster-than-Nyquist, FTN) 传输技术引起了业界广泛关注。FTN 技术通过压缩发送符号时域/频域间隔, 在一个符号周期内重叠发送多流数据, 打破了奈奎斯特脉冲波形的正交性, 从而实现了在有限带宽内传输更多数据的目的。

2 技术原理

2.1 系统模型

数字脉冲幅度调制 (PAM) 基带传输系统模型如图 1 所示。

$\{a_n\}$ 为彼此独立的 M 阶数据符号构成的序列, 作为系统输入, 经过发送成型滤波器 (冲激响应为 $h_T(t)$; 传递函数为 $H_T(f)$) 后得到脉冲序

列叠加构成的发送信号为:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n h_T(t - nT_s) \quad (1)$$

其中, T_s 为符号间的发送间隔。经过基带信道 (冲激响应为 $c(t)$, 传递函数为 $C(f)$) 和加性白噪声 $n(t)$ 后, 接收到的信号再通过接收滤波器, 输出信号为:

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n x(t - nT_s) + \eta(t) \quad (2)$$

其中, $x(t) = h_R(t) * c(t) h_T(t)$, $\eta(t) = n(t) * h_R(t)$ 。对接收滤波器的输出信号以 T_s 为周期进行抽样, 在抽样时刻 $t = mT_s$ 的瞬时抽样值为:

$$y_m = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n x_{m-n} + \eta_m = x_0 a_m + \underbrace{\sum_{n \neq m} a_n x_{m-n}}_{\text{码间干扰}} + \underbrace{\eta_m}_{\text{噪声}} \quad (3)$$

其中, $y_m = y(mT_s)$, $x_m = x(mT_s)$, $\eta_m = \eta(mT_s)$ 。由式 (3) 可见, 影响接收抽样判决的两个因素分别是码间干扰 (ISI) 和加性噪声。

2.2 奈奎斯特准则

针对码间干扰问题, 奈奎斯特早在 1924 年提出了无码间干扰基带传输的奈奎斯特准则^[4]。基于上述系统, 假设单边带宽为 W 的理想基带信道, 即对于 $|f| \leq W$, $C(f) \neq 0$; 否则, $C(f) = 0$ 。为使:

$$x(nT_s) = \begin{cases} 1, n = 0 \\ 0, n \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其充要条件为 $x(t)$ 的傅里叶变换 $X(f)$ 必须

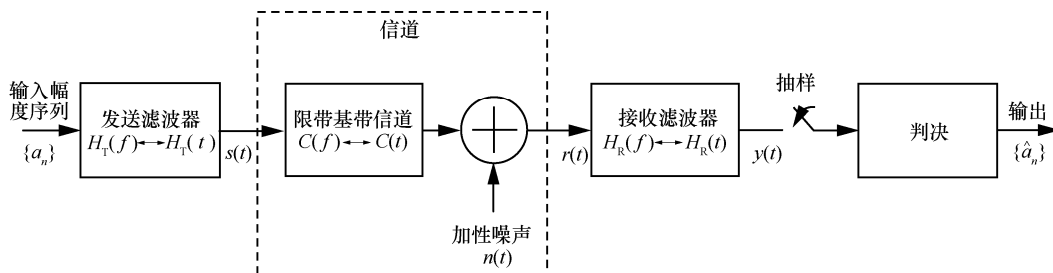


图 1 数字 PAM 基带传输系统模型



满足：

$$X_{f_0} \triangleq \sum_{m=-\infty}^{\infty} X\left(f + \frac{m}{T_s}\right) = T_s \quad (5)$$

基于该准则发现，当 $T_s \geq 1/2W$ 时，可以找到满足上述充要条件的传递函数 $X(f)$ 。设无码间干扰传输的最小符号间隔 $T_s = T = 1/2W$ ，对应无 ISI 的最大符号速率 $2W$ Baud 称作奈奎斯特速率，此时 $x(t)$ 为 sinc 函数，其传递函数为矩形函数，即 $x(t) = \text{sinc}(2Wt)$ ， $X(f) = \text{Rect}(f/2W)$ ，如图 2 所示。接收端在 mT ， $m \in \mathbb{Z}$ 时刻进行抽样时，当前信号峰值对应前一个信号脉冲的零点，实现了抽样时刻的符号间的“正交”传输，故 T 也可以看作 $x(t)$ 保持正交性的最小时间平移。

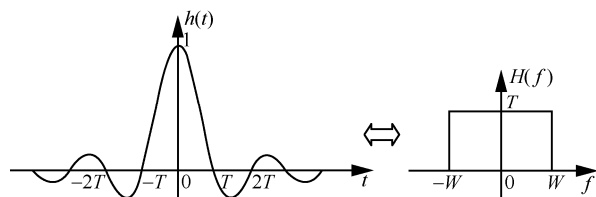


图 2 可获得无 ISI 的奈奎斯特速率的系统时频响应

2.3 FTN 传输原理

如果 $T_s < 1/2W = T$ ，即以超过奈奎斯特速率进行传输（也称作过采样系统），无论如何设计系统的传递函数，都无法满足奈奎斯特准则，一定存在 ISI。设 $T_s = \tau T$ ，其中， $\tau \in (0, 1]$ 称作时间加速因子（time accumulation factor）或时间压缩因子（time squeezing factor）。1975 年，Mazo^[5]发现使用二进制 sinc 脉冲传输数据，当 $\tau \in [0.802, 1]$ 时，虽然信号脉冲之间是非正交的，但是误符号率保持不变（符号间的最小欧氏距离不变），不改变符号间最小欧氏距离的最小 τ 值称作 Mazo 界。可见，随着 τ 的减小，首先破坏符号间的正交性（低于奈奎斯特带宽），然后增加误符号率（低于 Mazo 界）。Mazo 界理论说明，在一定带宽和调制方式下，即使存在 ISI，也可以传输更多数据，这为 FTN 传输技术奠定了理论基础。

考虑图 1 给出的理想限带基带系统，采用归一化的 sinc 脉冲传输幅度序列 $\{+1, +1, -1, +1, -1\}$ 。由图 3 可知，当 $\tau=1$ 时，在 nT ， $n \in \mathbb{Z}$ 时刻的抽样点相互正交，无 ISI；当 $\tau=0.8$ 时，抽样点之间存在 ISI。

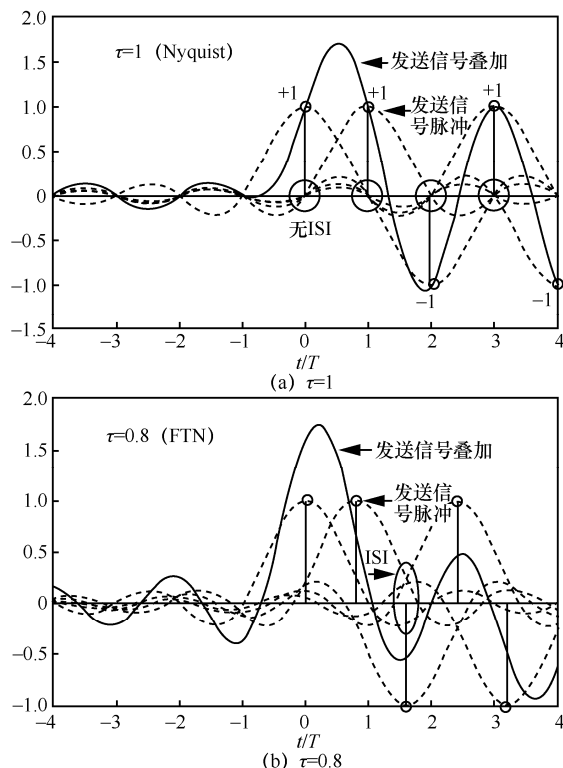


图 3 归一化 sinc 脉冲下的 FTN 传输

由于 sinc 函数是非因果的且收敛到零的速度缓慢，实际系统中并不使用。对于广泛应用于实际系统的根升余弦（RRC）滤波器，同样存在符号的非正交性不改变误符号率的现象，对于滚降系数 $\alpha=0.3$ （30%的过量带宽），Mazo 界为 $\tau=0.703$ ，在一定调制方式下，可以提高 42% 的频谱利用率^[6]。

FTN 传输技术带来高频谱效率的同时，也付出了高复杂度译码的代价。在 Mazo 界附近，可以使用 Viterbi 译码；低于 Mazo 界，译码复杂度更高，需要两个 Viterbi 译码器的软输出进行迭代^[7]。

3 研究现状

继 Mazo^[5]和 Liveris 等^[6]的研究之后，瑞典隆

德大学 Fredrik Rusek 团队研究了非二进制和更高阶调制下的 FTN 传输方案^[8-10]。文献[11]对 FTN 传输的受限容量进行了研究。文献[12]首先将 FTN 思想扩展到频域：与正交频分复用（OFDM）信号在频率上彼此正交不同，基于时域 FTN 的思想，信号频率间隔压缩，子载波之间的正交性被破坏，虽然导致了同信道干扰，但同样存在保持符号间最小欧氏距离的平方不变的频率 Mazo 界。Rusek 等^[12-13]通过计算各种时间和频率压缩的组合下的最小欧氏距离，证明了同时进行时间和频率的 FTN 传输可以进一步提升系统性能。伦敦学院大学的 Darwazeh 教授团队提出的高谱效频分复用（spectrally efficient frequency division multiplexing, SEFFM）技术^[14]也是 FTN 思想在频域上的应用。文献[15-19]研究了多载波系统下的 FTN 收发机的硬件设计、译码算法以及性能分析。文献[20]证明了多入多出（MIMO）系统同样存在 Mazo 界，将 FTN 传输扩展到空域上。

北京邮电大学的李道本教授历经 40 年研究，独立提出了重叠复用波形编码新理论^[21]，于 2013 年出版了《高频谱效率的波形编码理论：OVTDM 及其应用》^[22]一书。该理论指出^[23]：“传输数据符号在时间、频率、空间以及它们的混合域中的重叠不是‘干扰’，而是有益的编码约束关系，重叠越严重，编码增益越高，抗干扰性能越好，只有外部来的破坏因素才是干扰。”该技术通过在空、时、频、码、或混合域中人为地引入干扰，故定义为 X 域的重叠复用（OVXDM），在提高频谱效率的同时，增加信号间的编码约束关系，获得编码增益。从上述原理可见，OVXDM 的基本思想与 FTN 是一致的。

FTN 传输技术可以应用于不同场景。文献[24]研究了多径衰落信道下的 FTN 的性能。文献[25]研究了高速移动场景下的 FTN 方案设计和性能分析。文献[26-27]分别研究了多用户和异构网络下 FTN 的频谱效率。FTN 也可以用于卫星广播系统^[28]、

光纤通信^[29]、可见光通信^[30]等。FTN 可以与其他新型技术进行有益结合，如深度学习^[31]、非正交多址接入（NOMA）^[32]等。

FTN 技术经过多年的研究和发展，已论证在多种场景下都可以获得频谱效率的提升，但与此同时，围绕着 FTN 技术的本质问题——ISI 带来的高译码复杂度的研究也在持续进行中。文献[33-35]提出了不同的预编码方案，文献[36-38]研究了低复杂度的译码算法。文献[7,39]对非编码和编码 FTN 的性能、发送接收机设计和硬件实现等方面进行了系统全面的阐述。

4 关键问题

围绕 FTN 传输技术主要阐述如下几个关键问题：FTN 容量是否可以超过香农容量限；系统参数如何影响 FTN 的性能；FTN 是否可以通过单天线实现多路数据独立并行传输；FTN 与 OVXDM、虚拟 MIMO 之间存在什么样的关系。

4.1 FTN 容量与香农容量

香农经典高斯容量^[40]给出了加性白高斯噪声（AWGN）信道最高可达速率，即：

$$C_N = W \lg \left(1 + \frac{P}{WN_0} \right) = \frac{1}{2T} \lg \left(1 + \frac{2TP}{N_0} \right) \quad (6)$$

其中， P 为信号功率， $N_0/2$ 是高斯白噪声的功率谱密度（PSD）。式（6）成立的前提是图 1 的系统满足奈奎斯特准则（记作下标“N”），即 $\tau=1$ ，系统冲激响应为 sinc 函数，满足以 $T=1/2W$ 最小符号间隔的正交性，对应 $[-W, W]$ 上的矩形 PSD。

一般 FTN 信号的 PSD 不是矩形的，因此在计算容量时需要考虑 PSD 的约束。通过用无数矩形分量逼近光滑频谱，可以将式（6）写成积分的形式，即：

$$C_{\text{PSD}} = \int_0^W \lg \left[1 + \frac{2P}{N_0} X(f) \right] df \quad (7)$$

其中， $X(f)$ 为频谱分布。该容量称作受限容量^[11]



(constrained capacity), 信号受限于频谱密度 $X(f)$, 不论是否使用正交脉冲, 对于任意概率分布的输入符号都成立。基于式 (7), 文献[11]给出了 FTN 的容量表达式:

$$C_{\text{FTN}} = \int_0^{1/2\tau T} \text{lb} \left[1 + \frac{2P}{N_0} X_{\text{fo}}(f) \right] df \quad (8)$$

其中, $X_{\text{fo}}(f)$ 由式 (5) 定义, 称作折叠谱 (folded spectrum)。

根据容量公式 (6) 和 (8), 文献[11]有如下结果: ①如果 $X_{\text{fo}}(f)$ 为 sinc 脉冲波形, $C_{\text{FTN}} = C_N$; ②对于非 sinc 脉冲波形, $C_{\text{FTN}} > C_N$ 。从结果②会得出“FTN 超越香农限”的结论, 但是这样的存在逻辑错误, 比较双方使用不同的脉冲波形, 不能排除脉冲波形对技术本身性能的影响。

对于频谱效率, 有:

$$\frac{C_{\text{FTN}} / W_{\text{FTN}}}{C_N / (1/2T)} \rightarrow 1, P \rightarrow \infty \quad (9)$$

其中, W_{FTN} 为 FTN 所占用的带宽, 当使用非 sinc 脉冲波形时, 该带宽并不等于 $1/2T$, 而是与 PSD 所占频率范围有关。以实际系统常用的升余弦滚降波形为例, 如图 4 所示, 滚降系数为 $\alpha = W_1 / W$, 其中, W_1 为超出 W 的部分, 即过量带宽。当 α 增大时, FTN 的容量性能随之提升, 但所占用的带宽也随之增大。

综上可知, FTN 的容量提升是利用了过量带宽; 随着信噪比的升高, FTN 的频谱效率与经典香农频谱效率渐进相等, 即频谱效率并没有超越香农限。

4.2 FTN 性能在不同系统参数下的仿真结果

基于 4.1 节中的讨论, 本节仿真验证了滚降系数 α 和时间加速因子 τ 对 FTN 性能的影响。

在一定时间加速因子, 不同滚降系数下的性能比较如图 5 所示。当 $\alpha = 0$ 时, 即脉冲波形为 sinc 函数, FTN 容量与经典香农容量重合, 由此印证了 4.1 节中的结果①。当 $\alpha = 0.5$ 和 $\alpha = 1$ 时, 随着 α 的增加, 虽然 FTN 可以提升容量, 但是所占的

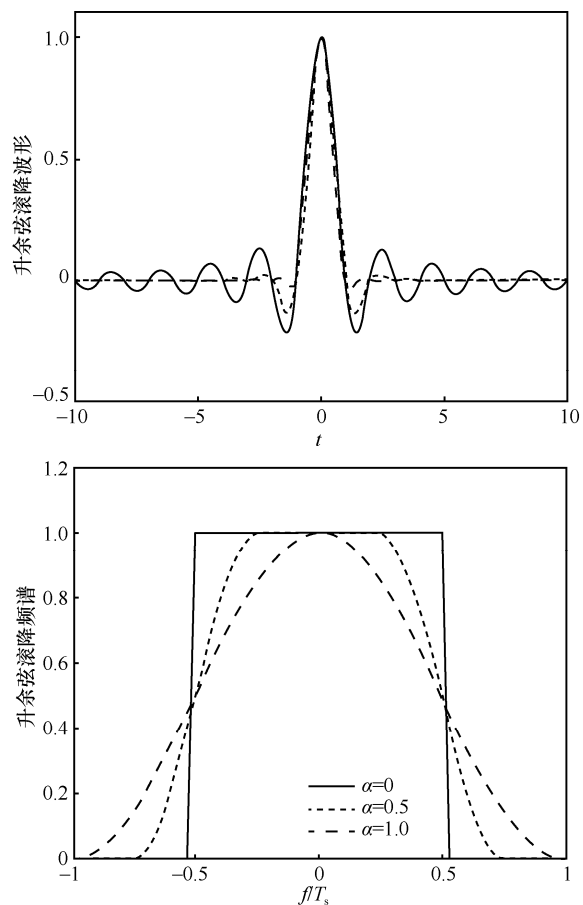


图 4 升余弦滚降波形的时频响应

过量带宽也在增加, 导致频谱效率与香农限的差距逐渐增大。作为参照的“RRC”曲线是不使用 FTN, 使用式 (7) 对带宽做归一化后得到的结果。可见, 虽然 FTN 的频谱效率不能超过香农限, 但是仍然可以提升实际系统的频谱效率。

不同时间加速因子对频谱效率的影响如图 6 所示。对于给定的滚降系数 $\alpha = 1$, 当 $\tau = 1$ 时, FTN 退化为无 ISI 的正交传输, 性能和 RRC 重合; 当 $\tau = 0.8$ 和 0.5 时, 随着加速因子的减小, 一个符号周期内传输的数据增多, 频谱效率随之增加。

上述仿真不仅验证了 FTN 性能与香农限的关系, 而且为 FTN 系统参数设计提供了参考。

4.3 白噪声与有色噪声

前文中已经阐明 FTN 可以传输并行传输多流数据, 码间干扰可以通过译码算法进行删除, 或

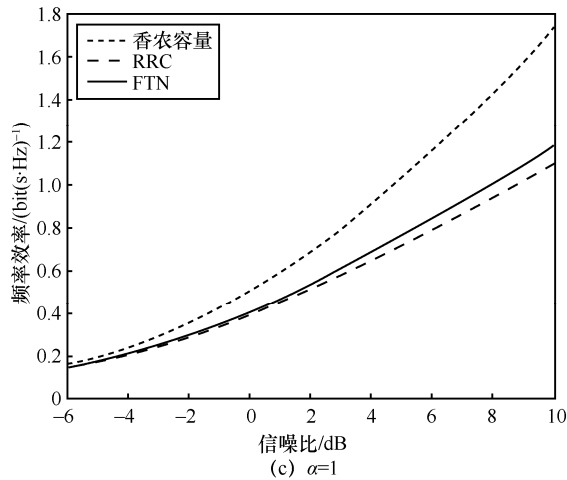
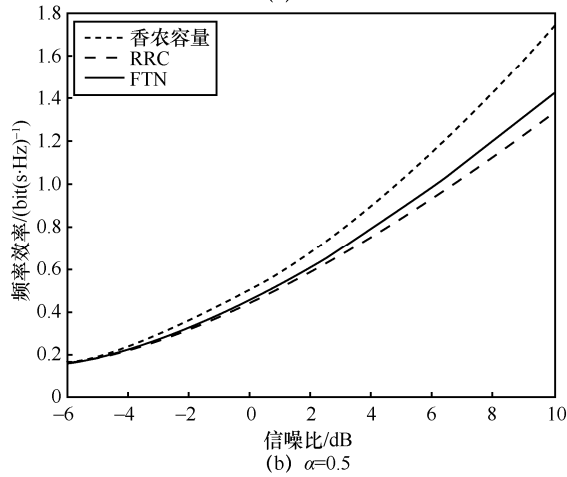
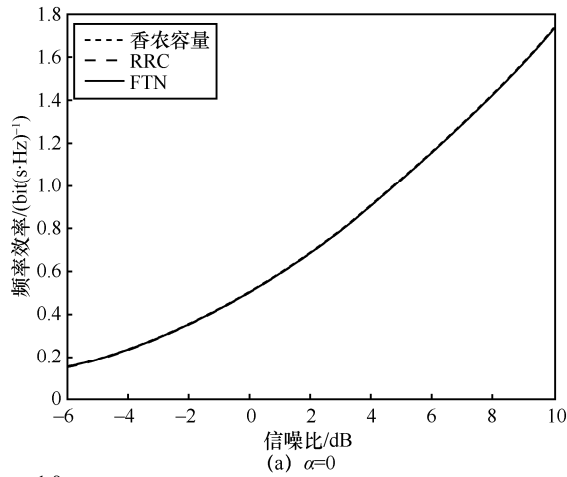


图5 不同滚降系数下, FTN 频谱效率与香农限的对比
 (“FTN”为式(8)得到的)

者加以利用进行高效编码。回到式(3), 影响译码性能的另一个因素——噪声, 在接收滤波器和过采样后会从独立白噪声变成具有相关性的有色噪声。噪声序列 η_n 的自相关函数为:

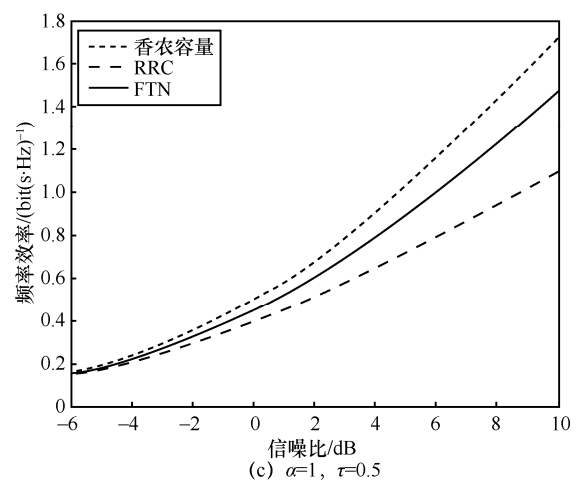
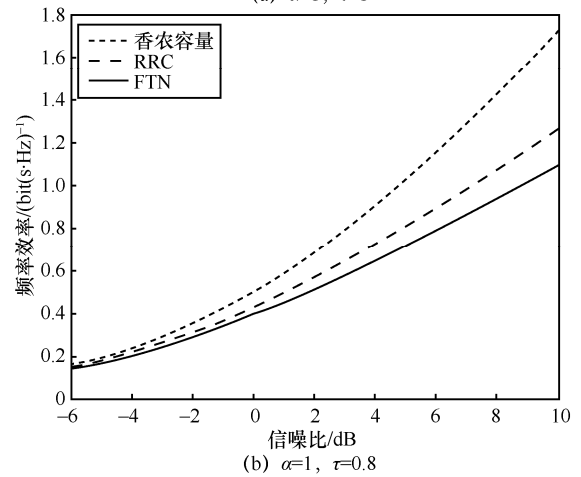
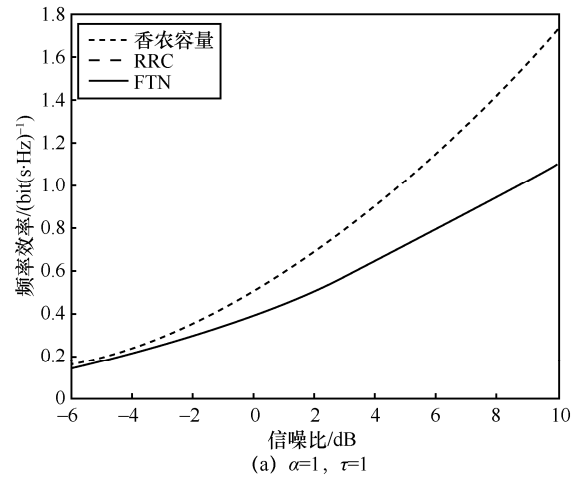


图6 不同时间加速因子下, FTN 频谱效率与香农限的对比

$$\mathcal{E}\{\eta_n \eta_m\} = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} h_R(t - n\tau T) h_R(t - m\tau T) dt \triangleq \frac{N_0}{2} g_R[n - m] \quad (10)$$

由图7可见相关噪声会恶化译码性能。所以,



FTN 需要对相关噪声进行白化滤波, 以提高译码性能。

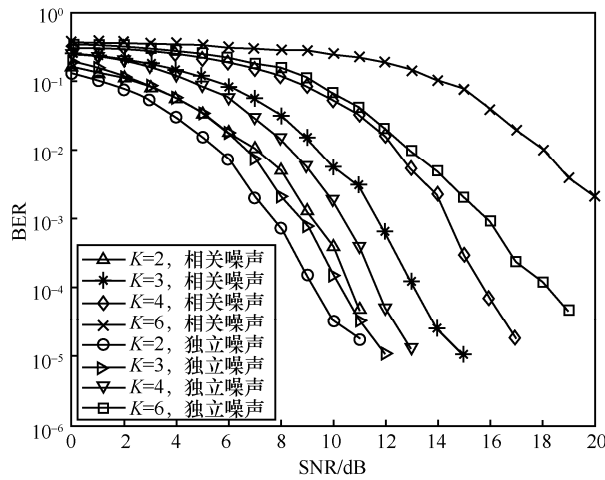


图7 不同重叠系数下噪声相关性对误比特率 (BER) 的影响^[41]

4.4 FTN、OVTDM 与虚拟 MIMO 的数学模型对比
基于 2.1 节的式 (1) 和 2.3 节的基本原理, FTN 的发送信号模型可以写为:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n h_T(t - n\tau T) \quad (11)$$

OVTDM 的发送信号模型是将 K 流数据在 T 内进行等间隔的时延叠加, 即:

$$s(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{k,n} h_T(t - nT - \underbrace{(k-1)T/K}_{\text{时延}}) \quad (12)$$

其中, $b_{k,n}$ 表示第 k 流数据的第 n 个符号。 $b_{k,n}$ 与 a_n 有如图 8 所示的对应关系, 所以, 当 $\tau = 1/K$ 时, 式 (12) 与式 (11) 是等价的。 FTN 和 OVTDM 也可以采用相同的接收算法, 例如最大似然、Fano、连续干扰删除等。因此, OVTDM 与 FTN 的数学模型是等价的。

虚拟 MIMO^[42] 是一种发送多天线异步传输、接收单天线过采样的新型传输技术, 一直以来独立于 FTN 进行研究。本文理清了虚拟 MIMO 和 FTN 数学模型的关系。

设虚拟 MIMO 有 K 根发送天线, 第 k 根发送天线上发送信号为:

$$s_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{k,n} h_T(t - nT - d_k) \quad (13)$$

其中, d_k 为第 k 根天线上的时延, 当 $d_k = (k-1)T/K$ 时, 式 (13) 为式 (12) 中第 k 个流的发送信号。

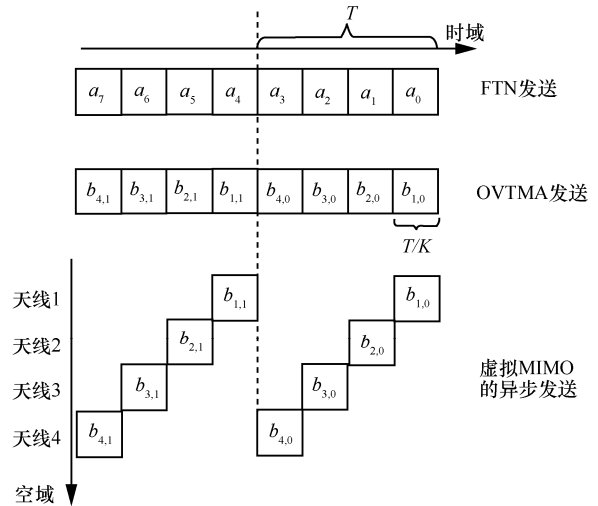


图8 FTN、OVTMA 和虚拟 MIMO 发送序列对比

虚拟 MIMO 单天线接收端进行 G 倍过采样, 相当于 G 根虚拟接收天线, 则第 g 根发射天线上的第 m 个符号上的采样点为:

$$y(mT + gT/G) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{k,n} x_k((m-n)T + gT/G - d_k) + \eta(mT + gT/G) \quad (14)$$

其中, 由于每根天线对应不同的信道实现, 所以级联冲击响应 $x_k(t)$ 与天线索引 k 有关。

当 $G = K$ 且 $d_k = (k-1)T/K$, 发送天线退化为单天线, 则式 (14) 可以退化为单天线的 OVTDM/FTN 系统下第 g 个数据流的第 m 个符号上的采样点:

$$y(mT + gT/K) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{k,n} x((m-n)T + (g-k)T/K) + \eta(mT + gT/K) \quad (15)$$

在 AWGN 信道下, 虚拟 MIMO 退化为 FTN, 二者的频谱效率性能相同。综上所述, 虚拟 MIMO 在一定条件下可以退化为 OVTDM/FTN 传输, 换言之, 虚拟 MIMO 可以看作 FTN 在多天线系统中

的一种实现方式。

5 价值与挑战

FTN 技术通过对时、频、空或混合域上信号的压缩,打破传统信号传输的正交性,通过引入 ISI,实现更高频谱效率的传输。该技术为 6G 通信技术研发提供了有益思路。

首先,FTN 是一种高信噪比下逼近香农限的可行方案,其实质是以复杂度为代价换取频谱效率的提升。一直以来,研究人员在不断探索能够达到香农限的解决方案,但目前的方案只能在低信噪比下频谱效率逼近香农限,在高信噪比下,随着调制阶数的升高,频谱效率与香农限的差距越来越大,其主要原因是,现有调制方式的星座点为均匀分布,不能满足香农限可达条件——输入为高斯平稳随机过程。而通过 FTN 的异步叠加,原本非高斯循环平稳的等效基带 PAM 信号可以渐进等价于平稳高斯随机过程,从而满足达到香农限的必要条件。

其次,FTN 为滤波器设计提供了新思路。传统滤波器以无 ISI 为设计目标,既然 FTN 允许存在 ISI,那么可以按照频谱框架设计发送脉冲,充分利用频谱资源。如图 9 所示,利用式 (7),考虑滤波器的 PSD,依照传统无 ISI 的设计思路,带外泄漏很少的滤波器,反而容量相对较低,如 sinc 脉冲;而允许存在一定带外泄漏的滤波器,如 RRC、Butterworth 滤波器等,可以获得更高的容量。

FTN 技术能否成为 6G 通信的主流技术,还面临着很多挑战。低复杂度接收机的设计对该技术的实用化发展至关重要,如何平衡接收复杂度 and 性能之间的矛盾是未来研究的重要方向。除此之外,信道估计的准确性、多径信道带来的时延等问题对该技术性能的影响需要进一步评估和解决;如何与 6G 关键技术,如大规模 MIMO、NOMA、毫米波等,进行有机结合也有待研究。

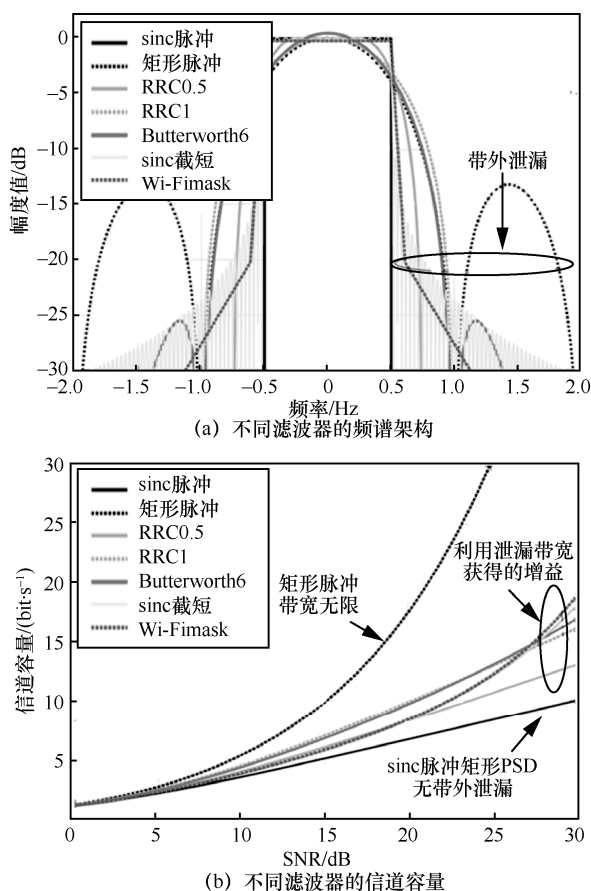


图9 不同频谱架构的滤波器下 FTN 的信道容量

6 结束语

本文从 FTN 传输原理出发,梳理了该技术的发展脉络,对关键性问题进行了解答。首先,FTN 的频谱效率可以接近香农极限,但不能超越,而 FTN 的容量增益是通过非 sinc 滤波器的过量带宽换来的。其次,FTN 可以实现单天线多流数据并行传输,但会引入噪声相关性,为了保证译码性能,需要对噪声进行白化。最后,对 FTN、OVXDM 和虚拟 MIMO 等技术的数学模型进行了比较,发现 3 种技术的本质是相同的,只是实现角度有所差别。基于上述阐释与分析,本文提出了 FTN 的应用价值和挑战。一方面,FTN 可以作为在高信噪比下达到香农限的可行方案,并且其对 ISI 的容忍度可以为滤波器设计提供新的设计理念。而另一方面,FTN 引入的 ISI 问题带来了译码的高复



杂度, 如何在降低译码复杂度的同时, 保证性能增益, 将成为FTN实用化的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 中国移动通信有限公司研究院. 2030+愿景与需求白皮书(第二版)[R]. 2020.
China Mobile Research Institute. White paper on 2030+ vision and needs (second edition)[R]. 2020.
- [2] 中国移动通信有限公司研究院. 2030+网络架构展望[R]. 2020.
China Mobile Research Institute. 2030+ network architecture outlook[R]. 2020.
- [3] 中国移动通信有限公司研究院. 2030+技术趋势白皮书[R]. 2020.
China Mobile Research Institute. White paper on 2030+ technology trends[R]. 2020.
- [4] NYQUIST H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1928, 47(2): 617-644.
- [5] MAZO J E. Faster-than-Nyquist signaling[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1451-1462.
- [6] LIVERIS A D, GEORGHIADES C N. Exploiting faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(9): 1502-1511.
- [7] ANDERSON J B, RUSEK F, ÖWALL V. Faster-than-Nyquist signaling[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(8): 1817-1830.
- [8] RUSEK F, ANDERSON J B. Non-binary and precoded faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(5): 808-817.
- [9] RUSEK F, ANDERSON J B. CTH04-1: on information rates for faster-than-Nyquist signaling[C]//Proceedings of IEEE Globecom 2006. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [10] YU J, PARK J, RUSEK F, et al. High order modulation in faster-than-Nyquist signaling communication systems[C]// Proceedings of 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [11] RUSEK F, ANDERSON J B. Constrained capacities for faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(2): 764-775.
- [12] RUSEK F, ANDERSON J B. The two dimensional Mazo limit[C]//Proceedings of International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE Press, 2005: 970-974.
- [13] RUSEK F, ANDERSON J B. Multistream faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(5): 1329-1340.
- [14] XU T Y, DARWAZEH I. Spectrally efficient FDM: spectrum saving technique for 5G? [C]//Proceedings of Proceedings of the 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [15] DASALUKUNTE D, RUSEK F, ANDERSON J B, et al. Design and implementation of iterative decoder for faster-than-Nyquist signaling multicarrier systems[C]//Proceedings of 2011 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Piscataway: IEEE Press, 2011: 359-360.
- [16] DASALUKUNTE D, RUSEK F, ÖWALL V. Multicarrier faster-than-Nyquist transceivers: hardware architecture and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011, 58(4): 827-838.
- [17] DASALUKUNTE D, RUSEK F, ÖWALL V. An iterative decoder for multicarrier faster-than-Nyquist signaling systems[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [18] DASALUKUNTE D, RUSEK F, ÖWALL V. Improved memory architecture for multicarrier faster-than-Nyquist iterative decoder[C]//Proceedings of 2011 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Piscataway: IEEE Press, 2011: 296-300.
- [19] DASALUKUNTE D, RUSEK F, ÖWALL V. An 0.8-mm(2) 9.6-mW iterative decoder for faster-than-Nyquist and orthogonal signaling multicarrier systems in 65-nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2013, 48(7): 1680-1688.
- [20] RUSEK F. On the existence of the Mazo-limit on MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1118-1121.
- [21] LI D B. Overlapped multiplexing principle and an improved capacity on additive white Gaussian noise channel[J]. IEEE Access, 2018, 6: 6840-6848.
- [22] 李道本. 高频谱效率的波形编码理论: OVTDM 及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
LI D B. Waveform coding theory for high spectral efficiency: OVTDM and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [23] 李道本. 重叠复用原理与必将来临的通信与信息革命[J]. 中国科技成果, 2020(3): 11-13.
LI D B. The principle of overlapping reuse and the coming communication and information revolution[J]. China Science and Technology Achievements. 2020, (3): 11-13.
- [24] WANG J T. Performance analysis for faster-than-Nyquist signaling under multi-path channel[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 302-306.
- [25] 赵磊. 高移动场景下超奈奎斯特与时域重叠复用传输性能分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHAO L. Performance analysis of faster-than-Nyquist (FTN) signaling and overlapped time domain multiplexing (OVTDM) under high mobility scenarios[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [26] ALODEH M, SPANO D, CHATZINOTAS S, et al. Faster-than-Nyquist spatiotemporal symbol-level precoding in the downlink of multiuser MISO channels[C]//Proceedings of 2017

- IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 3779-3783.
- [27] LE C, FUHRWERK M, SCHELLMANN M, et al. Faster-than-Nyquist: an enabler for achieving maximum spectral efficiency in coexistence scenarios? [C]//Proceedings of 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Piscataway: IEEE Press, 2015: 2142-2146.
- [28] LI Q, GONG F K, SONG P Y, et al. Beyond DVB-S2X: faster-than-Nyquist signaling with linear precoding[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66(3): 620-629.
- [29] QIAO Y J, ZHOU J, GUO M Q, et al. Faster-than-Nyquist signaling for optical communications[C]//Proceedings of 2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [30] ZHU Y J, WANG W Y, XIN G. Faster-than-Nyquist signal design for multiuser multicell indoor visible light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-12.
- [31] SONG P Y, GONG F K, LI Q, et al. Receiver design for faster-than-Nyquist signaling: deep-learning-based architectures[J]. IEEE Access, 2020, 8: 68866-68873.
- [32] YUAN W J, WU N, GUO Q H, et al. Iterative joint channel estimation, user activity tracking, and data detection for FTN-NOMA systems supporting random access[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(5): 2963-2977.
- [33] ISHIHARA T, SUGIURA S. SVD-precoded faster-than-Nyquist signaling with optimal and truncated power allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(12): 5909-5923.
- [34] LI Q, GONG F K, SONG P Y, et al. Joint channel estimation and precoding for faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13139-13147.
- [35] JANA M, MEDRA A, LAMPE L, et al. Pre-equalized faster-than-Nyquist transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4406-4418.
- [36] SCHAICH F, WILD T. A reduced complexity receiver for multi-carrier faster-than-Nyquist signaling[C]//Proceedings of 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2013: 235-240.
- [37] ŞEN P, AKTAŞ T, YILMAZ A Ö. A low-complexity graph-based LMMSE receiver designed for colored noise induced by FTN-signaling[C]//Proceedings of 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 642-647.
- [38] WANG K, LIU A J, LIANG X H, et al. A new reduced-complexity LMMSE receiver of adaptive transmission

system based on FTN signaling in satellite communications[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

- [39] FAN J C, GUO S J, ZHOU X W, et al. Faster-than-Nyquist signaling: an overview[J]. IEEE Access, 2017, 5: 1925-1940.
- [40] SHANNON C E. Communication in the presence of noise[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(2): 447-457.
- [41] ZHAO S L, WANG Q X, JIN J, et al. Performance analysis of overlapped time division multiplexing systems under correlated noise[C]//Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [42] WANG Q X, CHANG Y Y, YANG D C. Deliberately designed asynchronous transmission scheme for MIMO systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(12): 920-923.

[作者简介]



苏鑫(1989—)，女，博士，中国移动通信有限公司研究院研究员，主要研究方向为无线传输基础理论、分布式 MIMO 等。



王森(1983—)，男，博士，中国移动通信有限公司研究院高级研究员，主要研究方向为新型多址接入、调制编码技术等。

杨鸿文(1964—)，男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院教授，主要研究方向为无线通信。

金婧(1986—)，女，博士，中国移动通信有限公司研究院高级研究员、高级工程师，主要研究方向为无线传输基础理论、分布式 MIMO 技术、智能超表面等。

王启星(1980—)，男，博士，中国移动通信有限公司研究院主任研究员，主要研究方向为协作传输、MIMO 技术、感知通信等。