

**W**eighted-Type Fractional Fourier Transform and  
Its Applications in Communications Systems

# 加权分数傅里叶变换 及其在通信系统中的应用

沙学军 梅林 张钦宇 ◎ 著  
张乃通 ◎ 审校



中国工信出版集团

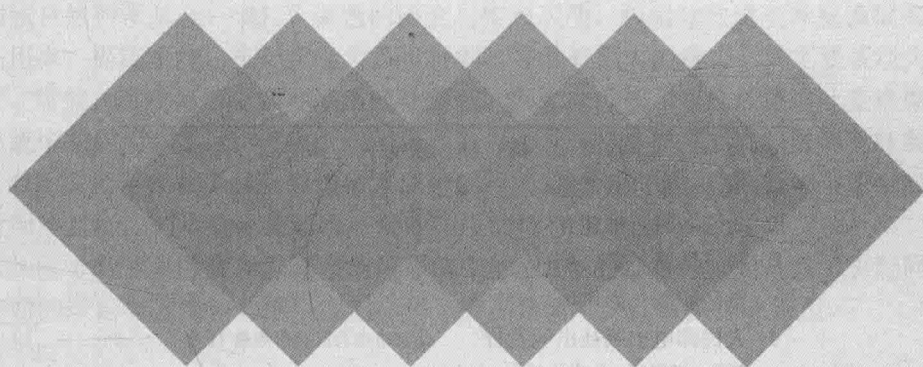


人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

Weighted-Type Fractional Fourier Transform and  
Its Applications in Communications Systems

# 加权分数傅里叶变换 及其在通信系统中的应用

沙学军 梅林 张钦宇 ◎ 著  
张乃通 ◎ 审校



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

加权分数傅里叶变换及其在通信系统中的应用 / 沙学军, 梅林, 张钦宇著. — 北京: 人民邮电出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-115-41082-5

I. ①加… II. ①沙… ②梅… ③张… III. ①傅里叶变换—应用—通信系统 IV. ①TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第052470号

内 容 提 要

本书首先介绍目前通信系统的载波体制, 基于对载波体制的分析提出基于时频协同的融合载波体制的新设想。第2章和第3章分别基于加权分数傅里叶变换的基本理论, 分析介绍信号处理需要的离散算法, 研究分析基于加权分数傅里叶变换信号设计方法及信号特性; 第4章根据加权分数傅里叶变换的理论, 结合信道均衡理论, 详细分析介绍线性均衡方法在混合载波体制下的设计实现方法与性能评价; 第5章依据目前陆地移动通信的主要场景, 设计分析双弥散信道下的迭代均衡技术与实现方法; 第6章将分析重点扩展到多用户条件下, 分析分数域多址的信号设计与处理方法。

本书从基本数学模型入手, 设计分析新的信号体制和传输补偿技术, 从单点信号传输开始, 逐步扩展到复杂信道和多用户环境, 针对对应研究点提出不同的研究设想和分析方法。

本书的内容是在“973”计划和国家自然科学基金课题支持下全体课题组成员的成果, 本书可以作为高等学校通信专业的教材和相关研究人员的参考书。

- 
- ◆ 著 沙学军 梅 林 张钦宇  
审 校 张乃通  
责任编辑 邢建春  
执行编辑 肇 丽  
责任印制 彭志环
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 — 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 15  
字数: 365 千字
- 2016 年 12 月第 1 版  
2016 年 12 月北京第 1 次印刷
- 

定价: 89.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055315

# 序

无线电频谱是一项巨大的资源，今天随着信息化进程的加快，人们需要更宽的频带，更大的容量，更高速的信息处理、交换和传输。频谱资源显得日趋紧张，如何有效提高有限频谱资源的利用率被提到了显著的位置。通信的干扰（含人为有意/无意干扰、工业干扰和自然干扰）和抗干扰是通信应用中的一对“矛”和“盾”，是通信界人士一直关注的问题，相关理论与技术也在实践中不断地丰富与发展。上述两点都是无线通信生存能力的核心问题。研究与解决该问题的传统理论基础是以正弦信号为基函数的傅里叶变换，它反映了信号时域或频域的整体特性，该理论与技术持续了百余年。当今，在实际中应用传统傅里叶分析技术往往显得不尽如人意。于是，一系列新型信号分析方法应运而生，大大扩展了传统傅里叶变换理论的内涵和外延。加权分数傅里叶变换就是在传统傅里叶变换基础上发展起来的一种新型信号分析与处理方法。它是一种广义的傅里叶变换，融合了传统时域分析与傅里叶分析，突破了在单一时域和频域分析的局限性，能够在时间和频率联合域内分析与处理信号。此外，加权分数傅里叶变换在复平面和时频平面上都具有独特的性质，其时频表述与传统通信系统中的单/多载波模型相对应，为适应不同传输环境并在同一系统内实现单载波/多载波体制提供理论依据和实现思路，同时也为载波体制的整体融合提供了理论支持。此外，加权分数傅里叶信号设计可以在信号峰均比（PAPR）上有效平衡单载波和多载波信号，与实际传输系统的硬件设施具有更好的适应能力。目前，如何将分数域理论分析与通信系统相结合，并应用到通信系统中解决通信的技术问题就变成了需要研究的问题。

国家自然科学基金、“973”课题的研究与实践表明，利用分数傅里叶变换提高通信系统频谱利用率，提高干扰、抗干扰能力是可行的，并具有很大的潜力。其主要表现为：通信参数可变、可控，对通信信道的环境适应性更强。因此在出版了《分数傅里叶变换原理及其在通信系统中的应用》之后，再次组织编著了本书，其目的是理解加权分数傅里叶数学理论的性质，用新型信号分析工具刻画通信系统中的相关定理与准则，达到数学与通信相结合并为通信所用的目标，初步论证在通信系统中应用的可行性和性能收益。

《加权分数傅里叶变换及其在通信系统中的应用》的推出一方面是为了引起同行共同关注这方面的理论与应用，并推广应用；另一方面恳请广大读者批评、指正。

中国工程院院士

2015年7月

# 前 言

通信是一个基于能量传递的信息交换过程,通信质量的好坏很大程度上依赖于对空间、时间、频率和功率等资源占有的多少。如何更加有效地利用接收到的有限能量,则成为通信信号处理与系统设计的重要目标。

传统的通信技术从时域信号处理开始,后来引入频域处理,再到引入通信码型设计等多种技术手段,从而有效地降低了信号之间的互相影响,提升了接收的有限能量利用率。然而,在人们对通信业务需求不断增长、业务类型不断翻新的今天,有限资源与无限需求的矛盾变得越发突出。为了提高有限资源的利用效率和对资源分配的公平性,拓展新资源、研究资源的重复利用方式,以及抑制通信过程中的各种干扰等问题就显得十分必要。传统的分析方法是傅里叶变换理论,而分数傅里叶变换是傅里叶变换的推广,或者说传统的傅里叶变换理论是分数傅里叶理论的一个特例。本书基于现有的加权分数傅里叶变换(WFRFT, Weighted-Type Fractional Fourier Transform)理论,使之与当前的主流通信体制结合,将WFRFT理论和方法应用到了通信信号的设计、处理与系统资源分配上。书中提出了新的混合载波体制,并较为详细地分析了WFRFT理论在通信系统与信号处理中带来的好处;同时与目前的主力体制进行分析对比,提出了针对复杂信道环境中新的系统设计方案。

本书的研究与分析主要从WFRFT基本理论入手,从系统“协同”(Synergetics)和“融合”(Convergence)的角度建立了单载波与多载波兼容和无缝隙过渡的系统体制模型;其次,对WFRFT域的信号处理、信道均衡等技术手段给出了较为详细的分析;而后对系统多址性能进行了分析设计,在兼容现有体制的前提下,为通信新体制的发展提供了新的理论支撑。本书的内容贯穿了与现有系统协同和融合的设计思想,从第二代移动通信网络设计开始到目前为止,这些都是通信技术研究遵循的主流思想,前者更注重现有不同技术、系统与设备在对等关系下的合作,而后者则更关心目标或任务一致,但实现方式不同的技术、网络与系统之间的整合与统一。

通信过程中存在的系统、信号、干扰等都以由时、空、频、能量等物理关系抽象出的数学工具和模型来表征、分析。而在这些通信过程所依赖的资源中,时间与频率这一对物理量最为人们所熟悉,通信中遇到的许多问题最终都可以归结为时频资源受限以至无法同时满足时、频域约束条件的矛盾。传统通信理论中所孤立使用的数学工具已经无法简单、准确地描述新需求背景下复杂的时频关系。其中最为典型的就高速移动环境下的宽带无线接入问题,即在高运动速率、高数据速率背景下进行可靠传输的问题。在此背景下,信道呈现一种“双弥散”的特性,即由多径造成的时间弥散和由多普勒频移造成的频率弥散。在双弥散的信道下,影响通信质量的主要因素体现为符号间干扰和载波间干扰。在实际操作中,通常很难同时抑制这两种干扰,例如,为了减小符号间干扰而采用的多载波系统却对载波间干扰十分敏感。针对移动系统来说,主要问题就是要设计出有效地对抗时频双选择性衰落的技术。

传统的理论与方法是基于傅里叶分析,在时域和频域中分别处理,一定程度上联合时频处理的结果。本书的研究将解决方法从传统的傅里叶变换域扩展到了WFRFT域。一方面在理论上,傅里叶分析将作为WFRFT的一个特例;另外一个方面,在WFRFT域信号的时频分量将融合为一个整体,为解决这一类“时频联合”或“时频协同”问题,提供了新的理论根据。

目前的通信体制主要包括 3G 的宽带单载波和 4G 的正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), 这两种体制分析论证完备, 系统设计成熟。5G 的研究目前很多内容没有确定, 国际上和我国均有不同技术的提出。本书的内容是基于目前我们课题组的研究, 针对系统体制和相关信号处理方法而提出的。宽带单载波信号与 OFDM 信号在实际使用表现除了不同特点, 例如, 宽带单载波信号多普勒效应适应性较好, 而 OFDM 则抵抗密集多径能力较强, 其理论机理在时域和频域分析中已有介绍。如果可以将这两种体制的优势融合起来, 建立一种同时可以抵抗多径和多普勒的信号体制, 对未来的陆地移动通信的传输将有重要作用。基于这样的目标, 本书将以 WFRFT 理论为基础, 通过理论分析和数值计算等方法, 创新性地将 WFRFT 应用于系统设计与信号处理, 希望得到既具有兼容目前体制又具有适合时频双弥散信道的通信信号和体制; 此外, 针对专用和特种通信系统, 论述分析了信号抗检测的特性和应用前景。

本书的研究得到了“973”计划和国家自然科学基金的支持, 作者承担的“973”计划项目(编号: 2013CB329003, 2007CB310606)和国家自然科学基金项目(面上项目 61171110 和青年项目 61201146)研究工作表明, 多种变换域协同、多种技术手段协同可以提高通信系统的抗干扰能力和资源使用效率。沙学军教授和张钦宇教授指导了全书内容的研究, 并具体撰写了第 1、5、6 章; 梅林博士参与了全书内容的研究, 撰写了第 2、3、4 章, 并承担了书稿内容的组织工作; 张乃通院士对全书进行了审校。此外, 课题组成员王焜博士、邱昕博士参与了第 4、5、6 章的研究与素材准备工作, 李勇博士、王晓鲁、房宵杰、王震铎等项目组成员参与了本书内容的研究工作, 冉启文、迟永刚、吴宣利、宁晓燕、史军等各位老师对本书提出了宝贵而有建设性的意见。

本书可以作为高等学校通信专业的教材和相关研究人员的参考书。本书是全体课题组成员的成果, 希望得到广大同行的批评、指正、充实、讨论。

作者  
哈尔滨工业大学  
2016 年 4 月

# 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 导论 .....                       | 1  |
| 1.1 载波体制及其相关技术 .....                 | 1  |
| 1.1.1 传统单载波体制 .....                  | 2  |
| 1.1.2 多载波技术 .....                    | 2  |
| 1.1.3 单载波频域均衡技术 .....                | 4  |
| 1.1.4 SC-FDE 与 OFDM 的比较 .....        | 7  |
| 1.1.5 现有通信系统的载波体制 .....              | 9  |
| 1.1.6 载波体制的发展方向 .....                | 10 |
| 1.2 面向 2020 年及更远未来的移动无线通信系统 .....    | 10 |
| 1.2.1 未来无线通信系统的场景及需求 .....           | 11 |
| 1.2.2 未来无线通信系统中的关键技术 .....           | 13 |
| 1.2.3 未来移动通信系统需求及关键技术对于调制方式的影响 ..... | 14 |
| 1.2.4 融合单载波与多载波的技术方案 .....           | 16 |
| 1.3 通信系统抗截获技术研究 .....                | 17 |
| 1.4 本书的章节安排 .....                    | 19 |
| 参考文献 .....                           | 20 |
| 第 2 章 加权分数傅里叶变换 .....                | 28 |
| 2.1 概述 .....                         | 28 |
| 2.2 傅里叶变换 .....                      | 29 |
| 2.2.1 傅里叶变换的定义 .....                 | 29 |
| 2.2.2 离散傅里叶变换的矩阵表达形式 .....           | 29 |
| 2.2.3 傅里叶变换的特征值和特征函数 .....           | 31 |
| 2.3 经典 Chirp 类分数傅里叶变换 .....          | 31 |
| 2.4 经典加权分数傅里叶变换 .....                | 33 |
| 2.4.1 经典加权分数傅里叶变换的提出 .....           | 33 |
| 2.4.2 经典加权分数傅里叶变换的加权系数 .....         | 34 |
| 2.4.3 加权系数表达式等价性证明 .....             | 37 |
| 2.5 广义加权分数傅里叶变换 .....                | 38 |
| 2.5.1 WFRFT 与 CFRFT 之间的关系 .....      | 38 |
| 2.5.2 多项加权分数傅里叶变换 .....              | 39 |

|              |                               |            |
|--------------|-------------------------------|------------|
| 2.5.3        | 多参数加权分数傅里叶变换                  | 40         |
| 2.5.4        | 加权分数傅里叶变换与广义置换矩阵族             | 41         |
| 2.6          | 分数傅里叶变换的特征值                   | 43         |
| 2.7          | 连续函数 WFRFT 的数值算法              | 44         |
| 2.7.1        | 定义直接算法                        | 44         |
| 2.7.2        | 加权 DFT 算法的缺陷                  | 46         |
| 2.7.3        | 基于 DFT 的离散 4-WFRFT 算法         | 48         |
| 2.7.4        | 算例                            | 49         |
| 2.8          | 离散序列的 WFRFT 及其矩阵表达形式          | 52         |
| 2.8.1        | 离散序列 4-WFRFT 的定义              | 52         |
| 2.8.2        | 离散序列加权分数傅里叶变换矩阵               | 53         |
| 2.9          | 本章小结                          | 55         |
|              | 参考文献                          | 56         |
| <b>第 3 章</b> | <b>基于 WFRFT 的数字通信系统及其信号特征</b> | <b>58</b>  |
| 3.1          | 基于 WFRFT 数字通信系统模型             | 58         |
| 3.1.1        | 数字通信系统中离散序列 WFRFT 的物理含义       | 58         |
| 3.1.2        | WFRFT 数字通信系统的框架               | 59         |
| 3.2          | WFRFT 信号的星座图                  | 61         |
| 3.2.1        | 单参数 WFRFT 信号星座图的旋转特性          | 61         |
| 3.2.2        | 多参数 WFRFT 信号的星座分裂             | 63         |
| 3.3          | WFRFT 信号的谱                    | 67         |
| 3.3.1        | OFDM 系统的频谱                    | 67         |
| 3.3.2        | WFRFT 信号的谱                    | 72         |
| 3.3.3        | 主动干扰消除 (AIC) 频域陷波方法           | 74         |
| 3.4          | WFRFT 信号的统计特性                 | 75         |
| 3.5          | WFRFT 信号的峰均功率比                | 81         |
| 3.6          | WFRFT 信号的比特能量分布               | 84         |
| 3.7          | 简化选择性衰落信道模型下不同载波体制误码率性能比较     | 85         |
| 3.8          | WFRFT 扩展 OFDM 系统及其抗窄带干扰性能分析   | 87         |
| 3.8.1        | 抗窄带干扰研究现状                     | 87         |
| 3.8.2        | 窄带干扰模型                        | 88         |
| 3.8.3        | WFRFT 扩展 OFDM 系统模型            | 89         |
| 3.8.4        | WFRFT 扩展 OFDM 系统抗窄带干扰性能分析     | 91         |
| 3.9          | 单参数四项加权分数傅里叶变换参数的抗扫描特性        | 96         |
| 3.10         | 本章小结                          | 98         |
|              | 参考文献                          | 98         |
| <b>第 4 章</b> | <b>混合载波通信系统的线性均衡方法</b>        | <b>101</b> |
| 4.1          | 现行双选信道下干扰抑制技术                 | 101        |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 4.1.1 | 由双选信道引起的 SC/MC 系统中 ISI/ICI  | 101 |
| 4.1.2 | 针对双选信道的 ICI 抑制技术            | 103 |
| 4.1.3 | 双选信道均衡方法                    | 103 |
| 4.1.4 | 新型载波体制演进                    | 105 |
| 4.2   | 衰落信道模型                      | 106 |
| 4.2.1 | 小尺度衰落                       | 106 |
| 4.2.2 | 频率弥散信道建模                    | 108 |
| 4.2.3 | 多普勒功率谱密度                    | 110 |
| 4.2.4 | 时间弥散信道建模                    | 110 |
| 4.2.5 | 双选信道特性及建模                   | 111 |
| 4.3   | 时、频域及 WFRFT 域信道矩阵建模         | 114 |
| 4.3.1 | 时域信道矩阵                      | 114 |
| 4.3.2 | 频域信道矩阵                      | 116 |
| 4.3.3 | WFRFT 域信道矩阵                 | 118 |
| 4.4   | 带有频域线性均衡的混合载波系统             | 120 |
| 4.4.1 | 系统描述                        | 120 |
| 4.4.2 | 带有频域 ZF 均衡的 WFRFT 系统性能      | 122 |
| 4.4.3 | 带有频域 MMSE 均衡的 WFRFT 系统性能    | 124 |
| 4.5   | 双选信道下混合载波线性均衡方法             | 125 |
| 4.5.1 | 双选信道线性均衡方法                  | 125 |
| 4.5.2 | 混合载波调制 BLE 方法               | 130 |
| 4.5.3 | 混合载波调制 SLE 方法               | 133 |
| 4.5.4 | 系统复杂度分析                     | 135 |
| 4.5.5 | 误码性能仿真                      | 136 |
| 4.6   | 本章小结                        | 141 |
|       | 参考文献                        | 142 |
| 第 5 章 | 双选信道下混合载波体制通信系统的迭代均衡方法      | 147 |
| 5.1   | 引言                          | 147 |
| 5.2   | 传统单载波体制下 TD-IMSE 方法         | 148 |
| 5.2.1 | 迭代均衡的基本结构和信号处理过程            | 148 |
| 5.2.2 | 基于时域先验信息的时域 MMSE 线性估计       | 149 |
| 5.2.3 | 时域 LLR 更新及先验信息反馈            | 151 |
| 5.3   | 混合载波体制下的 TD-IMSE 方法         | 152 |
| 5.3.1 | TD-IMSE 实现原理                | 152 |
| 5.3.2 | 基于 WFRFT 域先验信息的时域线性 MMSE 估计 | 154 |
| 5.3.3 | 先验信息收敛对符号估计的影响              | 155 |
| 5.3.4 | WFRFT 域 LLR 及先验信息更新         | 156 |
| 5.3.5 | 复杂度分析                       | 157 |
| 5.3.6 | 收敛性分析                       | 159 |

|              |                               |            |
|--------------|-------------------------------|------------|
| 5.3.7        | 误码性能仿真                        | 160        |
| 5.4          | 传统载波体制下的 FD-IMSE 方法           | 164        |
| 5.4.1        | 多载波体制下的 FD-IMSE 方法            | 164        |
| 5.4.2        | 单载波体制下的 FD-IMSE 方法            | 167        |
| 5.4.3        | 时域窗函数滤波方法                     | 169        |
| 5.5          | 混合载波体制下的 FD-IMSE 方法           | 173        |
| 5.5.1        | FD-IMSE 方法实现原理                | 173        |
| 5.5.2        | 基于 WFRFT 域先验信息的频域线性 MMSE 估计   | 174        |
| 5.5.3        | WFRFT 域 LLR 及先验信息更新           | 176        |
| 5.5.4        | 复杂度分析                         | 177        |
| 5.5.5        | 收敛特性分析                        | 178        |
| 5.5.6        | 误码性能仿真                        | 180        |
| 5.6          | 本章小结                          | 183        |
|              | 参考文献                          | 184        |
| <b>第 6 章</b> | <b>混合载波系统的多址传输方案</b>          | <b>186</b> |
| 6.1          | 混合载波扩频/码分多址传输方案               | 186        |
| 6.1.1        | 单载波与多载波体制下的扩频和码分多址传输方案        | 186        |
| 6.1.2        | HC-CDMA 传输方法                  | 188        |
| 6.1.3        | HC-DS-CDMA 传输方法               | 197        |
| 6.1.4        | HC-CDMA 与 HC-DS-CDMA 传输方式性能比较 | 201        |
| 6.2          | 混合载波频分多址系统                    | 202        |
| 6.2.1        | 传统频分多址系统模型                    | 203        |
| 6.2.2        | 混合载波频分多址系统                    | 207        |
| 6.2.3        | 峰均功率比研究                       | 214        |
| 6.2.4        | 复杂度分析                         | 216        |
| 6.2.5        | 误码性能仿真                        | 218        |
| 6.3          | 本章小结                          | 220        |
|              | 参考文献                          | 221        |
|              | 缩略语                           | 224        |
|              | 名词索引                          | 229        |

# 第1章 导 论

自 Gabor 在 1946 年首先提出利用时频联合的思想进行信息处理与传输的问题之后,各种时频数学工具纷纷为人们所研究并应用于信号的分析与设计中,如加窗傅里叶变换(包括短时傅里叶变换、Gabor 变换等)、小波变换、分数傅里叶变换(FRFT, Fractional Fourier Transform)、Wigner-Ville 分布等。时频数学工具通常用来描述非平稳信号的时变或局部的时频特性,所以希望其在时频平面上是高度聚集的。一般认为适合用作时频聚集性评价的典型非平稳信号是线性调频(LFM, Linear Frequency Modulation)信号或称 Chirp 信号,而评价时频工具是否适合用作非平稳信号的分析,主要就是考察其在时频平面上是否对 LFM 信号有聚集作用<sup>[1]</sup>。因而以 LFM 信号为正交基的经典 FRFT(CFRFT, Classical FRFT),即“Chirp 类 FRFT”(CFRFT, Chirp-Type FRFT)被很多学者所关注。近些年来,Chirp 信号或 CFRFT 在通信系统中的应用研究也有所发展。文献[2~4]提出了以 Chirp 信号为载波的正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)系统,特别是文献[2]将其称为“基于 FRFT 的多载波系统”,并指明了其在时频双选择信道下的优势。文献[5]提出利用 Chirp 信号进行精确、稳定的时频同步方法。超宽带(UWB, Ultra Wide Band)系统中也广泛使用了 Chirp 信号作为发射波形信号<sup>[6]</sup>,基于 Chirp 信号的二进制正交键控(BOK, Binary Orthogonal Keying)调制已经成为 IEEE802.15.4a 的物理层技术标准。

随着对 FRFT 了解的不断深入,FRFT 的定义多样性使人们开始关注另外一种 FRFT——加权 FRFT(WFRFT, Weighted-Type FRFT)。本书通过对 WFRFT 数学理论、实现结构的研究,得到了 WFRFT 在通信系统中的物理意义:WFRFT 的时频表述刚好分别对应于传统通信系统中的单、多载波调制模型,这为不同载波体制的融合提供了理论支持。而联合单载波与多载波的载波体制协同通信系统,将为弥补二者各自存在的体制上的缺陷,相互支持、取长补短提供一个合作的平台。通信环境中大量非目的接收机的存在使信息安全受到了极大的威胁,为了有效保护信息的安全而采取的许多保护措施同时也降低了通信系统的有效性。而经过 WFRFT 处理后的信号在复平面、时频平面上都具有特殊的性质,这些性质对通信信号的抗截获、抗干扰等十分有益。

笔者为了从多角度提升现有通信系统的有效性和可靠性,解决载波体制协同、提高通信信号抗截获性能等方面的体制和技术问题,探索 WFRFT 在通信领域中应用的可能及方式而编著此书。

## 1.1 载波体制及其相关技术

作为通信信息的载体,通信系统所采用的载波大致可以分为传统的“连续波”和较为特殊的“脉冲”两种形式。由于绝大多数通信系统都采用常见的正余弦信号作为其基本的信号

形式,故本书也将重点放在以正余弦为基础的连续波上。文中如无特殊说明,所指载波体制均指上述这种采用正余弦信号作为载波的连续波形式。而影响载波体制发展的主要原因之一,是通信系统对抗信道衰落能力要求的提高和相关技术的发展。

通信系统的载波体制主要包含两种,即单载波(SC, Single Carrier)体制和以正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)技术为代表的多载波(MC, Multi-Carrier)体制,传统的通信系统以单载波体制为主。近些年来,随着人们对通信业务需求的增加,通信速率也不断提高;随之而来的是频谱资源的紧张和越发严重的符号间干扰(ISI, Inter Symbol Interference),这使传统单载波系统及其用以对抗 ISI 的时域均衡(TDE, Time Domain Equalization)越来越难以满足需求。正因为如此,OFDM 技术因其在抗 ISI 性能上的天然优势以及简单的频域均衡(FDE, Frequency Domain Equalization)技术而得到了广泛的关注和研究。

### 1.1.1 传统单载波体制

传统的单载波调制方式是目前大多数通信系统所使用的载波体制。从调制技术本身来看,单载波信号具有低峰均功率比(PAPR, Peak-to-Average Power Rate)、低载噪比门限、对载波同步和定时偏差不敏感、实现手段简单等优点。

传统的基于单载波体制的抗多径技术有两种:一种是在单载波系统中采用自适应 TDE 来消除 ISI,这种方法最早应用于语音频带的电话调制器中,后来被推广到各种其他数字通信系统,如 GSM(Global System for Mobile Communications)系统<sup>[7]</sup>;另一种方法是码分多址(CDMA, Code Division Multiple Access)系统中采用的 Rake 接收技术,如 IS-95 和 IMT-2000 系统。其中,自适应 TDE 技术的主要结构是一个或多个横向滤波器,其抽头个数与多径时延影响的符号数在同一数量级上,并呈线性关系变化。如果以 5 Mbit/s 的信息速率,在最大多径时延为 20  $\mu$ s 的多径信道中传输,受影响的符号数将达到 100 个。为了抵抗 ISI 的影响,这种滤波器的抽头数至少需要 100 个,而处理每个数据符号又至少需要几百次的乘法运算。此外,还要求训练符号足够多、训练时间足够长。因而在数十兆比特每秒的传输速率下,有多于 50 个的符号受到 ISI 干扰,采用这种均衡器结构所付出的系统复杂度的代价是巨大的。而对于 CDMA 系统, Rake 分支数会增加,扩频增益不能太高,软容量会受到一定影响<sup>[8]</sup>。

因此,在低速(窄带)通信系统中,传统基于单载波体制的抗 ISI 技术能够通过提高系统复杂度、牺牲硬件资源的方式来保证系统性能指标。但是对于宽带业务来说,由于数据传输的速率高,ISI 十分严重,为了获得稳定的系统性能,传统单载波系统所需付出的代价十分巨大。因而,基于传统单载波体制下的抗信道衰落和干扰技术不能够满足宽带无线接入的需求。

### 1.1.2 多载波技术

多载波传输系统的优势,正是弥补传统单载波系统在频率选择性信道中的不足。它把数据流通过串并转换分解为多个独立的低速子比特流,然后再去调制相应的子载波,从而构成多个低速率符号并行发送的传输系统。多载波的历史<sup>[9]</sup>最早可以追溯到 19 世纪 70 年代, Elisha Gray<sup>[10]</sup>、Alexander Graham Bell<sup>[11]</sup>和 Thomas Edison<sup>[12]</sup>所开发的电报系统。当代多载波系统有很多种,包括: OFDM、矢量变换方式<sup>[13]</sup>、基于小波/小波包的多载波技术<sup>[14-22]</sup>、采用滤波器组的滤波多音调制方式<sup>[23,24]</sup>等。目前,研究和应用最广泛的是基于快速傅里叶变换(FFT, Fast Fourier Transform)的 OFDM 系统。

OFDM 技术正如其英文名称所蕴含的意义,最初是作为一种并行传输的频分复用

(FDM, Frequency-Division Multiplexing)技术出现的,现代 OFDM 的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代。正是人们对于提高频谱利用率、避免采用均衡器以及抵抗脉冲干扰的需求,催生了子信道间可以相互重叠的复用技术,或者称为“正交并行传输技术”<sup>[25,26]</sup>。而当时由 Salz 和 Weinstein 提出的所谓“傅里叶变换通信系统”<sup>[27]</sup>正是实现这种技术的典型代表,它论证了“多音调制”(Multitone, 当时还没有出现“Multicarrier”的说法)可以通过傅里叶变换实现。Weinstein 在文献[27, 28]中不但给出了基于 DFT 的“傅里叶变换通信系统”实现结构,而且还给出了结合判决反馈频域均衡器的接收机结构。可以认为这两篇文献是现代 OFDM 系统的奠基之作,其与现代 OFDM 技术略有不同的是在发送端采用的是傅里叶正变换,而接收端采用的是傅里叶逆变换。除此之外,为了防止 ICI 和 ISI,他们在 OFDM 符号间插入了保护间隔,并在时域上使用了升余弦窗;为了避免信道均衡,他们又提出差分 OFDM 系统,这也是最早的差分 OFDM。1980 年,Feled 和 Ruiz 在文献[29]中提出了循环前缀(CP, Cyclic Prefix)的概念,使发送序列具有了一定的周期性,进而将信道对信号的作用由线性卷积等效为周期卷积。1990 年, Bingham 在其著名的文献[30]中,正式将 OFDM 称之为“多载波调制”(MCM, Multi-Carrier Modulation)技术。

在 OFDM 系统中,由于构成系统的每个子载波具有非常窄的带宽,信道仅对每个子载波的幅度和相位产生影响,此时,均衡每个子载波的增益和相位,就相当于补偿了频率选择性衰落对高速信号传输的影响,从而将高速传输问题转化为相对低速率传输问题,将频率选择性衰落问题转化为对低速信号的幅度和相位均衡问题<sup>[31]</sup>。

OFDM 系统具有非常鲜明的特点。系统中的多个子载波生成是通过在发射端进行离散傅里叶逆变换(IDFT, Inverse Discrete Fourier Transform)来实现的,而接收端只需要对接收的采样信号进行离散傅里叶正变换(DFT, Discrete Fourier Transform)运算,就可完成子载波的提取。而每次 DFT 运算的数据块长度一般取为信道冲激响应最大长度的 4~10 倍。CP 的引入使时域中原来发送信号与信道响应的线性卷积变为循环卷积,从而将 DFT 引入系统信号处理中。同时 CP 的引入还能保证信号经过色散信道后仍然保持各个子载波间的正交性,从而把信道变成了独立的并行子信道<sup>[8]</sup>。图 1-1 给出了基于 DFT 的 OFDM 系统基本框图。

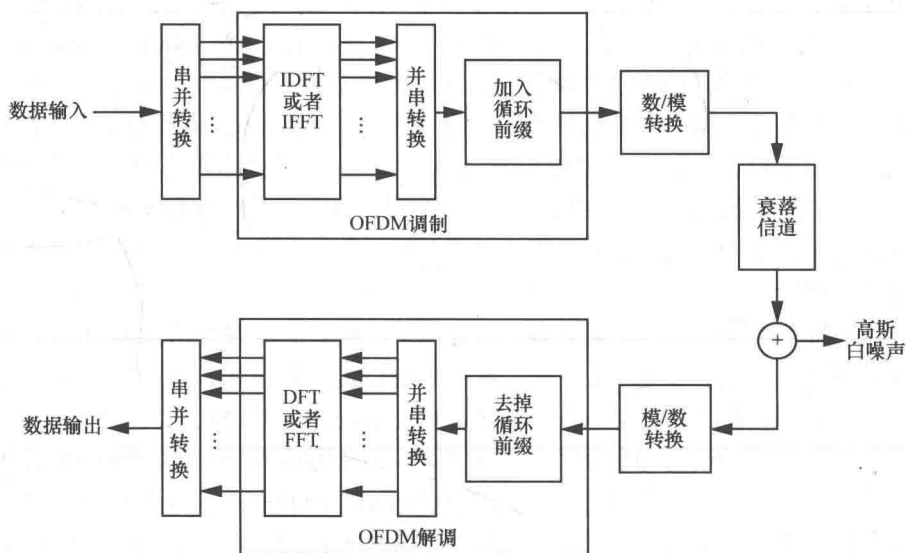


图 1-1 OFDM 系统基本框图

OFDM 系统的上述特点,使得它比传统 SC-TDE 系统具有更为优良的性能。在信道具有较大的多径扩展时,OFDM 系统较传统 SC-TDE 系统在性能和复杂度折中方面表现出了更好的特性。对于 SC-TDE 系统,其每个符号上进行的乘法运算数量与信道冲击相应的最大长度成比例,而 OFDM 系统对于每个符号所采用的乘法运算的数量基本上与信道冲激响应最大长度的对数成正比。因此,随着信道冲激响应最大长度的增加,OFDM 系统表现出了更好的特性。

与 SC-TDE 系统相比,OFDM 系统具有如下的主要缺点<sup>[31,32]</sup>:

- (1) 对于载波频率偏移和定时误差的敏感程度比单载波系统要高;
- (2) OFDM 信号由多个慢速调制的子载波相加而构成,因此具有较高的 PAPR,这使它对发送端的功率放大器的线性度要求很高,如何降低 PAPR 对系统的性能和成本都有很大的影响;
- (3) OFDM 系统接收信噪比损失主要来自 ICI,子载波间隔越小,受频偏的影响就越大,多普勒扩展会破坏载波间的正交性,OFDM 需要为克服多普勒效应付出更大的代价。

### 1.1.3 单载波频域均衡技术

OFDM 技术可以弥补传统 SC-TDE 技术在强多径环境中,系统复杂度高、对抗多径效果不理想的缺点。在对抗多径影响、降低系统复杂度方面 OFDM 技术有很大的提高。但是它存在着对定时误差、载频同步比较敏感, PAPR 较大的问题。正是针对 OFDM 这两个缺点,一种与 OFDM 系统信号处理方式类似的单载波频域均衡(SC-FDE, Single Carrier with Frequency Domain Equalization)技术方案被提出来,该方案能有效地克服 OFDM 技术上的不足,并且可以达到与 OFDM 系统相近的系统性能和信号处理复杂度。所谓的 SC-FDE,就是在单载波系统中,将传统放在时域上使用的均衡器放在了频域上使用。对于时延扩展严重的信道,SC-FDE 可以像 OFDM 系统一样,具有比时域均衡简单得多的系统结构。在使用 FFT 和循环前缀的系统中,SC-FDE 具有和 OFDM 相近的系统特性和一样低的系统复杂度。

Sari 等首先在欧洲数字视频广播(DVB, Digital Video Broadcasting)系统的物理层标准制定过程中提出了使用 SC-FDE 技术<sup>[33,34]</sup>,指出 DVB 信道具有高时延扩展的特点,即存在严重的 ISI。Sari 等的比较对象,是在此前欧洲数字音频广播(DAB, Digital Audio Broadcasting)系统中所采取的编码 OFDM(COFDM, Coded OFDM)技术。虽然作者承认 OFDM 与 SC-FDE 在均衡的角度上是等价的,但同时认为判决方式的不同使频域深衰落对 OFDM 的影响要大于对 SC-FDE 的影响。文献指出 FDE 技术在 1975 年左右就会出现,但一直没有得到重视,人们关注的重点一直放在自适应时域均衡上。文献[34]还提及两种和 CP 类似的、可以相互转化线性卷积和周期卷积的方法,并且对 SC-FDE 和 OFDM 在载波同步以及功率回退造成的影响进行了比较。

Falconer 的文献[31]是介绍 SC-FDE 的另一个经典,文章系统全面地介绍了 SC-FDE 技术,并以 OFDM 系统为比较对象,对二者的系统结构、复杂度、性能做了全面的比较。提出了基于判决反馈均衡(DFE, Decision Feedback Equalization)的 SC-FDE 技术,并在 SUI-5 信道下对采用单载波频域线性均衡器、单载波频域判决反馈均衡器以及 OFDM 系统的误码特性进行了比较。文章的另一个亮点是提出了 SC-FDE 与 OFDM 共存的系统结构,通过软件无线电技术配置 FFT 模块的位置来实现上下行链路不同的体制。该系统的优势在于可以降低移动终端的系统复杂度和功放要求,它的意义在于体现了单、多载波共存体制的需求。

图 1-2 所示为 SC-FDE 系统基本框图, 系统采用带有频域  $M$  点线性均衡器的结构。SC-FDE 系统的发送端没有 IFFT 模块进行多载波调制; 在接收端, 信号经过采样后通过  $M$  点的 FFT 模块变换到频域上, 然后在频域进行均衡处理, 之后再通过 IFFT 模块回到时域, 并进行判决、译码等后续工作。

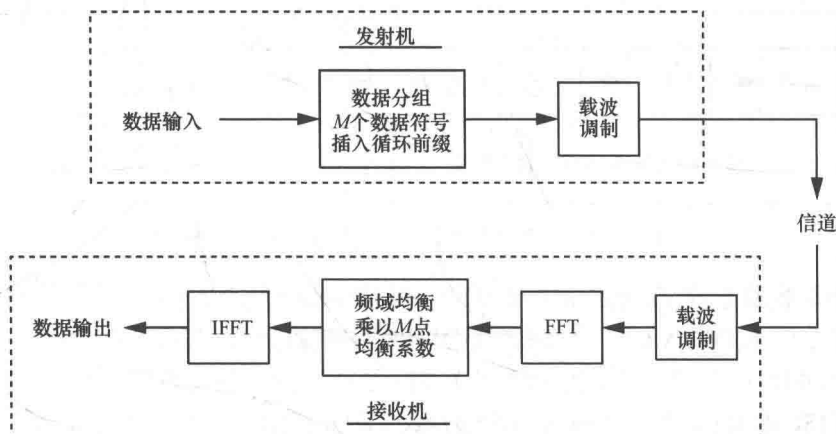


图 1-2 SC-FDE 系统基本框图

SC-FDE 和 OFDM 系统在使用相同的 FFT 数据块长度时, 信号处理的计算复杂度基本一样, 两个系统在系统结构上的相似为它们的共存创造了条件。因而可以设计一种双模式系统, 通过“软切换” IFFT 模块的位置, 就可以同时支持 OFDM 和 SC-FDE 系统, 能够灵活、高效地发挥两种技术的优势。图 1-3 所示为一个 SC-FDE 和 OFDM 系统共存的双模系统, 系统可以通过软件配置 IFFT 模块的位置(在发射机端或是接收机端)来决定信号的形式。在实际应用中, 可以在基站上使用 OFDM 发射机、SC 接收机, 而在用户终端使用 OFDM 接收机、SC 发射机, 如图 1-4 所示。这种将 OFDM 用于下行链路, 将 SC 用于上行链路的双模系统具有两个潜在的优势: 首先, 此应用方式将系统复杂度集中在相对于固定、少量的基站或集线器上, 而使用户终端的复杂度大大降低, 在基站或集线器上, 有两个 IFFT 模块和一个 FFT 模块, 而用户终端只有一个 FFT 模块; 其次, 用户终端的发射机采用单载波形式, 因而对发射机的功率放大器要求低, 功率效率高, 这对于移动终端将十分有利。这一系统结构, 后来被 LTE(Long Term Evolution)和 LTE-A(LTE-Advanced)所采用, 成为 4G 系统空中接口标准。

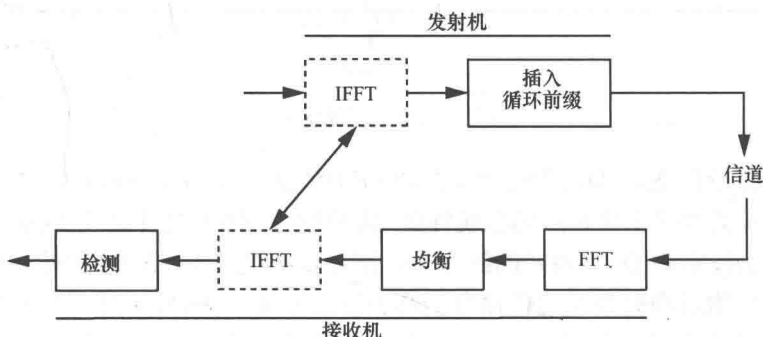


图 1-3 SC-FDE 与 OFDM 潜在的共存结构

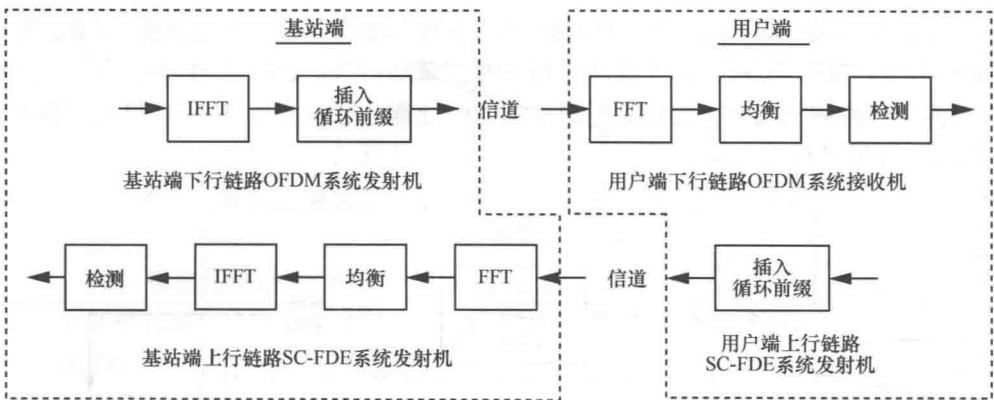


图 1-4 SC-FDE 和 OFDM 共存的上下行不对称系统

为了让单载波系统可以像 OFDM 系统一样实现频带相互重叠、正交的频分多址方式，一种被称作 DFT-S-OFDM(DFT-Spread OFDM)的系统被提出，其系统框图如图 1-5 所示。虽然包含有“OFDM”的字样，但这种系统本质上还是一种单载波系统，有时它也被称作单载波频分多址(SC-FDMA)系统<sup>[35]</sup>或 DFT-Precoded OFDM 系统<sup>[36,37]</sup>。

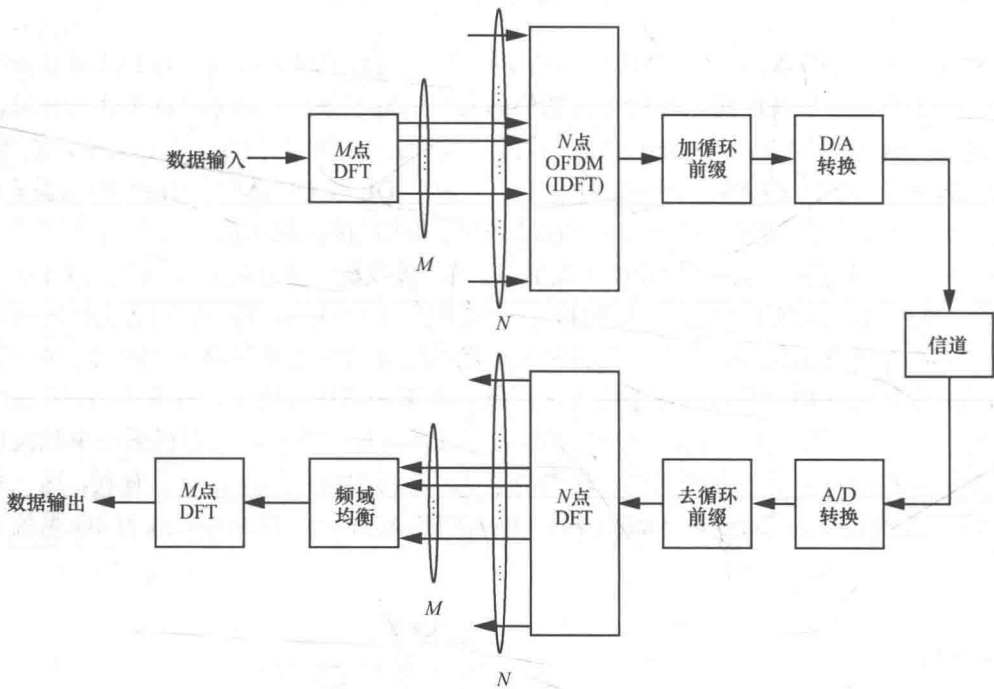


图 1-5 DFT-S-OFDM 系统

为了进一步挖掘 SC-FDE 的潜力，并与 OFDM 系统进行更全面的比较，相关研究更多关注 SC-FDE 与其他技术结合后的系统性能。其中相对的热点集中在与 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术和 DFE 技术的结合上。作为多天线技术，MIMO 是一种能够为系统提供显著空间分集增益和提高系统传输容量的手段。但是将 MIMO 技术单独用于多径衰落信道时，其性能将严重恶化。因此，需要与其他技术手段联合使用。MIMO-OFDM 技术就是一种很好的技术结合。采用此项技术，可以使频率选择性 MIMO 信道转换为一系列并行的

频率平坦衰落 MIMO 信道,从而使系统性能得以提升。由于 SC-FDE 技术在 PAPR 问题和载波频偏灵敏度问题上较 OFDM 系统具有明显的优势,因此,近年来,SC-FDE 技术的发展趋势主要是与 MIMO 技术相结合。这样可以在继承单载波系统优点的同时,充分发挥 MIMO 系统提高系统容量的能力,从而更好地解决了频率选择性衰落信道的系统容量提升问题。

文献[38]和文献[39]分别提出基于迫零(ZF, Zero-Forcing)或最小均方误差(MMSE, Minimum Mean Square Error)准则的单载波频域线性均衡 MIMO 系统和单载波自适应频域均衡 MIMO 系统。同时,为了进一步增强 FDE-MIMO 系统的性能,又提出了混合时频域判决反馈均衡单载波 MIMO 系统<sup>[40]</sup>,以及基于分层空频域均衡的思想,提出了基于分层空频域均衡单载波 MIMO 系统<sup>[41,42]</sup>和分层迭代空频域均衡单载波 MIMO 系统<sup>[43]</sup>。此外还有具备噪声预测的 SC-FDE-MIMO 系统和连续干扰消除的噪声预测 SC-FDE-MIMO 系统<sup>[44]</sup>。这些系统结构的提出,都有效提高了传统 SC-FDE 技术的性能。

文献[45]认为在频率选择性无线信道下,使用 DFE 会有更好的特性。通常的 DFE 是对数据符号进行逐符号判决,然后立刻反馈给待判决的符号,从而去掉码间干扰。因为 SC-FDE 系统信号 FFT 变换过程有一个固有时延,所以这种立刻反馈判决的方法不适合频域 DFE,因此一种可以避免上述反馈时延问题的混合时频域 DFE 被提出,系统结构如图 1-6 所示。其反馈部分采用常用的横向滤波器,这种系统结构避免了上面提到的反馈延迟大的问题。系统每次处理一个数据块,经过 FFT 后输出的系数  $\{R_i\}$  分别乘以一个复数前向均衡器系数  $\{W_i\}$ ,用以补偿频率选择性信道对频率幅度和相位的影响。经过频域均衡后的数据通过 IFFT 变换到时域,再依次通过判决器;先前检测出的符号所造成的 ISI 影响可以利用  $B$  阶反馈抽头系数  $\{f_k\}$  计算,并依次减去。

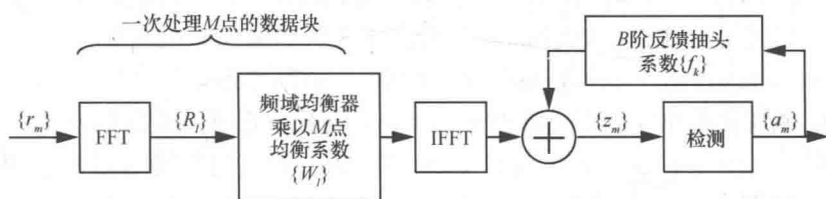


图 1-6 SC-FDE 与判决反馈均衡器(DFE)的结合

1990 年, Bingham 在文献[30]中以“谁的时代将到来”为题,大胆地预测 OFDM 充满光明的未来。事实证明,在该文发表之后 20 年乃至更长的一段时间里,OFDM 的确成为了物理层的关键核心技术。也正正好是在文献[30]发表后的第 20 年, Benvenuto、Falconer 等在文献[37]中以同样的主题撰文并大胆预言,结合非线性均衡的单载波体制将取代 OFDM,成为下一个具有划时代意义的物理层核心技术。这一预言能否实现,人们将拭目以待。

#### 1.1.4 SC-FDE 与 OFDM 的比较

SC-FDE 与 OFDM 系统之间的比较,从 SC-FDE 的提出开始就贯穿始终<sup>[7,33,34,45-48]</sup>。SC-FDE 是分组传输,而传统的 SC-TDE 系统是按符号传输。但是,不论何种传输方式,也不论是频域均衡还是时域均衡,单载波体制的 PAPR 问题都不像多载波体制那样突出,这对射频放大器的要求大大降低。同时,单载波系统对相位噪声也不像多载波系统那样敏感。

在系统复杂度上,与时域均衡器一样,频域均衡器通常也是选用横向线性抽头滤波器方式,选择的算法可以是最小均方(LMS, Least Mean Square)算法、最小二乘(LS, Least Squares)、