

*总结课件和上课的内容归纳的知识点，有一点私货，可能会有错误。

* · 高概率 · 中概率 · 低概率 个人感觉，仅供参考

第一章 引言

· 5G 三幻神：

Enhanced Mobile broadband(eMBB)

更宽的移动带宽，速度更快

Massive Machine Type Communication(mMTC)

物联网

Ultra-reliable and low latency communication(uRLLC)

低延时，高可靠，实时通讯

· 无线通信的难点：

Fading(衰落)：

Small Scale -> multi-path fading

Large Scale -> distance attenuation and shadowing by obstacles

衰落是由于传播路径的特性导致信号强度随时间、空间、频率而变化。

形成主要原因有多径效应、阴影效应和移动性。

Interference(干扰)：

其他信号叠加到期望信号上形成干扰。

共信道干扰（码间串扰），邻信道干扰，噪声干扰。

· Frequency Bands 频带：

Lower frequency/Lower date rate

Longer wavelength/ Longer Range

Larger Antenna

频带是 10 倍波长一划分，VLF 是 100km 到 10km 波长，以此类推。

常用频带：3kHz-300GHz

· 大规模衰落：

Effective Area(A)有效天线接收区域

$$A = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$$

Power density(W)在 d 距离上某一个方向的单位密度功率

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$$

P_R 接收功率

$$P_R = WA = \frac{\lambda^2 P_T G_T G_R}{16\pi^2 d^2}$$

Free space equation 自由空间方程

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2$$

其他参数不变，距离每增加一倍/频率每增加一倍， P_R 下降 6dB。

Propagation loss(path loss)(L_F)自由空间传播损耗（根据自由空间方程求得）

$$L_F(dB) = 10 \log_{10}(P_T/P_R)$$

$$= -10 \log_{10} G_T - 10 \log_{10} G_R + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d + k \quad \text{where } k = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{3e8} \right) = -147.56$$

• Path Loss Exponents for Different Environments 不同环境下的路径损耗指数公式：

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log_{10}(d/d_0)$$

d_0 指参考距离，在这个参考距离上的路径损耗是可知的；

n 是不同环境中的路径损耗指数，通过查表获得，例如：自由空间 $n=2$, 城市空间 $n=3-5$ ；

• Example 3.2:

已知：发射功率 P_T , 天线发射增益 G_T , 天线接收增益 G_R , 载波频率 f_c , 参考距离 d_0 , 距离 d 。

求：功率的 dB 表示, 接收功率 P_R 以及其 dB 表示, 相对距离接收功率。

方法：

$10 \log_{10}(P)$ 转换功率单位；

$P_R = \frac{\lambda^2 P_T G_T G_R}{16\pi^2 d^2}$ 计算接收功率；

$P_R(d)(dB) = P_R(d_0)(dB) + 20 \log_{10}(d_0/d)$ 利用对数的性质得到 d 的接收功率；

• Multi-path 多径效应：

发射信号通过不同的路径到达接收信号，不同路径分量有不同的相位和损耗。

接收信号的包络服从瑞利分布，相位服从均匀分布。

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$p_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}$$

当没有明显的直达路径 Line of Sight 时, 接收信号服从 Rayleigh 衰落；

当有一条明显的直达路径 LOS 时, 接收信号服从 Rician 衰落；

• Doppler Effect 多普勒效应：

靠近频率增加，远离频率降低。

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} \cos\alpha$$

• Example 4.1:

已知：运动速度 v , 载波频率 f 。

求：三种不同情况下的多普勒效应。

方法：

不同情况对应不同 α , 通过公式分别计算 $\Delta f = \frac{v}{\lambda} \cos\alpha$ 。

• 两个重要概念（全文背诵）：

1、Slow vs Fast Fading 慢衰落和快衰落（由 Doppler Spread 引起）

Coherence Time 相干时间和 Doppler Spread 多普勒扩展

不同路径信号之间的多普勒频移差异叫做多普勒扩展 Doppler Spread，多普勒扩展 Doppler Spread 用来衡量频谱展宽。定义为接收信号的多普勒频谱中，信号功率非零的频率范围。

Doppler Spread 会导致频率弥散和时间选择性衰落。多普勒扩展 D_s 和相干时间 T_c 近似成反比关系。

相干时间反映信道的特性，相干时间越长信道越稳定。

Fast Fading	Slow Fading
高多普勒扩展	低多普勒扩展
相干时间<码元周期	相干时间>码元周期
信道变化速度比基带信号变化速度快	信道变化速度比基带信号变化速度慢

2、Flat vs Frequency Selective Fading 平坦衰落和频率选择性衰落（由 Delay Spread 引起）

Coherence bandwidth 相干带宽和 Delay Spread 时延扩展

多径效应导致接收信号中包括不同衰落和时延的分量，因此接收信号会产生时延扩展 Delay Spread。时延扩展 Delay Spread 会导致时间弥散和频率选择性衰落。

催生了码间串扰 ISI。

Flat Fading	Frequency Selective Fading
相干带宽>信号带宽	相干带宽<信号带宽
时延扩展<码元周期	时延扩展>码元周期

直观理解：

多径效应+多普勒效应->频域扩展->时域快速变化->快衰落

多径效应+时延->时域扩展->频域快速变化->频率选择衰落

慢衰落和平坦衰落分别是这两种因素在效果不明显时的表现。

· 快/慢衰落：

慢衰落是指相干时间远大于码元周期，或者信号带宽远大于多普勒扩展。

快衰落是指相干时间相对小于码元周期，或者信号带宽与多普勒扩展相匹配。

Level Crossing Rate(LCR)信号每秒穿过一个值的次数。

$$N_R = \sqrt{2\pi} f_m \rho e^{-\rho^2}$$

这个式子中 f_m 是最大的多普勒频移， $\rho = R/R_{rms}$ 是归一化的信号幅度。

Average Fade Duration 平均衰落持续时间，表示一个信号幅值在特定水平 R 以下的持续时间。

在瑞利衰落信道中，服从以下公式，

$$\bar{\tau} = \frac{e^{\rho^2} - 1}{\sqrt{2\pi} f_m \rho}$$

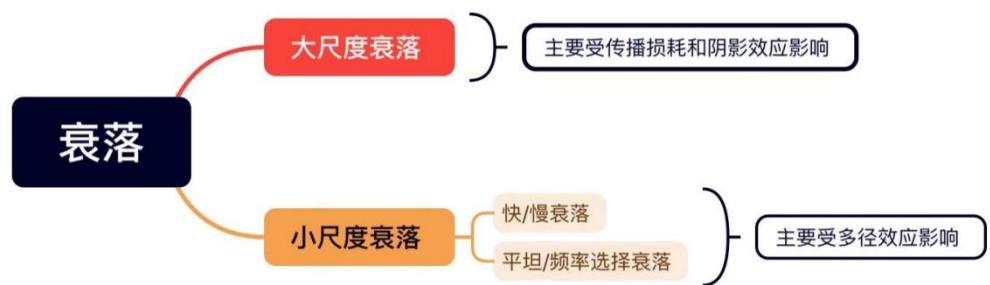
· 平坦/频率选择衰落：

平坦衰落指信号频带宽度远窄于相干带宽，所有频率分量受到的衰落基本相同。

频率选择衰落指频带宽度受相干带宽影响较大，不同频率分量衰落不同。

· 特别注意：

大尺度衰落、快/慢衰落、平坦/频率选择衰落是三组不相关的概念。



第二章 信道容量和信源编码

· Channel Capacity 信道容量：

在一个特定信道上，可以实现任意小差错传输的最大传输速率。

在加性高斯白噪声信道中的信道容量：

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right)$$

· Information and entropy 信息和熵：

任意码元 s_k 出现的概率是 p_k ，则这个码元的信息量可以通过下式定义，

$$I(s_k) = -\log_2(p_k) \text{ (bit)}$$

所有码元的数学期望就是熵，

$$H(\varphi) = E(I(s_k)) = \sum_{k=0}^{K-1} p_k \log_2 \left(\frac{1}{p_k} \right)$$

$$0 <= H(\varphi) <= \log_2 K$$

当所有码元出现概率相等时，熵最大。（熵是关于 p 的函数，使用求函数极值的方法证明）

$$H(\varphi^n) = nH(\varphi)$$

如果考虑将 n 位码元组合成一个新码元，那么这个新码元的熵是原来码元熵的 n 倍。

这个性质的具体表现就是如果一个码元可以表示 n bits，那么这个码元的信息量也是相应乘以 n 。

· Source Coding 信源编码：

对信源信息进行压缩减少冗余，保证信息的高效传输减少传输所需带宽。

出现频率高的词用更短 bit 的码元来表示。

· Coding Efficiency 编码效率：

平均码元长度指一个编码方法中码长的数学期望，

$$\bar{L} = \sum_{k=0}^{K-1} p_k l_k$$

编码效率表示为，

$$\eta = \frac{L_{\min}}{\bar{L}}$$

其中 L_{\min} 表示可以表示相同信息量的最短码长，也就是熵。

$$\bar{L} >= H(\varphi)$$

根据香农的信源编码理论，平均码长一定大于等于熵。

· Prefix Code 前缀码：

前缀码的所有码字都不是其他码字的前缀，所有码字的边界都自动确定。

通过 Decision Tree 树形决定图可以生成前缀码。

前缀码可以被唯一解码，但是可以唯一解码的不一定是前缀码。

判断前缀码的必要条件是 Kraft-McMillan Inequality:

$$\sum_{k=0}^{K-1} 2^{-l_k} \leq 1$$

• Huffman Code:

一种非常重要的前缀码，给每个码元分配与其信息量匹配长度的 bit 串。

算法：

- (1) 所有码元按概率降序排列。
- (2) 排在末尾的两个码元分别得到一个 0 和 1。这里统一倒数第一分配 1，倒数第二分配 0。如果是合并的概率被分配，则所有合并码元都得到同一个数字。
- (3) 将最后两个概率相加，得到一个新的概率，并将所有概率重新排列，新得到的概率在排列的时候如果有并列，则新得到的概率排序靠前。
- (4) 重复第 (2) 步和第 (3) 步直到所有码元都被编码。

• Lempel-Ziv Coding:

一种无损数据压缩算法，不需要先验概率分布。

LZ78 将字符串转化为一系列索引和码元的组合，这个组合包含三个元素：index 码元索引号、Dictionary 码元词典、Codeword 码元编码。其思路是 0 和 1 作为基础码元录入词典，各分配一个索引号和初始编码，后面找到的新码元必须是词典中码元加上一位后缀，也就是后面的码元必须指向前面的一个已知码元，根据这个已知码元的索引号二进制作为前缀生成新码元的编码。

具体编码算法如下，

- (1) 先根据被编码文本估计需要多少码元以及几位编码，如果位数不够，直接补零就行。例如，如果码元个数在 15 个以内，则二进制索引号用 4 位，编码位数为 5 位。
- (2) 写初始表格。0 和 1 默认在词典中。

Index	Binary Index	Symbol Dictionary	Codeword
1	0001	0	00000
2	0010	1	00001

(3) 从被编码序列中找下一个新码元，其前缀是一个已知码元。新码元录入码元词典，索引号+1 排在表格末尾，读取新码元指向的码元二进制索引号，加上新码元的最后一位，形成这个码元的编码。

(4) 重复第 (3) 步直到被编码序列结束。

解码过程同样是根据编码序列和初始编码词典，写出编码词典表格，完成解码。

第三章 信道编码

· Single-bit Parity Check Code 一位奇偶校验码：

可以检出奇数位的错误，不能纠错。非常简单易于实现。

· Linear Block Code 线性块码：

通过线性映射的方法将 k 位码映射成 n 位。映射时要尽量保证码越短且码距越长越好，这样可以保证通过最少的冗余度达到最好的效果。

线性块码的两个合法码字相加必然是另一个合法码字。

· Generator Matrix 生成矩阵：

假设要将 k 位码线性映射成 n 位，则左乘的生成矩阵 G 需要是 $k \times n$ 的矩阵，且 $R(G)=k$ 。
系统线性块码生成矩阵，

$$G = [I_k | P]$$
$$C_i = U_i G = U_i [I_k | P] = [u_{i1}, \dots, u_{ik}, p_1, \dots, p_{n-k}]$$

· Parity Check Matrix 校验矩阵：

校验矩阵的特点是，将校验矩阵 H^T 左乘生成矩阵 G 之后，得到的是全 0 矩阵。

$$H = [P^T | I_{n-k}]$$
$$GH^T = 0_{k,n-k}$$

因此，将相应的块码左乘校验矩阵 H^T 也得到全 0 矩阵。

$$C_i H^T = U_i G H^T = 0_{n-k}$$

如果接收码字 R 左乘校验矩阵 H^T 之后不是全 0 矩阵，那么说明传输过程中一定发生了错误。

· Syndrome Testing 纠错：

接收码字可能是传输码字加上错误，

$$R = C + e$$

左乘校验矩阵之后， C 项变为 0， e 项变成错误图像 S ，通过查表确定 S 对应的 e 。

将 e 模 2 加到 R 上，就可以完成纠错。

· Minimum Distance 最小码距：

对于线性块码而言，最小码距就是最小码重。

最小码距可以确定编码的检错能力和纠错能力。

已知一个线性块码的最小码距是 d_{min} ，那么其检错能力是 $d_{min} - 1$ ，纠错能力是 $\frac{d_{min}-1}{2}$ 。

· 卷积码：

由移位寄存器进行编码，移位寄存器最左边一位是输入位，剩下右边的几位是状态位。若移位寄存器有 $n-1$ 个状态位，则生成多项式就是 $n-1$ 阶的。 $n-1$ 阶的生成多项式控制相应的 1 位输入和 $n-1$ 位状态位进行模 2 加，产生输出。

若有 k 个生成多项式，则每 1 位输入就会产生 k 位输出。

默认初始状态下状态位是 00，被编码序列后面也会加上 00 进行填充。

· 卷积码状态图：

若状态位有 $n-1$ 位，则会有 2^{n-1} 个不同的状态。当状态已知时，确定输入（0/1），则输出和状态变化也被唯一确定。所以可以画出状态图，标示出不同状态下收到不同输出时状态的转变和相应的输出。

· 卷积码 Trellis 图：

将 $n-1$ 个状态纵向排列，引入时间点的概念，一个时间间隔代表一次输入，将状态纵列沿时间轴横向复制，绘制成状态随时间变化的点格。每一列代表一个时间点的编码器状态，每个间隔代表一次输入，全 0 状态作为起始状态点，绘制 Trellis 图。

图上所有路径都对应一个相应的输入和一个相应的输出，路径左边的起点是生成输出的状态，右边的终点是转移成的状态。这样就将所有的状态变化路径和相应的输出都完整地图示。

· Viterbi 解码

利用 Trellis 图可以进行卷积码的 Viterbi 解码，将被解码序列排在 Trellis 图上方，与每条路径上的输出对比，计算汉明距离，将汉明距离值写在相应的路径上。

起始时间点，所有状态点的值都是 0，每进行一次输入的解码，时间点右移一位，将起点的汉明距离值加上路径的汉明距离值，得到终点的汉明距离值。

若一个终点有多条路径可以到达，则选择总汉明距离最短的路径保留，删掉其他的路径。

重复这个过程，直到被解码序列结束，在最后的时间点检查哪个状态点的值最小，选择值最小状态点对应的路径。

第四章 分集技术、扩频技术、多载波技术

· 数字调制的优点：

- 通过 MQAM 等技术可以有更高的数据传输速率。
- 强大的纠错技术，可以使信号更不易受到噪声和衰落的影响。
- 对信道的损坏更加耐受，均衡技术和多载波技术可以用来缓解码间串扰。
- 更加有效的多接入策略，扩频技术可以被应用于同时侦测多个用户。
- 更好的安全性和隐私性，易于加密。

· Diversity 分集技术：

通过增加信噪比可以降低 AWGN 信道上的误码率，但是在 Rayleigh 衰落信道上表现较差。

分集技术可以降低衰落信道上的误码率。其技术原理是多条独立信道上同时经历衰落的概率很低，将信号分开到多个独立信道上传播，再在接收端通过一定技术结合，以此来缓解衰落的影响。

分集技术分类：Time Diversity, Frequency Diversity, Space Diversity, Polarization Diversity, Multiuser Diversity, Cooperative Diversity, Macro Diversity.

· Selection Combining(SC)：

技术思想：在多条独立路径信号中选一条信噪比最大的路径信号作为接收机的接收信号。

优点：简单易于实现，功耗较低。

缺点：性能一般，抗衰落能力差；随着接收天线数量 M 增加，其性能不是线性增加。

· Maximum Ratio Combining(MRC)：

技术思想：对多条独立路径中的信号先进行相位校正，然后求加权平均后作为接收机的接收信号。信噪比越大的路径权重越大。

优点：性能随 M 增大线性增加。

缺点：复杂，需要实时测量每条路径上的 SNR。

· Equal-Gain Combining(EGC)：

技术思想：直接把所有独立路径中的信号相位校正之后求平均。

优点：不需要测每条路径上的 SNR；性能与 MRC 非常接近。

· Time Diversity 时间分集：

思想：不要把鸡蛋放在同一个篮子里。一个码元周期只发一个码元，如果这个码元周期遭受衰落影响，则这个码元信息丢失。现在利用交织技术 (interleaving) 把一个码元分成 N 小份分别放在 N 个码元周期中，避免了一个单独码元周期出故障，则导致信息丢失的情况。

· Spread Spectrum 扩频技术：

扩频技术优点：

发送功率不变，频谱变宽，难以被侦听。

缓解码间串扰 ISI。

便于多用户共享频带。

可以实现捕捉时空信息。

扩频原理：

扩频信号占用了一个远宽与原信号的频带。

扩频调制是使用扩频码来实现的，这个扩频码是与原数据独立的。

扩频解调也需要一个同步的扩频码。

两种扩频技术：

Direct Sequence Spread Spectrum(DSSS) 直接序列扩频

Frequency Hopping Spread Spectrum(FHSS) 跳频扩频

· Spreading Code 扩频码：

扩频码特性：

平衡性：0 和 1 的个数最多差 1 个。

连续性：连续的 0 和连续的 1 的个数需要满足：1 连占 $1/2$, 2 连占 $1/4$, 3 连占 $1/8$, 以此类推。

相关性：循环移位之后，与原先的码按位比较，所有移位的码和原码相同的位和不同的位个数越小越好。

类别：

M-sequence (使用循环移位寄存器生成，可以由生成多项式确定循环移位寄存器结构，利用不同的初始序列可以生成不同的 M 序列，但是只要是相同结构的循环移位寄存器，那么这些 M 序列都是对方的循环移位)

Gold-sequence (由两个 M-sequence 相加获得，互相关函数只有三个值)

Walsh-Hadamard Sequence (由特定矩阵生成，完全正交)

为了实现 CDMA，不同扩频码的互相关函数应该很小（最好是正交的），自相关函数应该很大（这样也可以通过这个特性提取定时同步信号）。

· 多载波技术：

将多个用户的信号放在不同频的载波上，实现信道复用，这些载波相互正交，因此可以在频带上有重叠，提高频带利用率。

这样做的好处是每一个子信号的频带宽度比较窄，在遭受频率选择性衰落的时候，更加稳定。

· OFDM 正交频分复用：

相互重叠的子信道：

为了实现这一点，需要满足一个特性：每个子载波在一个特定周期 T_N 内必须有整数个波形。

Guard Interval:

多条路径上传播的 OFDM 码元可能有不同的时延，为了可以区分不同码元，在码元之间引入 GI 分隔。一般用 0 值作为 GI 的值，但是这样会有一个问题：OFDM 的码是正交的，0 值会破坏正交性。

Cyclic Prefix 循环前缀：

为了解决 0 值 GI 的问题，引入循环前缀来保留正交性。

Part 2

· 蜂窝移动系统的组成：

- UE 用户设备：与基站进行通信
- RAN 基站：由天线、远程无线单元和基带单元构成
- 核心网：控制无线通信，并且充当无线通信网与互联网的桥梁

· 5G 核心网：

数据层：

User Plane Function (UPF)：主要负责包转发，是 RAN 和外界网的网关。

控制层：

Session Management Function (SMF)：IP 地址分配和会话管理。

Access and Mobility Management Function (AMF)：控制信令。

· 4G-5G 过渡：

Option 3 (Non-Standalone NSA) 非独立组网：

使用 4G 核心网 EPC

使用 4G 控制层 LTE RAN

使用 5G 数据层 NR RAN

Option 2 (Standalone SA) 独立组网：

使用 5G 核心网 5GC

使用 5G 接入网 NR RAN

· 5G RAN 协议栈：

#位于核心网中：

NAS 非接入层：核心网中的 AMF 直接控制用户设备

#位于基站 CU 中：

Radio Resource Control (RRC) 无线资源控制：协调控制设备通信

Service Data Adaptation Protocol (SDAP) 服务数据适应协议：将 QoS 流映射到数据无线承载，依赖 5GC 所以不能在 NSA 中工作

Packet-Data Convergence Protocol (PDCP) 包数据收敛协议：压缩数据包，分发数据到 RLC 层

#位于基站 DU 中：

Radio-Link Control (RLC) 无线链路控制：包分段，差错控制

Medium Access Control (MAC) 媒介接入控制：多路复用，重传机制

#位于基站 RU 中：

PHY 物理层：

CRC：分段，每段加 CRC。用于定位错误

LDPC：信道编码

Rate Matching：加减 bit，应用交织，保证传输速率匹配

Modulation：使用 MQAM 调制

Layer Mapping：层映射，总共有 8 个传输层

Multi-Antenna Precoding：多天线预编码，使用预编码矩阵 W 进行预编码，在预编码之前需要加上 DM-RS，在编码之后加上 CSI-RS

Resource Mapping：资源映射，将逻辑数据映射到资源网格上

· Numerology:

OFDM 中的重要概念，确定了子载波间隔和循环前缀。

子载波间隔， $15\text{kHz}-960\text{kHz}$ ， $\text{SCS} = 2^\mu * 15 \text{ kHz}$ ($\mu = 0, 1, 2, \dots, 6$)

不同子载波间隔，OFDM symbol 的长度也不同，一个帧 10ms，包含 10 个子帧，一个子帧包含 2^μ 个时隙，一个时隙包含 14 个 OFDM symbol。

子载波间隔越大，OFDM symbol 长度越短，循环前缀占 OFDM symbol 固定比例（大约 7%）长度，所以 SCS 越大，循环前缀也就会越短。

在一个 OFDM symbol 上的一个子载波就是一个资源单元 RE，将 RE 排成网格就成了 Resource Grid 资源网格，用于安排规划通信所需的时频资源。

12 个子载波构成一个资源块 RB，一个 5G NR 载波可以支持最多 275 个资源块，也就是 3300 个子载波。不同的 SCS 可以有不同的通信带宽，但是最大通信带宽限制是 2GHz。

· 频域资源：

所有的资源块都要与载波外的一点对齐。

统一资源块 CRB：外部对齐

物理资源块 PRB：内部对齐

不是所有设备都可以支持所有频带，所以将频带进一步划分，引入了 Bandwidth Parts (BWP) 的概念。BWP 是连续的使用同一个 numerology 的 PRBs 系列。

一个设备在一个小区中最多可以被分配 4 个上行 BWPs 和 4 个下行 BWPs。一次只能有一个 DL BWP 和一个 UP BWP 被激活，数据和信令将在这对激活的 BWPs 上传输。

设备可以选择激活不同的 BWPs 来使用不同的通信 Numerology。

· 载波聚合：

可以将同一个频带内相邻或者不相邻的，甚至不同频带中的载波聚合，以获得更大的频带宽度。最多可以聚合 16 个载波。

· 双工策略：

TDD 时分双工：上行传输和下行传输使用同一个频率但是在不同的时隙

FDD 频分双工：上行传输和下行传输同时进行但是不使用同一个频率

频分半双工：上行下行不同时间不同频率

Dynamic TDD 动态时分双工：灵活分配上下行传输时隙，防止干扰，合理利用资源

· 天线端口：

天线端口是一种逻辑上的抽象，并不与物理天线一一对应。每个天线端口都被认为是使用一个独立的信道，在这个天线端口上传输的数据都收到了相同信道特性的影响。天线端口使用自己的资源网格和 RS 参考信号。最多有 32 个天线端口。

· 信道测量参考信号：

CSI-RS 下行信道测量，与每个天线端口对应，测量这个天线端口对应信道的信道特性。

SRS 上行信道测量，与 CSI-RS 相对应，但是只能最多 4 个天线端口，最多可以占用 14 个 OFDM 符号。

· 控制信令：

PDCCH 物理下行控制信道，其中的负载是 DCI 下行控制信息，每个 UE 都会从 gNB 上获得一个 RNTI 无线网络临时标识。在 PDCCH 上使用 Polar 编码作为信道编码。

PDCCH 中的 DCI 有时需要进行盲解码获得

UCI 上行控制信息既可以在 PUCCH 物理上行控制信道也可以在 PUSCH 物理上行共享信道上传输。

· 功率控制：

上行功率控制，为了保证所有的设备信号都以一个合适的功率被基站接收，避免太高的功率对其他用户进行干扰。

开环功率控制：使用 CSI-RS 等下行信道测量信号估计信道，相应调整发射功率

闭环功率控制：基站根据 UE 的信号接收功率发送相应的信令，控制 UE 调整功率

· 时间控制：

OFDM 需要时隙对齐，不然就会产生码间干扰，不同 UE 距离基站距离不同，所以需要引入 TA 时间提前量来保证所有 UE 信号到达时间基本对齐。

· 初始接入：

在一个 UE 进入新小区的时候需要进行初始接入，SSB 同步信号块是初始接入时重要的信号，帮助 UE 获取与基站建立连接的必要信息。

SSB 由三个部分组成，PSS，SSS 和 PBCH，占用 240 个子载波和 4 个 OFDM 符号。

PSS 是 UE 进入系统时最先搜寻的信号，易于被发现，可以使设备和系统频率对齐，占用 127 个 RE

SSS 可以和 PSS 共同作用确定小区的 PCI 物理小区标识，也占用 127 个 RE

PBCH 中包含 SIB1 的“指针”，SIB1 中又包含其他 SIB 的“指针”。SIB 系统信息块提供了 UE 接入系统所需要的系统信息。

· 随机接入：

当一个 UE 连接断开或者切换小区的时候需要进行随机接入，随机接入主要分四步。

UE 在特定的 PRACH 物理随机接入信道中向基站发送前导码，如果没有收到回复就会提高功率继续发。

基站收到前导码之后给 UE 发送一个 RAR 随机接入回复，提供时间对齐指令。

UE 用第 3 条信息向基站汇报其重要的信息。

基站用第 4 条信息向 UE 提供接入网络必要的信息。

· 波束管理：

波束管理就是建立和维护一个波束对的过程。包括三个部分：初始连接建立，波束调整和波束重建。

· 物联网：

物联网的最重要需求就是低延迟和高可靠性，为了实现这一点则需要上行抢占的技术。有些信息可以享受更高的传输优先级，高优先级的信号可以对信道资源进行上行抢占，包括取消低优先级信号的传输，以及提高自身发射功率。

使用 PDCP 重复来实现多重连接，重要的信息多发几次。

RedCap 降低通信性能，以换取更多的设备连接。

· 卫星通信：

卫星轨道：

LEO 低轨卫星：低 RTT，小体积

MEO 中轨卫星：波束轨迹与 LEO 类似

GEO 静止轨道卫星：35786km 高度，11070km/h 速度，波束覆盖 200km-4000km，RTT 544ms

卫星链路分三种：反馈链路负责卫星和地表基站通信；卫星间链路负责太空通信；服务链路负责与 UE 通信。

卫星通信模式有两种：透明传输，卫星只负责放大和转发基站信号；再生传输，卫星将基站内容解码，检查错误，重新生成之后再转发。

由于延时太大，卫星通信不太适合 TDD，FDD 是一个更好的选择。

为了保证通信的时间同步，卫星的巡航信息需要被广播，使 UE 知道卫星的位置信息，从而保证时间同步。