

第 3 章

5G 接入与空口数据分析综合实验

3.1 引子

在体育赛事、演唱会、博览会等大型活动中，人们可能会遇到上网速度慢，甚至无法接入网络的情况。在 2022 年冬奥会期间，最多可容纳 18000 人的体育场馆的网络平稳运行，“冬奥通信”实现了零事故。这主要得益于场馆内密集部署的 5G 基站，以及场馆区域投入的大量通信保障车辆的通力配合。图 3.1 所示为 5G 应急通信保障车在执行通信保障工作。



图 3.1 5G 应急通信保障车执行通信保障工作

我们不禁要问，为什么增加额外的基站和 5G 应急通信保障车就能解决手机无法接入网络的问题呢？其原理是什么？这就涉及本章所介绍的 5G 接入与空口资源使用的相关内容。影响通信系统的性能因素，除无线电干扰外，还包括接入以及空口资源的使用等。

通信链路的构建解决了点对点通信的问题。当无线网络中存在多个通信节点时，则需要一定的机制来共享空口资源。

媒介接入（Media Access）是指业务终端或网络设备通过一定的机制使用传输媒介进行通信的过程，它是人们使用通信服务的第一个步骤。媒介接入的应用无处不在，最简单的接入机制是开机即接入，如图 3.2 所示的收音机、传统模拟电视机等，开机后调整到特定的频率，无须复杂的交互过程即可收听对应的电台或电视节目。



图 3.2 收音机和传统模拟电视机开机即接入广播系统

在双工通信的无线网络中,由于各终端都有收发数据的需求,而且不同终端间要共享无线通信链路,因此需要确保不同的终端在使用媒介进行通信时不会发生冲突。对讲机的 PTT (Push-To-Talk) 模式就是一种简单的手动媒介使用机制,当需要说话时,就按下对讲按钮,如果此时没有其他对讲机在使用信道,则对讲机通过指示灯或其他方式提示当前可以说话;如果此时信道被占用,则对讲机无法进入对讲模式。对讲机使用示例如图 3.3 所示。



图 3.3 对讲机使用示例

无线数据网络需要更复杂的机制来协调终端间对传播媒介的使用。1968 年,美国夏威夷大学设计了 ALOHA 网络,并在 1971 年 6 月成功运行,成为世界上第一个无线数据网络。ALOHA 网络最早采用了一种完全随机的接入机制(见图 3.4),称为纯 ALOHA 机制,即当有数据需要传输时,终端立即向通信信道发送数据。如果网络上有两个终端同时发送数据,则会产生冲突,在这种情况下,两个终端各自随机等待一段时间后再尝试发送数据。

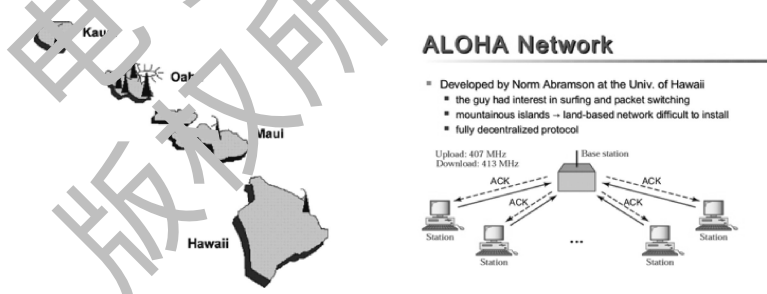


图 3.4 ALOHA 网络的随机接入机制

虽然纯 ALOHA 机制因为其较高的信道冲突很少被使用,但它仍然是很多无线通信标准的理论基础和参考模型。一般来说,当前网络的媒介接入机制可分为基于竞争的接入机制和基于非竞争的接入机制。常见的基于竞争的接入机制包括载波监听多址接入/碰撞检测 (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection, CSMA/CD)、载波监听多址接入/碰撞避免 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid, CSMA/CA)。前者多用于有线网络中,这是因为在有线网络中,传输冲突可以很容易被检测到,其典型应用主要是以 IEEE 802.3 为标准的以太网;在无线网络中,由于传输距离长短、信号强弱等问题,冲突并不一定都能

被发送端检测到,因此在 CSMA/CD 基础之上,增加了接收端发送清空信道指示 (Clear to Send),形成了 CSMA/CA 机制,其典型应用是以 IEEE 802.11 为标准的 Wi-Fi 网络等。CSMA/CD 和 CSMA/CA 的工作模式如图 3.5 所示。

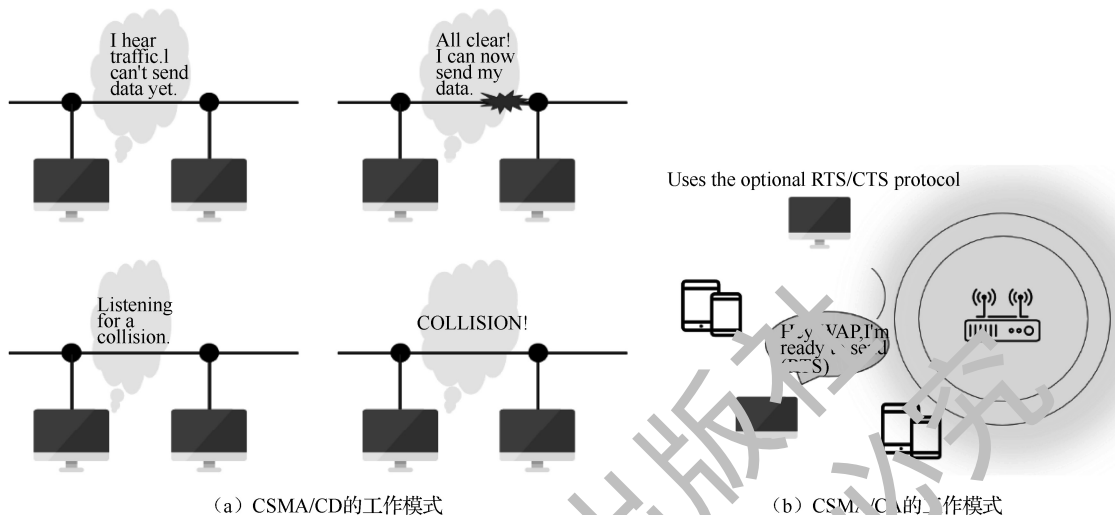


图 3.5 CSMA/CD 和 CSMA/CA 工作模式

基于非竞争的接入机制的典型应用就是我们所熟知的蜂窝移动通信网络,1G 网络到当前的 5G 网络采用的都是基于非竞争的接入机制。该接入机制的优势主要是能够有效避免大量传输冲突导致的网络性能急剧恶化,能够在大规模用户接入情况下保障传输成功率和网络服务质量。

5G 网络采用的接入机制究竟是什么样呢?本章将以 5G 网络为例在真实网络上进行空口接入综合实验,带领读者亲自搭建一个开源 5G 基站,一步步完成 5G 信号的接收与解调,了解新一代的无线空口接入原理,并以此为基础了解无线空口资源管理技术。

3.2 实验场景创设

在 2022 年冬奥会期间使用的 5G 应急通信保障车,以及无线网络接入技术的演进让我们感受到了接入及资源使用在实际通信服务中的重要性。不仅在无线网络中,在传统路由交换网络、光纤通信网络、空天地一体化网络中,也面临着如何高效接入、高效使用通信资源的问题。

5G 空口接入与空口数据如图 3.6 所示。手机在使用 5G 基站所提供的网络服务时,在不同场景或者环节下使用无线资源的方式也不同。例如,当手机开机后,需要通过检测广播信号来识别周围的基站信息;当手机接入网络时,则需要使用随机接入信号与基站进行交互;当我们使用手机上传视频时,手机则利用上行信道发送数据。

手机对广播信号的接收与解析是手机入网的第一步,同时也涉及手机对无线空口资源的使用。此外,基站无时无刻不在广播信号,无须其他信令或流程触发。因此,为了帮助读者快速使用 5G 信号,理解 5G 空口接入和空口资源使用的机制,本章将基于 5G 网络开展实验,

本章实验在多模态数智化通信与网络综合实验平台的全栈全网通信网络子平台上进行。

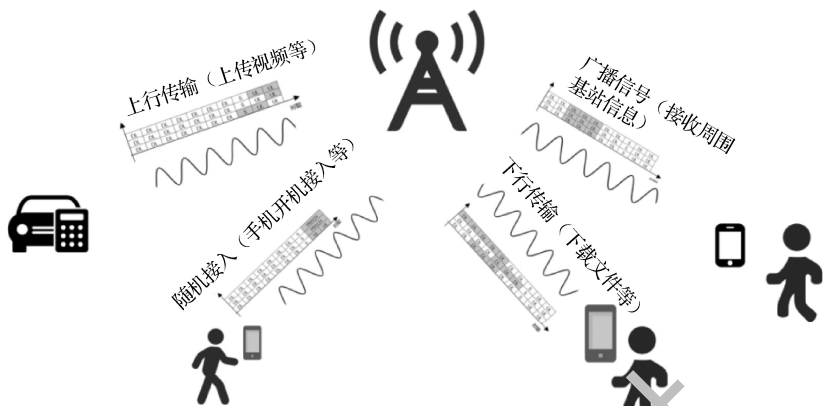


图 3.6 5G 空口接入与空口数据

3.2.1 场景描述

在本章中，我们将基于真实的 5G 信号开展 5G 接入与空口数据分析。本节将以 5G 空口接入过程中物理广播信道（Physical Broadcast Channel，PBCH）为例讲解正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM）的原理及空口接入机制，帮助读者动手搭建“一人一网”开源 5G 基站，基于真实 5G 网络与真实 5G 信号开展空口接入实验。通过本章实验的开展，读者将掌握通信相关基础理论在新一代移动通信系统中的应用，能够动手编写程序实现对 5G 空口广播信号的接收与解调，并可探秘运营商 5G 网络信息。

OpenAirInterface（后文简称为 OAI）是由法国 EURECOM 发起，并由全球上百家单位参与的开源 4G/5G 项目，旨在建立一个符合 3GPP 标准的、端到端的、开源的、可灵活演进的软件化移动通信系统。由北京邮电大学发起建立的国内开源无线网络社区 OS-RAN 也是 OAI 项目的重要贡献者，本章实验将基于 OAI 项目在通用计算机上搭建开源 5G 基站和终端，实验场景如图 3.7 所示。本章实验使用一台主机或笔记本电脑（后文统一用通用计算机表示）和 SDR 平台，部署 OAI gNB 软件构成开源 5G 基站；使用另一台通用计算机和 SDR 平台，部署 OAI nrUE 软件构成开源 5G 终端，或运行 MATLAB 程序对 5G 信号进行接收和分析。

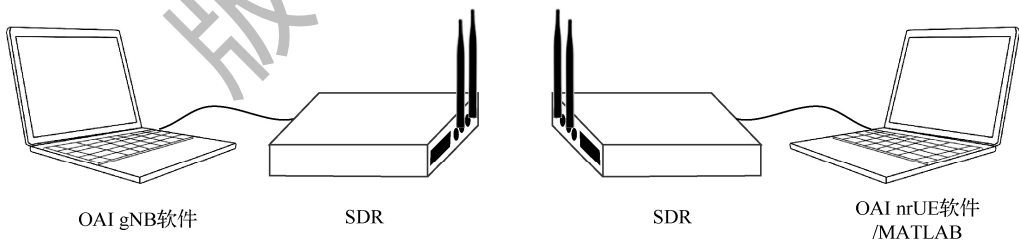


图 3.7 5G 接入与空口数据分析综合实验场景

3.2.2 总体目标

在实验场景中，读者需要首先使用 SDR 平台搭建开源 5G 基站，理解并学会计算 5G 空

口的主要参数,将开源 5G 终端接入开源 5G 基站;然后使用 SDR 平台接收 5G 信号,根据 5G 物理广播信道的调制与解调流程,一步步地完成对 5G 信号的解调与分析,在真实 5G 网络中掌握信号的处理与分析方法。本章实验预期达到的总体目标为:

- ➊ 了解空口接入的基本作用与原理,熟悉常用的接入机制。
- ➋ 掌握 OFDM 原理与 5G 空口时频资源概念,了解 OFDM 调制与解调流程。
- ➌ 能够综合运用所学知识对 5G 空口广播的信号进行接收与解调,掌握 5G 时频资源的提取与解析方法。
- ➍ 理解 5G 空口接入流程,具备进行空口接入技术创新与实践的能力。



基础实验环境准备

3.2.3 基础实验环境准备

本章实验需要使用 SDR 平台,并配合 OAI 项目及 MATLAB 软件环境开展,其中 MATLAB 软件环境与第 2 章一致,本章不再赘述。除此之外,还需要准备如下环境:

- (1) 通用计算机: 2 台,建议 CPU 为 i7 8 代及以上,内存大小为 16 GB。
- (2) SDR 平台: 2 块 USRP B210 板卡或其他 SDR 平台,采样率支持 30.72 Msps 及以上。
- (3) 操作系统: 建议 Ubuntu 22.04。
- (4) UHD 驱动: 4.0 版本及以上。

(5) MATLAB 软件: 建议 MATLAB 2020b 及以上版本。安装 USRP 相关支持包,相关教程已托管在本书对应的 Gitee 代码库。



Gitee 代码库

3.2.4 实验任务分解

在 5G 空口接入场景中,开源 5G 基站通过 SDR 平台射频产生真实的 5G 信号,读者可以使用信号接收终端接收并尝试解调广播信息。本章将在 3.3 节到 3.5 节中,依次带领读者开展部署开源 5G 基站和 5G 终端、下行空口时间同步、信道估计及解调译码等任务,从而使读者了解 5G 空口接入所涉及的基础知识和技术,掌握 5G 信号分析和处理方法,支撑读者以此为基础理解 5G 空口接入的完整流程。5G 接入与空口数据分析综合实验的任务分解及任务执行过程如图 3.8 所示。

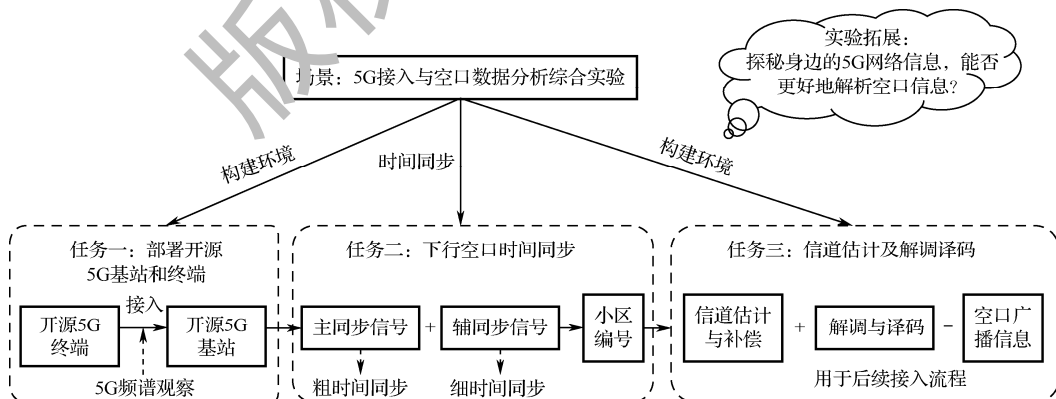


图 3.8 5G 接入与空口数据分析综合实验的任务分解及任务执行过程

3.2.5 知识要点

为了顺利完成 5G 接入与空口数据分析综合实验的各项任务,读者需要储备 OFDM 原理、时频资源与参数设计、5G 下行同步流程、5G 同步信号块、5G 物理广播信道等知识。相关知识结构如图 3.9 所示。

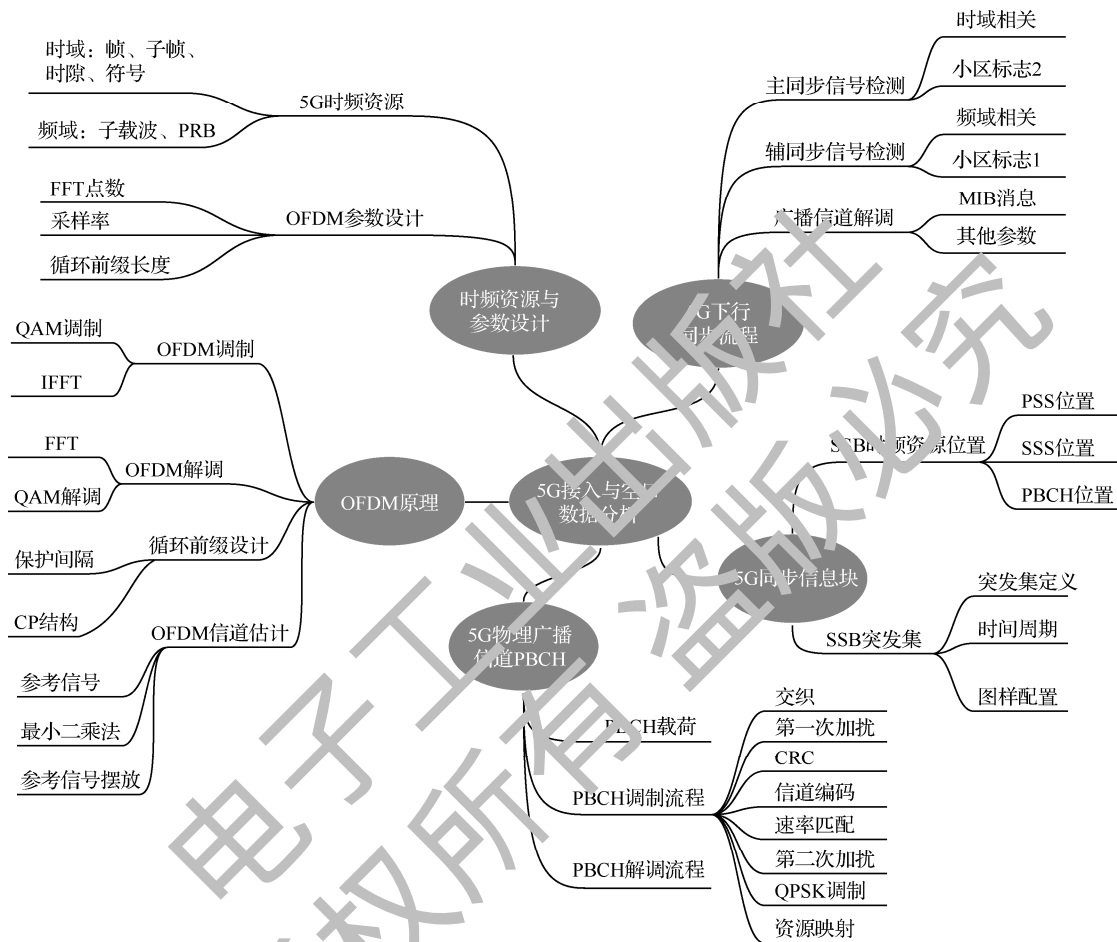


图 3.9 5G 接入与空口数据分析综合实验知识结构

3.2.5.1 OFDM 原理

OFDM 是一种多载波调制技术,它通过频分复用实现高速串行数据的并行传输,能够有效对抗多径衰落,提高系统的频谱效率。OFDM 的基本思想是将一个宽带信道分成若干较窄的子信道,这些子信道之间彼此相互正交,在传输信息时互不干扰。通过将信息并行地在多个子信道上传输,可以使每个子信道的带宽小于信道的相关带宽,这样每个子信道上的衰落可以近似为平坦性衰落。OFDM 技术在保证子信道之间相互正交的同时,允许子信道相互重叠,大大提升了系统频谱效率。目前 OFDM 技术已经广泛应用于多种无线通信系统中,如 Wi-Fi、4G LTE、5G 等。OFDM 技术最早应用在 4G LTE 中,被用作下行链路的调制技术,提供了数据高速传输的能力和更好的接入性能。在 5G 中,OFDM 技术被进一步扩展至上行链路,同时可以将 OFDM 技术与大规模 MIMO 技术高效结合,大大提升数据传输能力。

1. OFDM 调制

OFDM 调制的原理框图如图 3.10 所示。

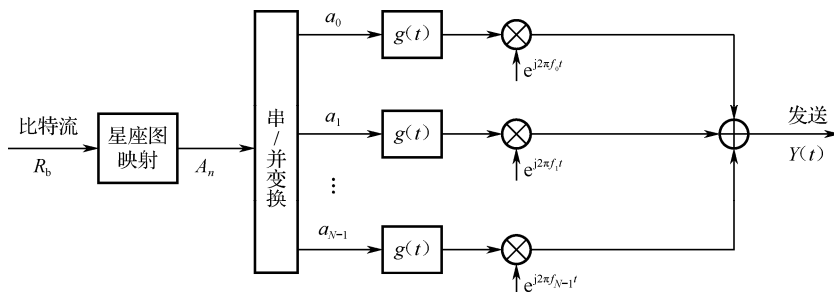


图 3.10 OFDM 调制的原理框图

假设待发送的比特流为 R_b ，该比特流首先经过星座图映射后形成了符号序列 A_n ；然后经过串/并变换后得到 N 路并行的符号 a_n ， $n \in (0, 1, \dots, N-1)$ 。最后完成 QAM 调制， $g(t)$ 为矩形脉冲成形滤波器，每一路子载波的频率均为 f_n ， $n \in (0, 1, \dots, N-1)$ 。与传统的频分复用 (Frequency-Division Multiplexing, FDM) 调制不同，OFDM 调制中的各子载波之间可以重叠且相互正交，最终形成的调制信号 $Y(t)$ 为：

$$Y(t) = a_0 g(t) e^{j2\pi f_0 t} + a_1 g(t) e^{j2\pi f_1 t} + \dots + a_{N-1} g(t) e^{j2\pi f_{N-1} t} \quad (3.1)$$

我们以 a_0 和 a_1 为例来分析各子载波之间的正交性，如图 3.11 (a) 所示，符号周期为 T_s ，在矩形脉冲成形滤波器 $g(t)$ 的作用下，每路子载波的频谱均为 Sinc 函数，因此两个子载波之间相互正交（即在某子载波能量最大处，其他子载波能量为 0），子载波的最小间隔 $\Delta f = f_1 - f_0 = 1/T_s$ 。当各子载波间隔均满足该条件时，即形成 OFDM 调制信号，如图 3.11 (b) 所示。

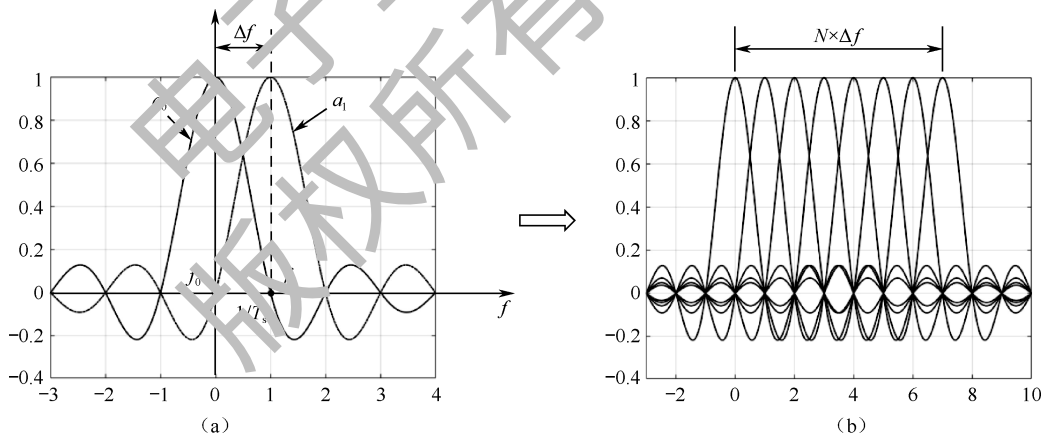


图 3.11 OFDM 系统的子载波频谱

由上可知，OFDM 调制信号 $Y(t)$ 可重写为：

$$\begin{aligned} Y(t) &= a_0 g(t) e^{j2\pi f_0 t} + a_1 g(t) e^{j2\pi f_1 t} + \dots + a_{N-1} g(t) e^{j2\pi f_{N-1} t} \\ &= a_0 g(t) e^{j2\pi f_0 t} + a_1 g(t) e^{j2\pi (f_0 + \Delta f) t} + \dots + a_{N-1} g(t) e^{j2\pi [f_0 + (N-1)\Delta f] t} \\ &= e^{j2\pi f_0 t} \left[a_0 + a_1 e^{j2\pi \Delta f t} + \dots + a_{N-1} e^{j2\pi (N-1)\Delta f t} \right] g(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

式中, $[\cdot]$ 中恰好为序列 $a_n [n \in (0, 1, \dots, N-1)]$ 的离散傅里叶逆变换 (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT), 因此 OFDM 调制可以看成是先对序列 a_n 进行 IDFT 形成复包络信号, 然后进行正交幅度调制的过程。在实际工程中, OFDM 调制多采用图 3.12 所示的方式实现, 具体实现步骤如下:

- (1) 待传输的比特流通过星座图映射, 形成复数形式的调制符号。
- (2) 进行串/并变换, 相当于将待发送的调制符号放置到各路子载波上。
- (3) 进行 IFFT, 得到时域的复包络信号。
- (4) 进行并/串变换, 得到时域的串行信号。
- (5) 取出实部和虚部, 进行正交幅度调制。

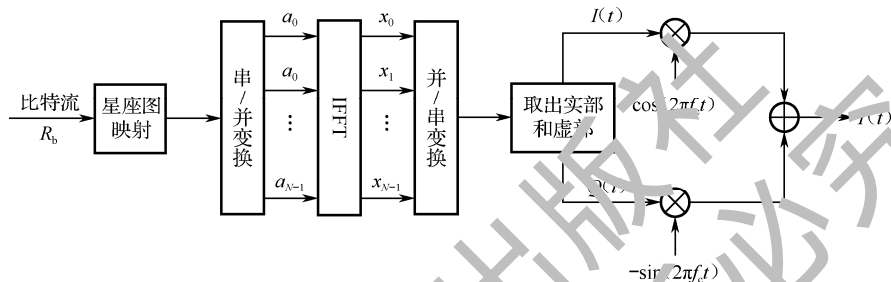


图 3.12 实际工程中常用的 OFDM 调制实现方式

2. OFDM 解调

OFDM 解调多采用如图 3.13 所示的方式实现, OFDM 解调是 OFDM 调制的逆过程, 具体实现步骤如下:

- (1) 已调信号 $Y(t)$ 分别与两路载波信号相乘, 可得到 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 两路, 形成复包络信号。
- (2) 对复包络信号进行串/并变换后再进行 FFT, 可得到频域数据, 即各子载波携带的信息。
- (3) 对频域数据进行并串变换后再进行星座图解映射, 可得到比特流。

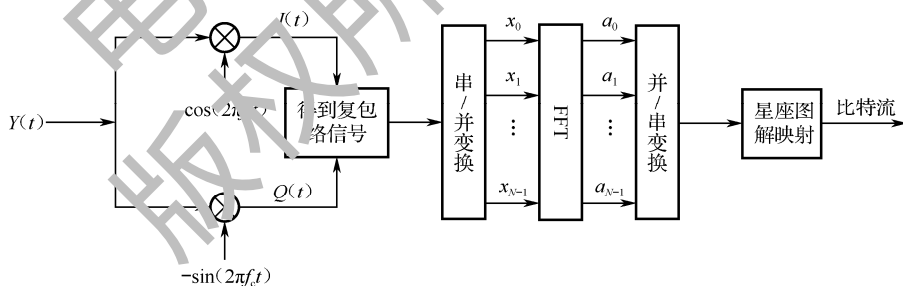


图 3.13 实际工程常用的 OFDM 解调实现方式

3. 循环前缀设计

在实际的通信系统中, 多径信道带来的时延扩展会产生符号间干扰, 影响通信的效率与可靠性。为避免上述问题, 可在 OFDM 的各符号之间添加保护间隔 T_g (T_g 要大于多径时延扩展 τ 的最大值), 这样可保证前一个 OFDM 符号的拖尾不会影响到下一个调制符号。但保护间隔并不是越大越好, 保护间隔占用了时域资源, 保护间隔越大, 系统的频谱效率就越小。

保护间隔有多种添加形式, 常见的有零前缀 (Zero Prefix, ZP) 和循环前缀 (Cyclic Prefix,