

基于多调频率 CSS 的混合业务传输方法

肇启明^{1,2}, 张钦宇¹, 张乃通^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了不同业务采用调频率不同的线性调频扩频 (CSS) 进行混合传输的新方法, 在物理层上赋予业务差异化的传输质量。结合分数阶傅里叶变换等方法, 能够对业务信号进行识别和分类。将多业务混合传输问题转化为同类业务变换域复用/多址设计和不同业务间干扰抑制问题。通过对不同业务信号频点、时隙的协同设计, 并使用变换域滤波处理手段, 能有效抑制业务间干扰。

关键词: 多业务传输; 业务分离; 啁啾展频; 变换域复用/多址; 分数傅里叶变换

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)08-0008-07

Multi-service transmission method based on multi-chirp-rate CSS

ZHAO Qi-ming^{1,2}, ZHANG Qin-yu¹, ZHANG Nai-tong^{1,2}

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

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

Abstract: A novel multi-services transmission scheme based on multi-chirp-rate CSS was proposed, which provided different quality of transmission to services on the physical layer. Using fractional fourier transform (FrFT), signals of different services could be recognized and classified. Multi-services transmission problem had been simplified into transform domain multiplexing/ multiple access design and suppress the interference of other different service signals. By the collaborative design of services frequencies and time slots, and application of filtering in transform domain, the problem of services signals interference had been settled.

Key words: multi-service transmission; services separation; chirp spectrum spread; transform domain multiplexing/ multiple access; fractional Fourier transform

1 引言

随着无线通信技术在更广泛领域的普及, 业务种类日益丰富。如何充分地利用稀缺的无线通信资源为差异化的业务提供更好的服务是未来无线通信系统亟待解决的问题之一。目前, 对于混合业务传输更多关注于较高层级的设计, 如资源分配策略等^[1,2], 而对于物理层技术鲜有关注。然而, 不同业务对于服务质量要求的差异意味着物理层传输技术性能的要求存在差异, 当采用性能单一物理层技

术进行混合业务传输时, 如果按照对传输性能的要求最高的业务进行设计, 传输低性能要求的业务时将造成通信资源的浪费, 反之, 则难以满足高质量业务需求。

鉴于同类业务对传输性能的要求一致, 如果传输系统能够在较低层级 (如物理层), 根据业务种类对传输技术进行差异化配置, 并实现业务类别识别和分离, 则混合业务传输问题将简化为单业务传输和业务间协同调度 2 个问题, 相应的上层调度策略的复杂度也将有所下降。传输技术按需配置可基

收稿日期: 2010-08-31; 修回日期: 2010-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2007CB310606)

Foundation Item: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB310606)

于传统方式实现，如多模发射/接收机等，但是当业务种类增多或切换频繁时，对终端的处理能力将提出很高的要求，并且将不同业务孤立处理也不利于业务间通信资源协同分配的实现。

本文提出一种新颖的混合业务传输方法，令不同类型的业务数据采用调频率不同的啁啾展频（CSS, chirp spectrum spread）方式进行传输。通过对调频率的选择以及符号持续时间的设计，能够实现对传输质量差异化的控制。由于不同参数的 chirp 信号可以利用分数阶傅里叶变换（FrFT, fractional Fourier transform）进行识别和分离^[3,4]，因此当采用本文提出的混合业务传输方法时，可以利用基于 FrFT 的处理手段在物理层对业务类别进行识别和分离。

本文内容安如下：第 2 节对 CSS、FrFT 基础理论以及 CSS 的 FrFT 性质进行简要介绍；第 3 节给出系统模型并对涉及的主要技术进行讨论；第 4 节对 2 种业务混合传输这种简单情况下的干扰及抑制进行仿真；第 5 节是结束语。

2 CSS 及其 FrFT 性质

2.1 CSS

CSS 是对基带信号采用 chirp 信号调制的一种扩频方式。CSS 可被认为是跳频图案为直线型的特殊跳频扩频（也称步进调频）方式，其扩频带宽是通过延长扫频时间以及对调频率参数的设置获得的，有别于传统的直接序列扩频和普通的跳频方式。此外，当 CSS 的调频率参数固定时，可以通过对时隙和中心频率的分配实现复用和多址传输，不存在直扩方式中扩频码非正交性或跳频方式中跳频图案碰撞导致的干扰问题。此外，CSS 还具有工程实现简单、对扩频增益调整灵活等特点，并且具有很强的抵抗干扰、多径衰落和多普勒效应的能力，能够适用于多种无线通信环境^[5-7]。目前，CSS 已经在低功耗和低复杂度无线通信设备、无线传感器网络、低精度测距通信一体化、室内及工业环境下、低速无线通信系统中取得一些应用^[8-10]。

作为 CSS 的基本调制信号，chirp 信号的性质决定了 CSS 信号的性质。时域表达的复 chirp 信号为

$$c(t) = a(t) \exp \left[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \varphi) \right] \quad (1)$$

其中， $a(t)$ 为信号的包络； φ 为初始相位； f_0 为扫频

起始频率； k 为调频率。当 $k > 0$ 时，瞬时频率随时间线性增加，称正向扫频，反之为负向扫频。当 CSS 符号的持续时间为 T 时，扫频带宽 $B_{sw} = |k|T$ 。chirp 信号具有理想的自相关性，对于 k 不同的 chirp 信号间的互相关性与 k 的差异大小有关，2 个调频率分别为 k 和 $-k$ 的 chirp 信号近似具有正交性。

与其他扩频方式一样，采用 CSS 方式通过获得处理增益以降低接收机对输入信噪比的要求。当假设基带调制信号的带宽为 B_s ，如果 CSS 符号持续时间 T_s 内扫频带宽 B_{sw} 满足 $B_{sw} \gg B_s$ ，则扩频增益 G_p 为

$$G_p = \frac{B_{sw}}{B_s} \approx \frac{|k|T_s}{2/T_s} = \frac{1}{2} |k| T_s^2 = \frac{|k|}{2R_s^2} \quad (2)$$

其中， R_s 为传输速率。因此，通过对 k 和 R_s 的调整，能够获得对扩频增益的灵活控制，从而满足不同业务传输时对性能的差异化要求。

分析和处理 chirp 类信号的传统方法主要基于匹配滤波，然而当使用多参数和变参数 chirp 信号时，匹配滤波实现复杂。随着 FrFT 理论趋于成熟以及快速离散算法的提出^[11-13]，基于 FrFT 的 chirp 信号处理技术的优势逐渐显现。目前，FrFT 已经成为 chirp 信号检测、处理以及基于 chirp 信号的多种应用如 CSS 等的基本和分析处理的一种重要工具。

2.2 FrFT 简介

作为傅里叶变换的推广，FrFT 是一种将信号利用复 chirp 谐波进行分解的方法，较傅里叶变换的单频复指数谐波信号分解法更具有灵活性和一般性，尤其适合对信号的频率时变特性进行分析。根据积分形式定义法，信号 $f(t)$ 的 FrFT 为

$$F_p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) K(\alpha; u, t) dt \quad (3)$$

其中， p 为变换阶次； $\alpha = \pi p / 2$ ；分数域 u 可被认为是由时域 t 逆时针旋转 α 角度而得；核函数 $K(\alpha; u, t)$ 定义为

$$K_p(\alpha; u, t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - j \cot \alpha}{2\pi}} \exp \left(j \frac{t^2 + u^2}{2} \cot \alpha - j u t \csc \alpha \right), & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t - u), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t + u), & \alpha = (2n + 1)\pi \end{cases} \quad (4)$$

因此， $K(\alpha; u, t)$ 中的 α 以 2π 为周期，即 p 以 4

为周期, 当 $\alpha=2n\pi+\pi/2, n \in \mathbf{Z} (p=4n+1)$ 时

$$K_p(\alpha; u, t) = \exp(-j2\pi ut) \quad (5)$$

FrFT 退化为傅里叶变换。此外, $K(\alpha; u, t), \alpha \in (\pi/2, 3\pi/2]$ 可化为 $K(\alpha'; u, t), \alpha' \in (-\pi/2, \pi/2]$, 因此一般可以只考虑 $\alpha \in (-\pi/2, \pi/2]$, 即 $p \in (-1, 1]$ 的情况。

2.3 CSS 信号的 FrFT 性质

当式(1)中 $a(t)=A, |t| \leq T/2$ 时, CSS 信号 (即矩形窗截断 chirp 信号) 的 $p \notin \mathbf{Z}$ 阶 FrFT 为

$$C_p(u) = A\sqrt{1-j\cot\alpha} \int_{-T/2}^{T/2} \exp\{j\pi[(k+\cot\alpha)t^2 + 2(f_0-u\csc\alpha)t + u^2\cot\alpha] + j\varphi\} dt \quad (6)$$

对于 $p \in (-1, 1]$, 当且仅当 $p=2\text{arccot}(-k)/\pi$ 即 $\cot\alpha=-k$ 时, 式(6)可化为

$$C_p(u) = AT\sqrt{1-j\cot\alpha} \cdot \exp(j\pi u^2 \cot\alpha) \frac{\sin[\pi(f_0-u\csc\alpha)T]}{\pi(f_0-u\csc\alpha)T} \quad (7)$$

由此可知, 调频率为 k 、持续时间为 T 的 CSS 信号 FrFT 的重要性质如下:

- 1) 在 $p=2\text{arccot}(-k)/\pi$ 阶分数域上具有辛格函数的幅度谱包络;
- 2) 幅度谱峰值位于 $u|_p=f_0\sin\alpha$ 处, 改变 f_0 可以实现谱线位置移动 (分数域谱线搬移特性);
- 3) 幅度谱第一过零点间距离为 $2|\sin\alpha|/T$, 可以定义为 CSS 信号的分数域 (广义) 带宽。

当 $p \neq 2\text{arccot}(-k)/\pi$ 时, 分数域谱线展宽、谱密度下降, 包络函数不具上述特征。

3 多调频率 CSS 混合业务传输方法

基于上述 CSS 信号的 FrFT 性质, 当不同业务采用调频率不同的 CSS 方式时, 可以利用 FrFT 对业务类别进行识别, 并采用变换域滤波对指定业务信号以外的干扰进行抑制; 对于同类业务, 则通过对各符号 (或用户) 的中心频率或时隙的分配, 实现变换域复用/多址传输。

3.1 系统结构

发送端原理如图 1(a)所示, 当系统支持 M 种业务类别, 则发送端首先将待发数据分成 N 个类别, 并进行基带调制 (MOD 模块) 然后分别采用调频率为 k_1, k_2, \dots, k_N 的 CSS 方式。为了实现各类业务符号 (或用户) 的复用/多址, 还需根据相应的策略对 CSS 信号的中心频率以及传输的时隙等进行调

整。接收机原理如图 1(b)所示, 首先对接收信号做一组与 k_1, k_2, \dots, k_M 相对应的 FrFT, 在各指定变换域上进行滤波以抑制其他类业务信号的干扰, 滤波后的信号分别做调频率为 $-k_1, -k_2, \dots, -k_N$ 的 CSS 实现解扩, 最后进行解调 (DEMOD 模块)。

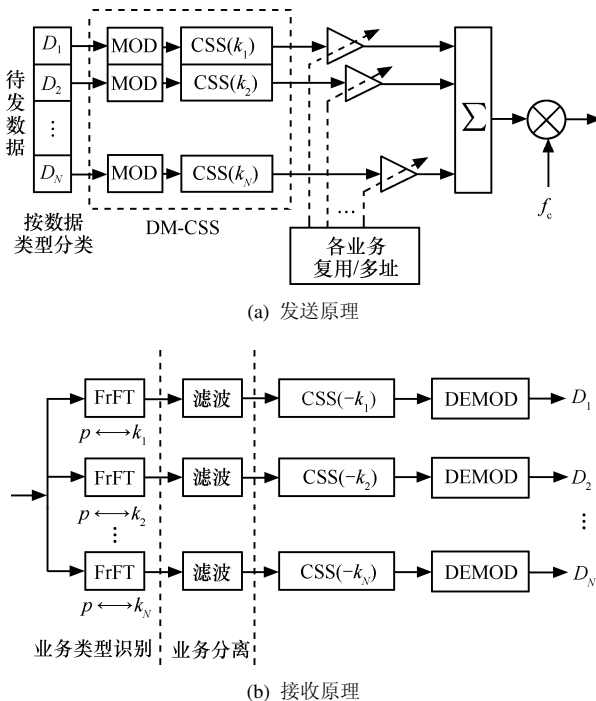


图 1 多参数 CSS 混合业务传输系统结构

3.2 CSS 的调制方式

CSS 有 2 类常见调制方式, 其一是 chirp 信号不仅作为扩频信号使用, 还利用调频率参数承载信息, 如二进制、多进制调频率键控等^[14]; 其二是仅利用 chirp 信号作为扩频信号使用, 并独立于信息的调制部分, 也称为直接调制 (DM) CSS 方式, 其中直接调制部分使用传统调制方案, 如 n PSK 等^[8]。在以上 2 类调制方式中, 第一种虽然具有实现的优点, 但存在频繁的调频率切换, 当相邻符号 (或用户) 的时间中点或中心频率间隔较小 (如传输采用部分重叠 “Overlap” 技术) 时, 干扰问题比较严重, 本文建议选择 DM-CSS 方式。DM-CSS 中 CSS 部分只提供处理增益, 而不会改变 DM 所使用的具体调制方案的误比特率 (BER) 与 E_b/n_0 (E_b 为比特能量, n_0 为白噪声单边功率谱密度) 之间的关系。根据不同业务对传输 BER 性能要求的差异, 一方面可以调整 CSS 参数以控制处理增益, 另一方面也可以根据业务类型对 DM 使用的调制方案进行选择。

3.3 变换域复用/多址——同类业务的资源分配

同类业务采用调频率相同的 CSS，各符号（用或用户）以变换域复用/多址的方式共享时、频资源。图 2 所示为 DM-CSS 信号的时、频资源占用特征，其中，传输频带由 DM 的基带带宽 B_s 和 CSS 的扫频带宽 B_{sw} 决定。经过最优阶次的 FrFT，各 DM-CSS 信号在变换域上谱包络中心具有 Δu 间隔，为保证分离程度，应至少满足 $\Delta u \geq |\sin \alpha B_s|$ 。由于 $\Delta u = \Delta f \sin \alpha$ 并且 $\Delta f = |k| \Delta t$ ，上述信号分离条件转化为 $\Delta f \geq B_s$ 或 $\Delta t \geq 2/|k|T_s$ 。在图 2 中分别给出了基于 Δf 和 Δt 的设计实现变换域复用/多址的时、频资源分配方案。

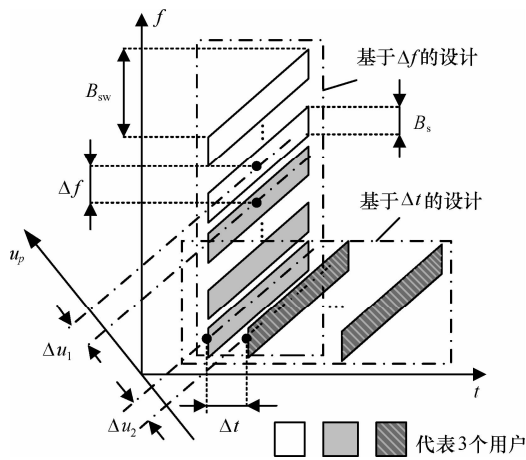


图 2 基于 Δf 和 Δt 设计的变换域复用/多址方案

3.4 不同业务混合传输的干扰问题

由于本文方案中不同业务使用调频率不同的 CSS 方式，进行混合传输时各业务间不需要进行严格的时序设计，占用的时、频资源可以部分重叠以提高资源利用率，然后采用基于 FrFT 的变换域滤波方法对不同业务信号进行分离。但由于调频率不同的 CSS 信号间不具有正交性，即使采用变换域滤波也难以实现严格的分离，为了保证传输的可靠性，需要对各具体业务的变换域资源划分间隔进行调整，以避免不同业务信号间出现严重的“遮蔽”问题导致分离困难。

此外，在资源重叠混合传输时，不同业务的信号受到来自其他业务干扰的强度是不同的，因此对于各业务需根据其对传输质量的要求进行传输速率、信号强度、扩频增益等参数设计，以及对各业务 CSS 调频率分配、所占资源重叠程度等进行协同设计。以图 3 所示情况为例，A、B 业务部分重叠共享时、频资源，分别采用 2 种传输速率，对于图

3 情况，A 每符号受到 3 次 B 的干扰，而 B 每符号受到 5 次 A 的干扰，如果 2 个业务信号具有相同功率，由于 B 的每符号能量为 A 的 2 倍，B 具有优于 A 的传输可靠性。

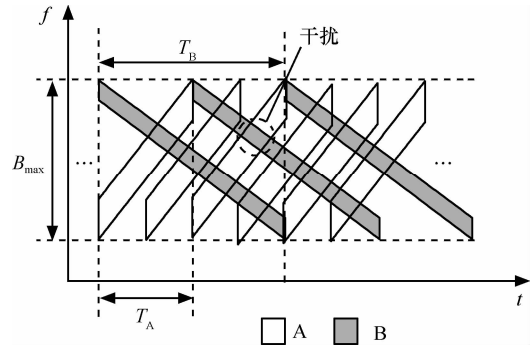


图 3 部分重叠占用资源不同时业务受到干扰强度不同

3.5 变换域滤波抑制干扰——不同业务的分离

以 2 种业务混合传输的情况为例，业务 A、B 分别采用调频率为 k_1 和 k_2 ，中心频率均为 f_0 的 CSS 方式，符号宽度分别为 T_1 、 T_2 ，A、B 的混合信号可表示为

$$s_{\text{mix}}(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \left\{ a_1(t) \exp[j(\pi k_1 t^2 + \varphi_1)] + a_2(t) \exp[j(\pi k_2 t^2 + \varphi_2)] \right\} \quad (8)$$

其中， $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 表示基带调制符号，当采用 $\pi/4$ -QPSK 调制时，

$$\begin{cases} a_1(t) = S_i, & -\frac{T_1}{2} \leq t \leq \frac{T_1}{2} \\ a_2(t) = S_j, & -\frac{T_2}{2} \leq t \leq \frac{T_2}{2} \end{cases} \quad (9)$$

其中， S_i 、 S_j 为 $\pi/4$ -QPSK 符号。以 $T = \max(T_1, T_2)$ 为处理时间单元，并且假设 T 时间内 A、B 均只传输一个符号（对于符号宽度小的具有空闲状态用）。对 $s_{\text{mix}}(t)$ 分别做调频率为 $-k_1$ 、 $-k_2$ 的 CSS，得

$$\begin{aligned} s_1(t) &= s_{\text{mix}}(t) \exp(-j\pi k_1 t^2) \\ &= a_1(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_1)] + \\ &\quad a_2(t) \exp\left\{j\left[\pi(k_2 - k_1)t^2 + 2\pi f_0 t + \varphi_2\right]\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} s_2(t) &= s_{\text{mix}}(t) \exp(-j\pi k_2 t^2) \\ &= a_1(t) \exp\left\{j\left[\pi(k_1 - k_2)t^2 + 2\pi f_0 t + \varphi_1\right]\right\} + \\ &\quad a_2(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_2)] \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)、式(11)均表示一个正弦调制信号与一个 chirp 信号的混合。由此可知，本文提出系统的业务

间干扰问题均可以转化为正弦调制信号抗 chirp 信号干扰问题。

鉴于 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 具有相同的形式，下面仅就 $s_1(t)$ 进行讨论。对 $s_1(t)$ 做 $-f_0$ 下变频并进行锁相，得

$$s'_1(t) = a_1(t) + a_2(t) \exp[j(\pi\Delta kt^2 + \Delta\varphi)] \quad (12)$$

其中， $\Delta k = k_2 - k_1$ ； $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 。对 $s'_1(t)$ 做间隔为 T/N 的采样，得

$$s'(m) = a_1(m) + a_2(m) \exp[j(\pi\Delta km^2 + \Delta\varphi)] \quad (13)$$

其中， $0 \leq m \leq N-1$ 。由于 T 时间内 $a_1(m)$ 为常数（记为 A_{si} ），对 $s'(m)$ 做 N 点求和可以对当前符号 S_i 进行能量累积。

$$S_i = NA_{si} + I_i \quad (14)$$

其中， $I_i = \sum_{m=0}^{N-1} a_2(m) \exp[j(\pi\Delta km^2 + \Delta\varphi)]$ 。

式(10)~式(14)描述了调频率为 k_1 的 CSS 信号的（相关）解扩过程，当式(14)中不存在 I_i 项时，噪声环境中对 S_i 的解调性能满足扩频系统 BER-SNR 的一般规律。下面的问题是如何对干扰项 I_i 进行抑制。由于 I_i 的采样序列 $c(m) = \exp[j(\pi km^2 + \varphi)]$ 是由 k 控制的加速调相序列，导致 I_i 不仅对 S_i 的幅度存在影响，还会引入相位误差。如果采用传统的频域滤波方式将滤波器通带以外的 chirp 干扰信号滤除，落入带内的干扰残余与有用信号具有强相关性，仍然会引起比较严重的相位误差。采用分数域上带阻滤波法能够对产生干扰的 chirp 信号近似完全抑制，因此本文利用该方法作为抑制业务间干扰，实现不同业务分离的基本方法。

4 仿真分析

解决非正交复用产生的干扰是本文系统的关键问题，下面对基于 FrFT 的混合业务识别及变换域滤波干扰抑制效果进行仿真。鉴于混合业务非正交复用没有对 CSS 信号的无线信道传输的实质产生变化，限于篇幅，有关无线信道下 CSS 的传输性能请参阅文献[5,7,8]，不再赘述。

利用 FrFT 进行业务识别的仿真如下：设 A、B、C、D 4 种业务分别采用调频率为 -250 、 500 、 $1\ 000$ 、 $-2\ 000$ kHz/ms 的 CSS 方式，中心频率相同。各业务符号宽度满足 $T_A = 2T_B = 4T_C = 8T_D$ ，从而具有相同的扫频带宽。对混合信号做阶次 -1 到 1 ，步进为 0.01 的 FrFT（采用尺度法^[15]按 MHz/ms 进行量纲归一

化），将各分数域谱的归一化峰值 $J(p)$ 作为判决量， $J(p)$ 曲线如图 4 所示，出现 4 个极值分别对应 FrFT 阶次 -0.70 、 -0.5 、 0.29 、 0.84 ，从而估计出混合信号存在调频率为 509 、 $1\ 000$ 、 $-2\ 040$ 、 -257 kHz/ms 的 CSS 信号成分。因此利用 $J(p)$ 可以对混合业务成分进行识别。

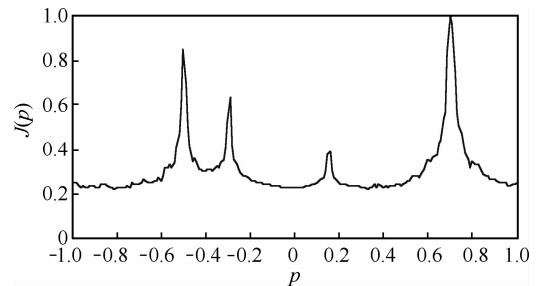


图 4 业务成分判决量 $J(p)$ 曲线

下面考察混合传输时业务信号之间干扰问题及变换域滤波干扰抑制效果。A、B 业务符号宽度分别为 0.1 ms 和 0.2 ms，均采用 $\pi/4$ -QPSK 基带调制，并分别采用调频率相差 $\Delta k = 500$ kHz/ms 的 CSS。以 A 作为考察对象，B 作为干扰，对混合信号进行 1 MHz 过采样，则 A 每符号有 100 个采样点做相参累积。记信扰比 $SIR = P_A/P_B$ (P_A 、 P_B 为 A、B 的信号功率)，则未采用干扰抑制措施时不同 SIR 下 A 业务的 BER-SNR 曲线如图 5 所示。

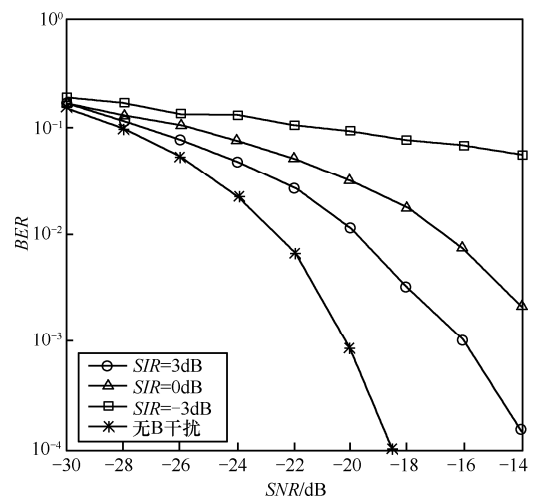


图 5 不同 SIR 下 A 业务的 BER 性能曲线

下面考察 Δk 变化时，B 对 A 的干扰影响的变化情况。保持 $SIR = 0$ dB， Δk 分别取 300 、 500 、 $1\ 000$ kHz/ms，其他参数同上。当 Δk 减小时，干扰引起的性能恶化程度加剧，如图 6 所示。因此，混合传输的设计应在限定传输频带和保持传输速率

的前提下，使得各业务 CSS 的调频率间隔尽可能大。

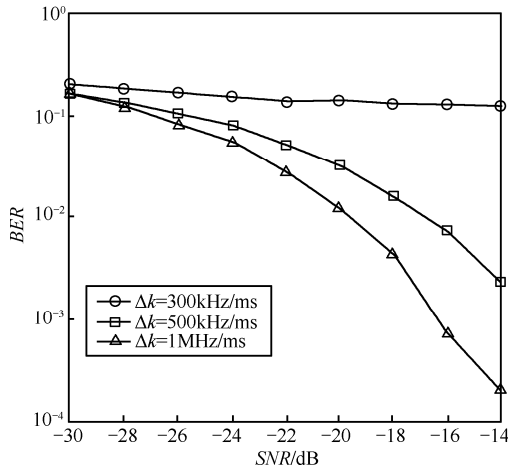


图 6 Δk 不同时干扰对 BER 性能的影响

变换域带阻滤波能够对 CSS 干扰进行有效抑制，仍以 A 为考察对象，在 $SIR=0dB$ 时对调频率相差 500kHz/ms 的 B 业务信号进行抑制，处理后 A 业务 BER 改善情况如图 7 所示。如果采用传统的频域带通滤波，BER 性能不但没有得到改善，反而进一步恶化，这是由于 CSS 干扰信号位于通带内的强耦合成分的调相速率更接近于 QPSK 符号，进一步增加了 QPSK 符号的幅度和相位误差。

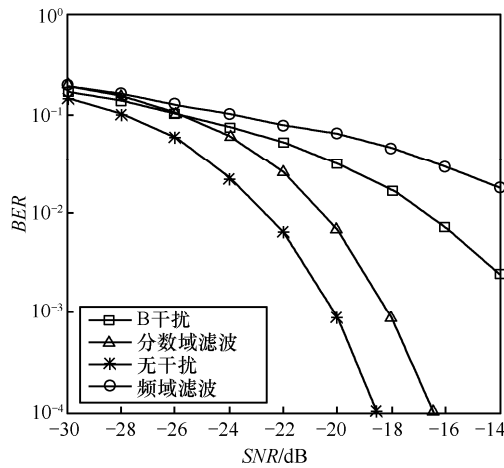


图 7 变换域滤波抑制干扰效果与频域滤波效果比较

5 结束语

本文的研究为混合业务传输问题提供了新的解决思路。不同类别业务通过对传输速率、CSS 调频率及扫频宽度的控制，具有对物理层传输质量的控制能力。结合基于 FrFT 的变换域信号处理方法，能够实现对混合业务类别的识别，为后续各单业务

调度策略提供支持并为多业务协同资源分配提供依据；变换域滤波解决了非正交 CSS 信号间干扰抑制问题，从而允许不同业务信号采用更灵活的非正交方式共享资源，具有进一步提高无线资源使用效率的潜力。适用于本文方法的多业务资源调度算法等上层策略以及与具体应用场景的结合等有待后续工作中逐步完善。

参考文献：

- [1] ANDREWS M, KUMARAN K, RAMANAN K. Providing quality of service over a shared wireless link [J]. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(2):150-154.
- [2] 范晨, 张琳, 廉文娟. 一种在混合业务中保证流业务 QoS 的调度算法[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(6):75-78.
FAN C, ZHANG L, LIAN W J. A scheduling algorithm for guaranteeing QoS of streaming traffic over mixed services[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(6):75-78.
- [3] BARKAT B, YINGTUO J. A modified fractional Fourier series for the analysis of finite chirp signals & its application [A]. Proceedings of 7th IEEE International Symposium on Signal Processing and Its Applications [C]. Piscataway NJ USA. IEEE, 2003.285-288.
- [4] LIN Q, TAO R, ZHOU S Y, WANG Y. Detection and parameter estimation of multi-component LFM signal based on the fractional Fourier transform[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2004, 47(2): 184-198.
- [5] ELKHAMY S E, SHAABAN S E. Matched chirp modulation detection and performance in dispersive communication channels[J]. Communications IEEE Trans on, 1988, 36 (4) : 506-509.
- [6] WINKELY M R. Chirp signals for communications [A]. Proceedings of IEEE WESCON Conference [C]. Piscataway, NJ, USA. IEEE, 1962. 14-17.
- [7] TSAI Y R, CHANG J F. The feasibility of combating multipath interference by chirp spread spectrum techniques over rayleigh and Rician fading channels[A]. Proceedings of IEEE 3rd International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications [C]. New York, NY, USA. IEEE, 1994.282-286.
- [8] PINKNEY J. Low Complexity Indoor Wireless Data Links Using Chirp Spread Spectrum[D]. The University of Calgary, 2003.
- [9] AHN H S, HUR H, CHOI W S. One-way ranging technique for CSS-based indoor localization[A]. Industrial Informatics 6th IEEE International Conference on (INDIN 2008)[C]. Daejeon, Korea, IEEE 2008. 1513-1518.
- [10] SPRINGER A, GUGLER W, HUEMER M, WEIGEL R. A wireless spread-spectrum communication system using SAW chirped delay

lines [J]. Microwave Theory and Techniques IEEE Trans on, 2001, 49(4): 754-760.

[11] ALMEIDA L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations [J]. Signal Processing IEEE Trans on, 1994, 42(11): 3084-3091.

[12] TAO R, ZHANG F, WANG Y. Research progress on discretization of fractional Fourier transform [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(7): 859-880.

[13] CANADAN C, KUTAY M A, OZAKTAS H M. The discrete fractional Fourier transform[J]. Signal Processing IEEE Trans on, 2000, 48(5): 1329-1337.

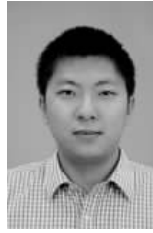
[14] 肇启明, 张钦宇, 张乃通. 多进制 chirp-rate 键控调制及分数傅里叶变换法解调[J].通信学报, 2010, 31(6):1-6.

ZHAO Q M, ZHANG Q Y, ZHANG N T. Multiple chirp-rate shift keying and a demodulation method based on fractional Fourier transform [J]. Journal on Communications, 2010, 31(6): 1-6.

[15] 赵兴浩, 邓兵, 陶然. 分数阶傅里叶变换数值计算中的量纲归一化[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(4):360-364.

ZHAO X H, DENG B, TAO R. Dimensional normalization in the digital computation of the Fractional fourier transform[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(4): 360-364.

作者简介:



肇启明 (1982-), 男, 满族, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为通信资源复用与抗干扰机理研究、通信信号处理等。



张钦宇 (1972-), 男, 江苏扬州人, 哈尔滨工业大学深圳研究生院教授、博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、无线通信技术、专用移动通信系统等。



张乃通 (1934-), 男, 江苏扬州人, 中国工程院院士, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 UWB、C4I 通信系统、专用移动通信系统、无线通信系统、卫星通信等。