

一种基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统 及其均衡算法

陈恩庆^{1,2}, 陶 然¹, 张卫强³, 孟祥意¹

(11 北京理工大学电子工程系, 北京 100081; 21 郑州大学信息工程学院, 河南郑州 450052; 31 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 在快速时变信道环境下, 由于子载波间干扰(ICI)的影响, 传统 OFDM 系统性能有较大下降. 本文提出了一种基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统, 它用分数阶傅里叶变换代替傅里叶变换进行子载波调制与解调; 同时, 文中给出了最优分数阶傅里叶变换阶次的选取方法, 并根据最小均方误差(MMSE)准则设计了分数阶傅里叶域乘性滤波器在接收端进行均衡. 分析和数值仿真结果表明, 最优分数阶傅里叶域的乘性滤波算法较频域方法有更好的均衡效果.

关键词: 分数阶傅里叶变换; OFDM; 时变信道; 信道均衡

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0402-06

The OFDM System and Equalization Algorithm Based on the Fractional Fourier Transform

CHEN Enqing^{1,2}, TAO Ran¹, ZHANG Weiqiang³, MENG Xiangyi¹

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China;

3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The performance of traditional OFDM system is greatly degraded in time-varying fading channel due to the inter-carrier interference (ICI). This paper proposes an OFDM system based on the fractional Fourier transform in which traditional Fourier transform is replaced by fractional Fourier transform to modulate and demodulate the symbols. The algorithm for selecting the optimal order of fractional Fourier transform is derived. Moreover, the multiplication filter in fractional Fourier domain is designed according to the minimum mean square error (MMSE) criterion to equalize the received signal. Theoretical analysis and numerical simulation results show that the proposed equalizer in optimal fractional Fourier domain can significantly improve the performance of OFDM compared with Fourier domain equalizer.

Key words: fractional Fourier transform; OFDM; time-varying channel; channel equalization

1 引言

正交频分复用(OFDM)技术是一种无线环境下的高速传输技术, 其主要思想是在频域内将给定信道分成若干正交子信道, 在每个子信道上使用一个子载波进行调制, 各子载波间并行传输^[1]. 对于时间弥散(频率选择性衰落)信道, 每个子信道上进行的都是窄带传输, 信号带宽小于信道的相干带宽, 因此可以大大消除符号间干扰(ISI)的影响. 同时, 由于在 OFDM 系统中各个子信道的载波相互正交, 它们的频谱可以相互重叠, 这样又提高了频谱利用率.

然而, 对于双弥散信道(或者说时频双选信道), 普

通的 OFDM 系统中子载波的正交性易受到破坏, 产生子载波间干扰(ICI), 从而造成系统性能的快速下降, 这种情况常发生在快速时变的无线信道中. 针对这种情况, 研究人员近年来提出了一系列减小 ICI 影响的方法^[2~7], 包括时域滤波^[2]、利用循环前缀^[3]、级数展开^[4]、卡尔曼滤波^[5]等方法. 但这些方法较为复杂, 有较大的运算量, 也没有从改变子载波基的角度考虑更简单而有效的方法. 文献^[6, 7]中的简化均衡方法虽然运算量有所降低, 但当信道变化较快时, 系统性能无法得到保证.

本文介绍的适用于快速时变信道的 OFDM 系统采用分数阶傅里叶变换(FRFT)来进行子载波调制与解

调,其子载波基信号为线性调频(LMF)信号.由于分数阶傅里叶变换存在快速算法,所以子载波调制与解调的计算复杂度与传统 OFDM 中傅里叶变换算法复杂度相当,同时和频域(傅里叶域)均衡相比,在时变信道环境下分数阶傅里叶域的均衡算法可以获得更好的误码率性能.文章第二部分介绍了基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统模型;第三部分介绍最优分数阶傅里叶域的选择,以及分数阶傅里叶域的滤波均衡算法;第四部分给出了仿真结果,并对结果进行了分析,说明了算法的有效性;第五部分总结全文.

2 基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统

2.1 分数阶傅里叶变换及其离散实现

分数阶傅里叶变换是傅里叶变换的一种广义形式.作为一种新的时频分析工具,分数阶傅里叶变换可以解释为信号在时频平面内坐标轴绕原点逆时针旋转某一角度后构成的分数阶傅里叶域上的表示方法^[8,9].

信号 $x(t)$ 的 FRFT 定义为^[9]:

$$X_p(u) = \left\{ F_p[x(t)] \right\} (u) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) K_p(t, u) dt \quad (1)$$

其中: $p = 2A/P$ 为 FRFT 的阶次, A 为分数阶傅里叶域与时域的夹角, $F_p[\cdot]$ 为 FRFT 算子符号, $K_p(t, u)$ 为 FRFT 的变换核:

$$K_p(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot A}{2P}} \exp\left\{j\frac{t^2+u^2}{2}\cot A - jut \csc A\right\}, & AX \neq nP \\ \delta(t-u), & A = 2nP \\ \delta(t+u), & A = (2n+1)P \end{cases} \quad (2)$$

FRFT 的逆变换为:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X_p(u) K_p(t, u) du \quad (3)$$

在实际应用中,往往需要计算离散形式的 FRFT(即离散分数阶傅里叶变换,DFRFT).目前已有几种不同类型的 DFRFT 快速算法,如分解型快速算法^[10]和直接采样算法^[11]等,它们具有不同的精度和计算复杂度.为保证在通信接收端能恢复发送序列,本文采用了文献[11]中的算法,该算法在保持同传统离散傅里叶变换算法复杂度相当的情况下(计算复杂度为 $O(P \log P)$, P 为采样点数),通过对输入输出采样间隔的限定,使 DFRFT 的变换核保持正交性,从而可以使经过正反两次变换后得到的序列和原序列完全一致.

文献[11]指出,对 FRFT 的输入输出分别以间隔 S_t 和 S_u 进行取样,当分数阶傅里叶域的输出采样点数 M 大于等于时域输入采样点数 N ,并且采样间隔满足

$$S_u S_t = |S|/2P \sin A \quad (4)$$

其中 $|S|$ 是与 M 互质的整数(常取为 1),DFRFT 可以表示为:

$$X_A(m) = A_A \# e^{(j/2)\cot A \# m^2 S_t^2} @ \sum_{n=0}^{N-1} e^{(j/2)\cot A \# n^2 S_t^2} e^{-j \frac{\sin(\sin A) \# 2Pnm}{M}} \# x(n), \text{ 当 } AX \neq P \quad (5a)$$

$$X_A(m) = x(m), \text{ 当 } A = 2DP \quad (5b)$$

和 $X_A(m) = x(-m), \text{ 当 } A = (2D+1)P \quad (5c)$

其中 $A_A = \sqrt{\frac{\sin(\sin A) \# (\sin A - \cos A)}{M}}$, D 为整数.

为了简化计算,通常取 $M = N$,这样,当 $AX \neq P$ 时,式(5a)可以写成如下矩阵形式:

$$X = F_A \# x \quad (6)$$

其中 $X = [X_A(0), X_A(1), \dots, X_A(N-1)]^T$, $x = [x_A(0), x_A(1), \dots, x_A(N-1)]^T$, F_A 为 $N \times N$ 矩阵,其元素为

$$F_A(m, n) = A_A e^{(j/2)\cot A \# m^2 S_t^2} \# e^{(j/2)\cot A \# n^2 S_t^2} \# e^{-j \frac{\sin(\sin A) \# 2Pnm}{N}}$$

同样,逆变换可以写为:

$$x = F_{2A} \# X \quad (7)$$

其中 $F_{2A} = F_A^H$.

2.2 信道模型

时变多径信道对于传输信号的影响可以用一个线性时变系统来描述.假设发送的序列为 $x(n)$,那么通过时变信道后得到的输出序列 $y(n)$ 可以表示为:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(n, l) x(n-l) + \alpha(n) \quad (8)$$

其中 $h(n, l)$ 是 n 时刻($n = 0, 1, \dots, N-1$)第 l 个延迟抽头的冲激响应, $\alpha(n)$ 表示具有方差 R_G 的加性高斯白噪声.在本文中,假设时变信道服从通常的广义平稳非相关散射^[12],并且多载波系统的保护间隔大于信道最大时延 L .如果将发射和接收序列分别用列向量 $x = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ 和 $y = [y(0), y(1), \dots, y(N-1)]^T$ 表示,那么式(8)可以写为:

$$y = H \# x + G \quad (9a)$$

其中 $H =$

$$\begin{bmatrix} h(0,0) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ h(1,1) & h(1,0) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h(L-1,L-1) & s & w & s & s \\ 0 & h(L,L-1) & s & s & s \\ \vdots & 0 & s & 0 & s \\ s & s & s & h(N-2,0) & 0 \\ 0 & 0 & \dots & h(N-1,1) & h(N-1,0) \end{bmatrix}_{N \times N}$$

为信道传输矩阵, G 为加性高斯白噪声向量.

当在发射信号 x 中加入循环前缀,并在接收端去掉后,等效的信道传输矩阵变为 H ,且有^[1]:

$$y = H \# x + G \quad (9b)$$

其中

$$H = \begin{pmatrix} h(0,0) & 0 & 0 & h(0,L-1) & h(0,1) \\ s & h(1,0) & 0 & 0 & w & s \\ h(L-2,L-2) & s & w & s & s & h(L-2,L-1) \\ h(L-1,L-1) & h(L-1,L-2) & s & h(N-L,0) & s & 0 \\ s & h(L,L-1) & s & s & h(N-L+1,0) & s \\ s & s & w & h(N-2,L-2) & s & w \\ 0 & 0 & h(N-1,L-1) & h(N-1,L-2) & h(N-1,0) \end{pmatrix}_{N \times N}$$

G 仍为加性高斯白噪声向量。

2.1.3 基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统

在 OFDM 系统中, 高速的串行数据流被分成多个并行的低速数据流, 然后分别调制到不同的正交子载波上进行传输, 从而延长符号周期, 有效应付多径效应引起的符号间干扰影响。传统的 OFDM 系统中, 通常以正交的复指数信号作为子载波, 通过逆离散傅里叶变换 (IDFT) 和离散傅里叶变换 (DFT) 实现子载波调制与解调。设发射端的离散时间信号经数字调制、插入导频后可用 d_k 表示, 并且 $E\{|d_k|^2\} = 1$, 系统每个 OFDM 符号子载波的个数为 N , 并且每个子载波上的符号能量为 $E_s = 1$, 则未加循环前缀的基带信号可以表示为:

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi n k / N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10a)$$

或用矩阵形式表示为:

$$s = F^H d \quad (10b)$$

其中 F^H 为傅里叶逆变换矩阵, $d = [d(0), d(1), \dots, d(N-1)]^T$ 。

在接收端, 根据式 (9b), 去掉循环前缀并做离散傅里叶变换后得到的基带接收信号为:

$$y = F^H H F^H d + F^H G = H d + F^H G \quad (11)$$

其中 $H = F^H H F^H$ 。

当信道为非时变时, 等效信道矩阵 H 为一循环矩阵, 它可以很容易地被傅里叶变换矩阵对角化, 使得

$$H = \text{diag}[H(0), H(1), \dots, H(N-1)] \quad (\text{其中 } H(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \exp(-j2\pi n l / N))$$

为一对角阵, H 的元素即为时不变信道的频域响应。因此, 在接收端通过简单的单抽头的频域均衡器即可恢复原发射信号。

然而, 当信道为时变时, 信道矩阵 H 不再是循环矩阵, 它将无法再被傅里叶变换对角化, 即 H 将不再是对角阵, 而是一个一般方阵。 H 对角线以外元素的作用即对应子载波间的干扰, 因此, 如果能够增大 H 对角线上元素的比重, 同时减小对角线外元素的比重, 即尽量使 H 趋于对角化, 便可减小 ICI 的影响, 从而达到更好的均衡效果。于是, 我们应用分数阶傅里叶变换代替传统 OFDM 系统中的傅里叶变换, 并寻找使 H 具有更好对角化特性的分数阶傅里叶变换阶次, 设计基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统, 实现更好的传输效果。

基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统框图如图 1 所示。经过串并变换后的数据, 通过分数阶傅里叶逆变换进行子载波调制, 这样用来调制并行数据的子载波信号变为具有相同调频率、不同中心频率的线性调频信号。

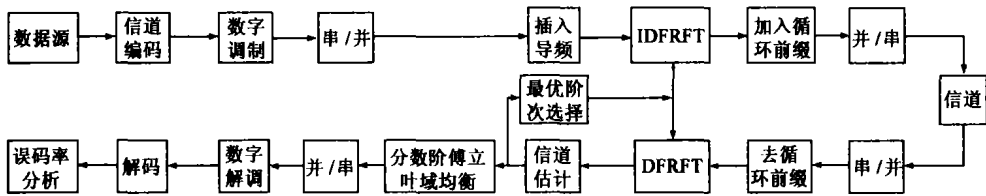


图 1 基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统框图

在接收端, 为了选择和时变信道最匹配的分数阶傅里叶域进行传输, 需要在接收端进行信道估计, 以及最优分数阶傅里叶域的选择。具体最优分数阶傅里叶域的选择算法将在下面做详细介绍, 而时变信道的估计方法可参看相关文献 [13, 14], 具体信道估计算法超出了本文的研究范围不再赘述。在选出最优阶次分数阶傅里叶域后, 最优阶次信息通过一定通道反馈给发射端, 于是发射和接收端用此选定的最优阶次的分数阶傅里叶变换进行子载波调制与解调。接收端经过分数阶傅里叶变换后的信号, 将在分数阶傅里叶域按最

小均方误差准则设计乘性滤波器进行均衡, 均衡算法也将下面给出。均衡后的信号经过数字解调, 信道解码等操作后形成接收机输出。

3 最优阶次分数阶傅里叶域选择及分数阶傅里叶域均衡

根据分数阶傅里叶变换的定义及式 (7), 设第 i 个 OFDM 符号为

$$s = F_{2\alpha} d_A \quad (12)$$

其中 $d_A = [d_A(0), d_A(1), \dots, d_A(N-1)]^T$ 和 $s = [s(0),$

$s(1), \dots, s(N-1)]^T$ 分别为数据向量和子载波调制后的向量.

在接收端, 去掉保护间隔后的接收信号为

$$r = H \# s + G \quad (13)$$

进行离散分数阶傅里叶变换后可表示为

$$y = F_A \# r = F_A \# H \# F_{2A} \# d_A + F_A \# G = H_A \# d_A + G_A \quad (14)$$

其中 $H_A = F_A \# H \# F_{2A}$ 为 $N \times N$ 矩阵, 其元素为 $h_A(k, n)$ ($k, n = 0, 1, \dots, N-1$); $G_A = F_A \# G$ 为噪声的分数阶傅里叶变换, 仍为高斯随机向量. 如果将 H_A 表示为

$$H_A = H_A^u + H_A^{IQ} \quad (15)$$

那么式(14)又可写为

$$y = H_A^u \# d_A + H_A^{IQ} \# d_A + G_A \quad (16)$$

其中 $H_A^u = \text{diag}(h_A(k, k))$, $k = 0, 1, \dots, N-1$ 和 H_A^{IQ} 分别为分数阶傅里叶域等效信道矩阵 H_A 对角线上和对角线外元素组成的矩阵, 它们分别对应有用信号 $s_u = H_A^u \# d_A$ 和子载波间的干扰信号 $s_{ICI} = H_A^{IQ} \# d_A$.

由式(16), 为了达到最优的均衡效果, 应尽量增大有用信号而减小 ICI, 所以可以选择使 ICI 信号和有用信号具有最小能量比值的分数阶傅里叶域进行子载波调制、解调及均衡. 由此, 定义目标函数为

$$E_A = \frac{E[s_{ICI}^H s_{ICI}]}{E[s_u^H s_u]} \quad (17)$$

假设所传输的数据间相互独立并且具有相同的统计特性, 即 $E[d_A d_A^H] = I$ (I 为单位阵), 那么目标函数又可以写为

$$E_A = \frac{H_A^{IQ} + H_A^{IQH}}{H_A^u + H_A^{uH}} \quad (18)$$

其中 $+\#+$ 表示矩阵 Frobenius 范数. 这样, 用来传输数据的最优分数阶傅里叶域即可选为使式(18)有最小值的 A 角所对应分数阶傅里叶域. 当选出的使目标函数值为最小的分数阶傅里叶变换阶次恰好为 1 时, 基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统即转化为传统的基于傅里叶变换的 OFDM 系统.

下面不妨设选出的最优分数阶傅里叶域所对应的角度为 A_{opt} , 我们将在 A_{opt} 对应分数阶傅里叶域推导基于最小均方误差 (MMSE) 准则的乘性滤波器, 实现对接收信号的均衡.

设分数阶傅里叶域乘性滤波器用 G 表示, $G = \text{diag}(g_{k,k})$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, 则经过乘性滤波器均衡后的信号可以表示为

$$d_{A_{opt}} = G \# y \quad (19)$$

其中 $d_{A_{opt}} = [d_{A_{opt}}(0), d_{A_{opt}}(1), \dots, d_{A_{opt}}(N-1)]^T$. 根据 MMSE 准则, 滤波器 G 应使如下误差函数达到最小

$$J_k = E\{|d_{A_{opt}}(k) - d_{A_{opt}}(k)|^2\} \quad (20)$$

由线性最小均方误差的正交条件, 滤波器 G 中各

滤波算子 $g_{k,k}$ ($k = 0, 1, \dots, N-1$) 应满足如下关系

$$E\{[d_{A_{opt}}(k) - d_{A_{opt}}(k)]y^*(k)\} = 0 \quad (21)$$

即:

$$E\{d_{A_{opt}}(k)y^*(k)\} = E\{d_{A_{opt}}(k)y^*(k)\} \quad (22)$$

将式(19)代入式(21), 于是得到分数阶傅里叶域乘性滤波算子为

$$g_{k,k} = \frac{E\{d_{A_{opt}}(k)y^*(k)\}}{E\{y(k)y^*(k)\}} \quad (23)$$

当信道矩阵 H 已知时, 又可由式(14)得:

$$g_{k,k} = \frac{E\left\{\sum_{n_1=1}^N h_{A_{opt}}(k, n_1) d_{A_{opt}}(k) d_{A_{opt}}^*(n_1) + d_{A_{opt}}(k) G_{A_{opt}}^*(k)\right\}}{E\left\{\sum_{n_1=1}^N h_{A_{opt}}(k, n_1) d_{A_{opt}}(n_1) \sum_{n_2=1}^N h_{A_{opt}}^*(k, n_2) d_{A_{opt}}^*(n_2) + G_{A_{opt}}(k) G_{A_{opt}}^*(k)\right\}} \quad (24)$$

根据数据间独立同分布的假设, 并假设数据与噪声间也是相互独立的, 式(24)还可以进一步简化为:

$$g_{k,k} = \frac{h_{A_{opt}}(k, k)}{\sum_{n=1}^N h_{A_{opt}}(k, n) h_{A_{opt}}^*(k, n) + E\{G_{A_{opt}}(k) G_{A_{opt}}^*(k)\}} \quad (25)$$

至此, 我们给出了信道矩阵已知时, 最优分数阶傅里叶域选择方法以及分数阶傅里叶域乘性滤波均衡器设计方法.

4 仿真结果

为了验证所提出算法的有效性, 本文进行了 Monte Carlo 仿真. 仿真中, 假设信道为广义平稳非相关散射多径信道, 多径条数为 3 条, 其中一条为直达路径, 另两条路径相对于直达路径的衰减均为 3dB. 基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统子载波数为 52, 其中数据子载波 48 个, 导频子载波 4 个, 每个 OFDM 符号的采样序列为 64 点, 循环前缀长度为 16, 数字调制方式为 QPSK, 每帧由 80 个符号组成. 选取归一化多普勒频移为 0.15, 图 2 给出了应用不同阶次分数阶傅里叶变换进行子载波调制/解调时, 目标函数 E_A 的大小. 从图中可以看出, 当阶

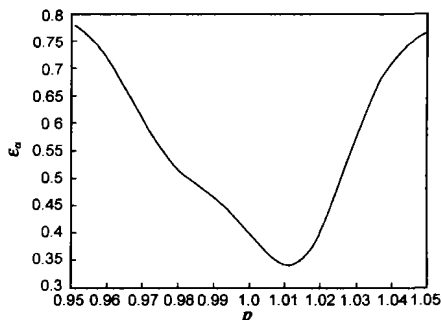


图 2 不同阶次分数阶傅里叶变换选取的目标函数 E_A

次 $p=1101$ 时, E_A 取得最小值, 因此选择该阶分数阶傅里叶域进行子载波调制、解调与均衡。

图 3 给出了在 $p=1101$ 阶分数阶傅里叶域进行均

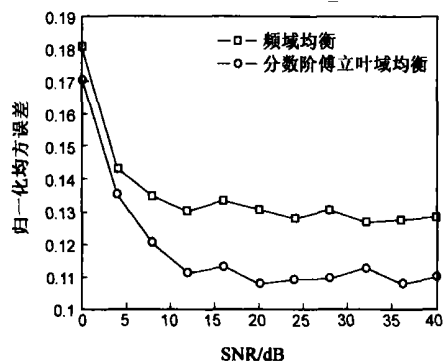


图 3 分数阶傅立叶域滤波器估计误差与频域滤波器估计误差比较

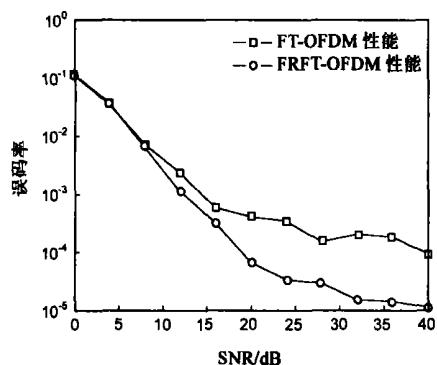


图 4 基于 FRFT 与基于 FT 的 OFDM 系统误码率性能比较 (数字调制方式为 QPSK)

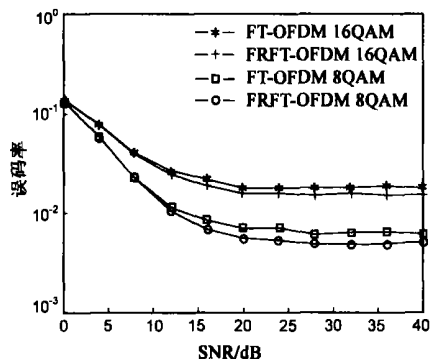


图 5 不同数字调制方式下基于 FRFT 与基于 FT 的 OFDM 系统误码率性能比较

衡所得归一化后的估计误差与传统 OFDM 在频域进行均衡所得归一化估计误差的性能比较。从图中可以看出, 在该分数阶傅里叶域进行均衡得到的误差性能较频域均衡的误差性能有明显提高。图 4 为基于该阶次 FRFT 的 OFDM 系统与传统 OFDM 系统的误码率性能比较, 其中所给出的系统误码率曲线为未经过信道编解码的原始误码率。由图 4 可以发现, 基于分数阶傅里叶

变换的 OFDM (FRFT-OFDM) 系统误码率性能较传统 OFDM (FT-OFDM) 系统有较大改善, 可以达到更低的误码率水平。图 5 则给出了 8QAM 和 16QAM 调制方式下基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统与传统 OFDM 系统的原始误码率性能的比较, 从图中可以看出, 在与图 4 同样的信道环境下, 由于数字调制位数的增加, 传统 OFDM 系统与基于 FRFT 的 OFDM 系统性能均有下降, 但本文提出的系统及算法性能仍较传统 OFDM 系统性能有所改善。

5 结论

本文针对 OFDM 系统在时变多经信道环境下由于子载波间干扰性能严重下降的问题, 提出了用分数阶傅里叶变换代替傅里叶变换进行子载波调制与解调, 并且给出了选择最优分数阶傅里叶变换阶次的方法, 即以子载波间干扰与有用信号能量比为目标函数, 寻找使其最小化的分数阶傅里叶变换阶次进行子载波调制与解调。同时, 本文还根据最小均方误差准则推导了分数阶傅里叶域乘性滤波器, 以此对子载波解调后的信号在分数阶傅里叶域进行均衡。计算机仿真结果表明, 在存在较大多普勒频移的情况下, 本文提出的基于分数阶傅里叶变换的 OFDM 系统误码率较传统 OFDM 系统有较大改善。

参考文献:

- [1] Z Wang, G B Giannakis. Wireless multicarrier communications: where fourier meets shannon[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(3): 29- 48.
 - [2] Y2 S Choi, P J Voltz, F A Cassara. On channel estimation and detection for multicarrier signals in fast and selective Rayleigh fading channels[J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49(8): 1375 - 1387.
 - [3] Shaoping Chen, Guangfa Dai, Tianren Yen. Zero forcing equalization for OFDM systems over doubly selective fading channels using frequency domain redundancy[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(4): 1004- 1008.
 - [4] P M G Linnartz, A Gorokhov. New equalization approach for OFDM over dispersive and rapidly time varying channel[A]. Proc of 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor Mobile Radio Commun[C]. New York: IEEE, 2000. 1375- 1379.
 - [5] K2 Young Han, et al. Channel estimation for OFDM with fast fading channels by modified Kalman filter[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2004, 50(2): 443- 449.
 - [6] 蒋欣, 罗汉文, 宋文涛. 一种消除 OFDM 子信道干扰的均衡新方法[J]. 电子学报, 2004, 32(4): 536- 539.
- JIANG Xin, LUO Hanwen, SONG Wentao. A novel equalization method by cancelling interchannel interference in OFDM

- system[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(4): 536 - 539. (in Chinese)
- [7] X Cai, G B Giannakis. Low complexity ICI suppression for OFDM over time and frequency selective Rayleigh fading channels[A]. Proc of Asilomar Conf Signals, Systems and Computers[C]. New York: IEEE, 2002. 1822- 1826.
- [8] V Namias. The fractional order fourier transform and its application to quantum mechanics[J]. J of Appl Math, 1980, 25: 241 - 265.
- [9] L B Almeida. The fractional Fourier transform and time frequency representations[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(11): 3084- 3091.
- [10] H M Ozaktas, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans on SP, 1996, 44(9): 2141 - 2150.
- [11] So Chang Pei, Jian Ding. Closed form discrete fractional and affine fourier transforms[J]. IEEE Trans on SP, 2000, 48(5): 1338- 1353.
- [12] P A Bello. Characterization of randomly time variant linear channels[J]. IEEE Trans on SP, 1963, 11(4): 360- 393.
- [13] Y (G) Li, L J Cimini Jr, N R Sollenberger. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels[J]. IEEE Trans on Communications, 1998, 46(7): 902- 914.
- [14] 陈恩庆, 陶然, 张卫强. 一种基于分数阶傅里叶变换的时变信道参数估计方法[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2101 - 2104.
- CHEN Enqing, TAO Ran, ZHANG Weiqiang. A method for time varying channel parameter estimation based on fractional

Fourier transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2101- 2104. (in Chinese)

作者简介:



陈恩庆 男, 1977 年 8 月生于天津市, 2000 年毕业于郑州大学电子工程系通信工程专业, 获学士学位, 2003 年获郑州大学信息工程学院通信与信息系统专业硕士学位, 现为北京理工大学博士研究生, 目前主要从事通信信号处理, 时频分析理论, 以及 3G、OFDM、MIMO 等系统关键技术的研究。E-mail: enqingchen@tom.com



陶然 男, 1964 年 11 月出生于安徽南陵. 1993 年毕业于哈尔滨工业大学获博士学位, 1996 年毕业于北京理工大学电子学与通信学科博士后出站, 2001 年 3 月~2002 年 4 月在美国安娜堡密西根大学访问研究一年. 现任北京理工大学电子工程系副主任、信息安全与对抗研究中心主任、信息安全与对抗学科首席教授、博士生导师. 获 / 高校青年教师奖 0 / 中国兵工青年科技奖 0.

另获部级二等奖 2 项、部级三等奖 4 项、海军优秀教材一等奖 1 项. 被 3 大检索收录论文百余篇, 在 IEEE Trans, Fuzzy Sets and Systems, 中国科学(中、英文版)、电子学报(中、英文版)、兵工学报(中、英文版)发表论文 40 余篇. 以第一作者出版著作、教材 4 部. 完成和承担多项国家自然科学基金重点项目、部委重点项目和产业化项目. 研究方向: 信息安全与对抗、通信与信息系统. 兼任中国雷达行业协会副理事长, 中国电子学会青年工作委员会副主任, 中国兵工学会信息安全与对抗专业委员会总干事, 兵工学报 6 常务编委, 总装备部综合电子战专家组特邀专家, 北京市科学技术奖评审委员会评委, IEEE 高级会员. E-mail: rantao@bit.edu.cn