

# 无线通讯技术及手机通讯元器件解析

## 3G、4G、5G 背后的科学意义

智能手机的问世除了带动移动世代的崛起，更加速通讯技术的革新，在几年间，数据传输率的增加让使用者享受高速移动网络新体验，3G、4G、5G 的议题热度也始终居高不下。但是一般人对 4G 乃至 5G 的认知，就是手机上网的速度更快，并不了解背后的科学含意，本文将从不同通讯世代的角度切入，一步步带领读者认识这些技术背后的原理，到底什么是电磁波？什么是带宽？不同世代的差别又在哪里？

### 移动电话的世代

我们常常听到广告说：4G LTE，其中 G 代表“世代 (Generation)”，4G 代表第四代，是为了与之前的第二代 (2G)、第三代 (3G) 移动电话做出区隔，我们以目前全球市占率最高的欧洲系统来说明：

- 第二代移动电话 (2G)：GSM 系统只支持线路交换 (注) 的语音通道，主要透过语音通道打电话与传送简讯，GPRS 系统支持封包交换因此可以上网，但是由于利用语音通道传送数据封包，因此上网的速度很慢。
- 第三代移动电话 (3G)：UMTS 系统支持封包交换 (注)，可以用更快的速度上网，由于 3G 的手机同时支持 2G，因此当我们使用 3G 的手机讲电话或传简讯时，其实是使用 GSM 系统的语音通道来完成。
- 第四代移动电话 (4G)：LTE / LTE-A 系统支持封包交换，可以用更快的速度上网，由于 4G 的手机大多同时支持 3G 与 2G，因此在手机找不到 LTE 基站时仍然会以 UMTS 基站上网，讲电话或传简讯时仍然是使用 GSM 系统的语音通道来完成。

其实 4G 使用的 LTE 系统由于数据传输率很高，可以直接将语音数据切割成封包来传送，原理就和 Skype 网络电话一样，可以让音质更好，但是封包交换通常费用是以数据传输率来计算，等于使用者讲再久费用都一样，对电信公司来说如何收到更多钱是个问题；反观线路交换是计时收费，电信公司能够赚到更多钱，因此目前大部份电信公司的 4G LTE 提供讲电话或传简讯时，仍然是使用 GSM 系统的语音通道来完成。

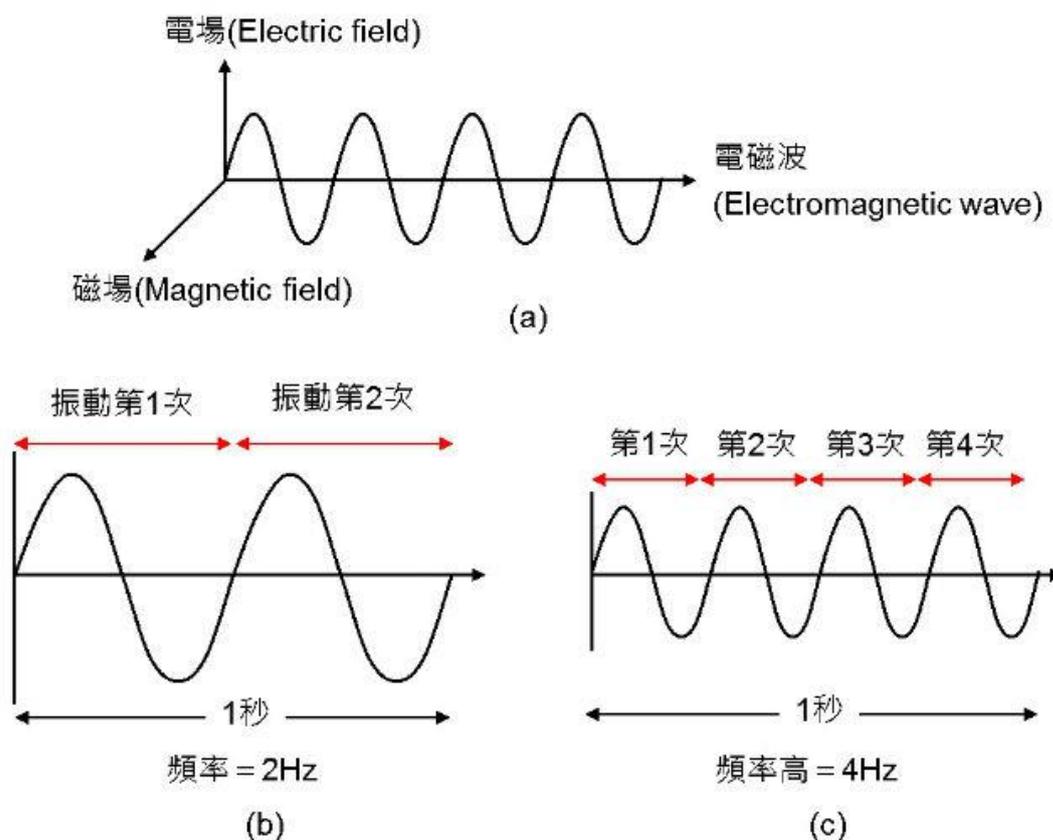
### 带宽的科学含意

一般人对通讯世代的认知就是愈后面的世代表示带宽 (Bandwidth) 愈宽，带宽就好像高速公路，带宽愈宽就好像高速公路愈宽 (车道愈多)，代表行车速度愈

快，也就是通讯时数据传输率愈高；再讲简单一点，就是手机上网的速度更快，这样的观念是对的，但是这种认知是不科学的，要解释带宽，我们需要从电磁波说起。

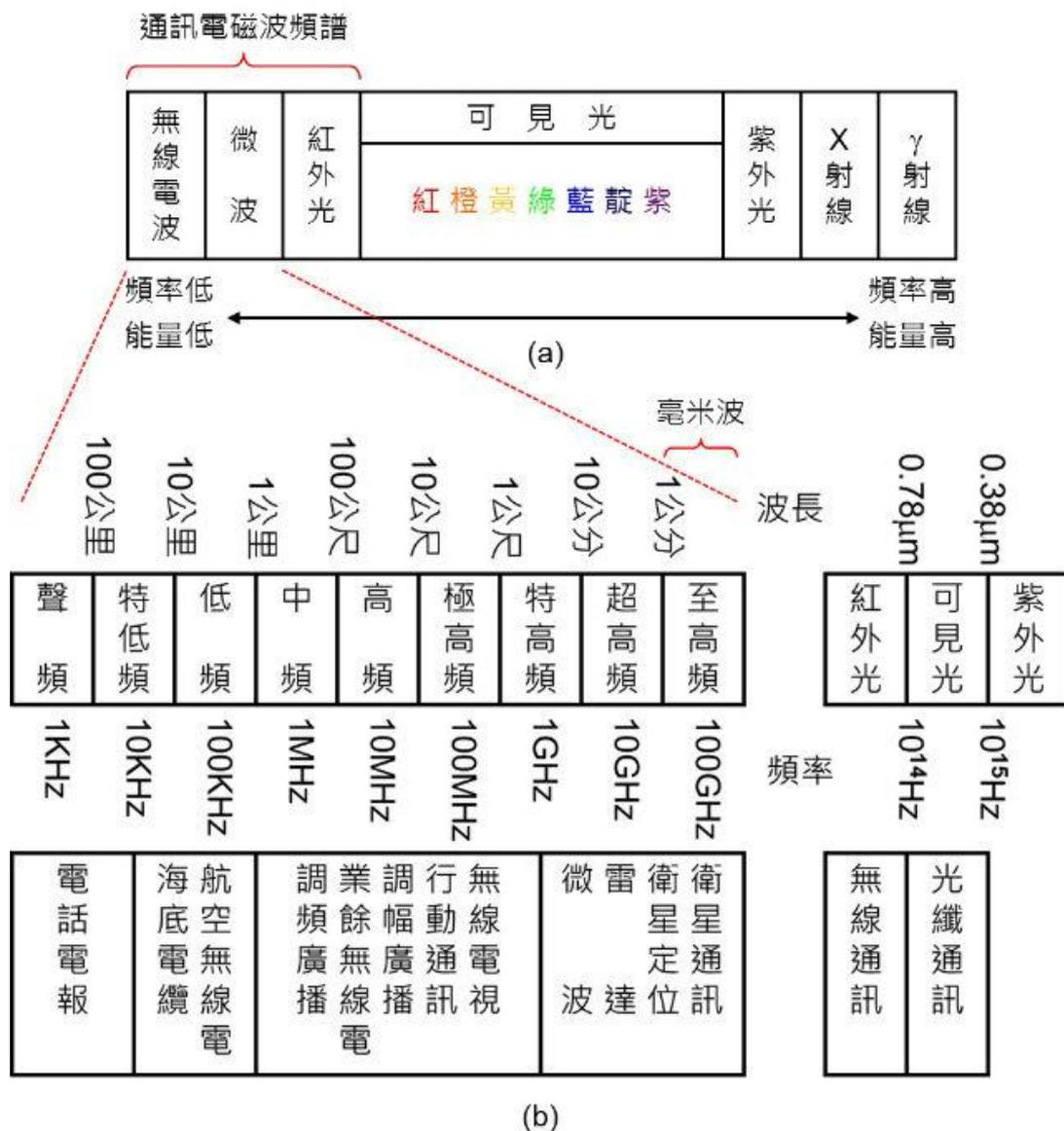
## 无线通讯传递媒介：电磁波

电磁波 (Electromagnetic wave) 是由互相垂直的“电场 (Electric field)”与“磁场 (Magnetic field)”交互作用而产生的一种“能量 (Energy)”，这种能量在前进的时候就像水波一样会依照一定的频率不停地振动，如图一 (a) 所示。电磁波每秒钟振动的次数是“频率 (Frequency)”，单位为“赫兹 (Hz)”，假设某一个电磁波一秒钟振动 2 次，则频率为 2Hz，如图一 (b) 所示；一秒钟振动 4 次，则频率为 4Hz，如图一 (c) 所示，例如：无线区域网络 (Wi-Fi) 与蓝牙 (Bluetooth) 的通讯频率为 2.4GHz，意思就是它使用的电磁波每秒钟振动 24 亿次 (在这里 G 的意思是 Giga，也就是 Billion，代表 10 亿，不是前面 3G、4G、5G 的那个 G)。



▲ 图一：电磁波的定义。(a) 电磁波是由彼此互相垂直的电场与磁场交互作用而产生的能量；(b) 每秒钟振动 2 次则频率为 2Hz；(c) 每秒钟振动 4 次则频率为 4Hz。

宇宙里自然存在的所有电磁波如图二（a）所示，我们称为“电磁波频谱（Spectrum）”，由图中可以看出中间的部分是光（Light），包括：红外光（Infrared, IR）、可见光（人类肉眼可以看见的光）、紫外光（Ultraviolet, UV），因此光是一种电磁波；右边为频率更高（能量更高）的电磁波；左边为频率更低（能量更低）的电磁波，由于频率较低的电磁波比较安全，而且具有良好的绕射特性，因此适合用来做为无线通讯使用。



▲ 图二：电磁波频谱与应用。（a）电磁波频谱；（b）通讯电磁波频谱。

目前用来做为无线通讯的电磁波如图二（b）所示，包括：

- 频率大约 100G~1GHz 的电磁波：通常应用在卫星通讯、卫星定位、雷达与微波通讯等，而频率 30GHz 以上（相当于波长 10 毫米以下）的电磁波称为“毫米波（Millimeter Wave）”，目前有公司计划应用在 5G 的通讯系统中。

- 频率大约 100M~1MHz 的电磁波：通常应用在无线电视、移动通讯（GSM / GPRS）、调幅广播（AM）、业余无线电、调频广播（FM）等。
- 频率大约 100K~1KHz 的电磁波：通常应用在航空无线电、海底电缆、电话与电报等。

## 无线通讯传递通道：带宽

带宽（Bandwidth）是用来传递信号的“频率范围”，单位与频率相同为“赫兹（Hz）”，而且每一对通讯使用者必须使用“不同的频率范围”来通话，假设：

甲和乙使用频率 900~900.2MHz 的电磁波通话（带宽  $900.2-900=0.2\text{MHz}$ ）；

丙和丁使用频率 900.2~900.4MHz 的电磁波通话（带宽  $900.4-900.2=0.2\text{MHz}$ ）；

此时我们说这个通讯系统的语音通道带宽为 0.2MHz。

手机并不会分辨到底是谁和谁在通话，而是接收某一个“频率范围（带宽）”的电磁波信号，因此甲与乙通话时手机都接收频率 900~900.2MHz 的电磁波，丙与丁通话时手机都接收频率 900.2~900.4MHz 的电磁波，换句话说，所有的通讯元件都是“只认频率不认人”，而且相同频率范围的电磁波只能使用一次，不能重复使用，否则会互相干扰。

## 带宽与数据传输率的差异

“带宽（Bandwidth）”与“数据传输率（Data rate）”的意义很类似，常常让我们混淆，这里简单说明它们之间的差别：

- 带宽（Bandwidth）是模拟通讯使用的名词：由图一可以看出，电磁波是一种连续的波动能量，既然是连续的当然一定是模拟信号，因此“带宽（Bandwidth）”和它的单位“赫兹（Hz）”指的都是电磁波的物理特性。
- 数据传输率（Data rate）是数字通讯使用的名词：手机会先将我们讲话的声音（连续的模拟信号）先转换成不连续的 0 与 1 两种数字信号，再经由天线传送出去。数据传输率的单位“每秒位数（bps: bit per second）”，代表每秒可以传送几个位，也就是每秒可以传送几个 0 或 1，例如：1Gbps（1G = 10 亿）代表每秒可以传送 10 亿个位（10 亿个 0 或 1）。

数据传输率是数字通讯时实际传送每个位数据的速率，重点是数字信号让我们可以利用不同的调制与多工技术，使相同带宽的介质具有更高的数据传输率，这就是目前许多新的通讯技术，例如：3G 使用的 WCDMA、4G 使用的 OFDM 等被发明出来的原因，后面会再详细说明。

最后提醒大家,我们申请的 ADSL 是属于数字通讯,因此要选择 10Mbps、100Mbps 指的其实都是“数据传输率”,不应该说是“带宽”,下回别再用错名词啰!

### 注: 线路交换与封包交换

**线路交换 (Circuit switch):** 是指传送端与接收端之间先建立一条专用的连线再进行通讯,传统的“语音通信 (Telecom)”都是属于线路交换,例如: 国内电话与国际电话、移动电话等在通话之前都必须先拨号,等交换机将电话接通之后才能通话,就是使用线路交换的方式,通常费用是以“使用时间”计算,例如: 拨打市内电话或移动电话,使用愈久费用愈高。

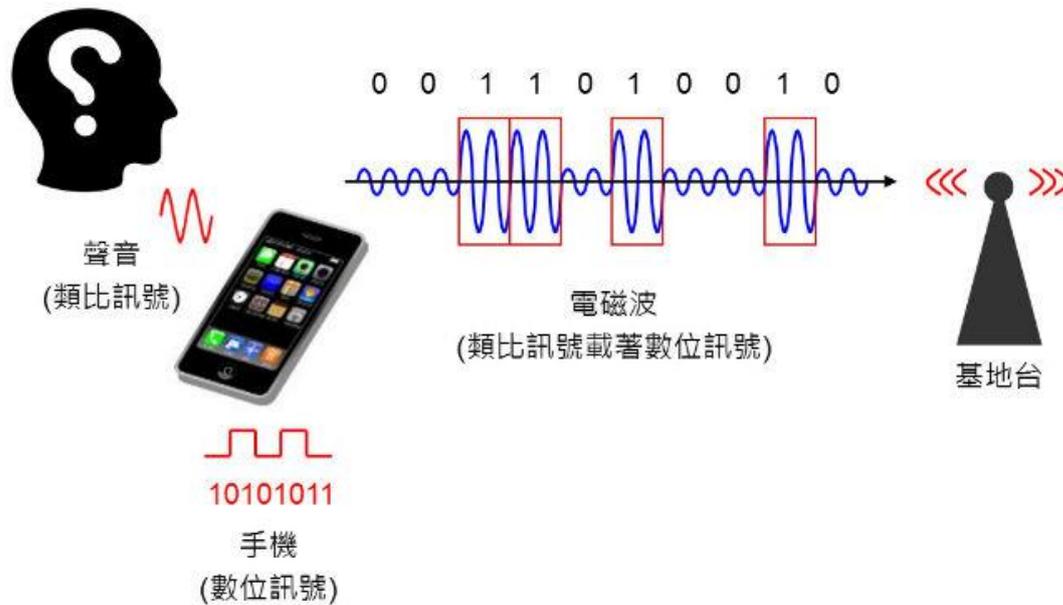
**封包交换 (Packet switch):** 是指传送端与接收端之间共用一条线路,必须先将要传送的数据切割成许多较小的“封包 (Packet)”再进行通讯,目前的“数据通信 (Datacom)”都是属于封包交换,使用者要传送的数据愈多,则封包数目愈多,传送的时间愈长,电脑网络在通讯之前并不需要拨号,只要将网络线连接即可使用,就是使用封包交换的方式,通常费用是以“数据传输率”来计算。

我们了解到无线通讯的频谱有限,分配非常严格,相同带宽的电磁波只能使用一次,例如 2G 的 GSM900 系统使用频率范围 890~960MHz,则其他的无线通讯就不能再使用这个频率范围,否则会互相干扰。为了解决僧多粥少的难题,工程师研发出许多技术,来扩增频谱的使用率,例如 TDMA、FDAM、CDMA、OFDM,而在这些复杂技术的背后,只要能掌握两个基本概念,就能了解整个通讯技术的发展关键。

这两个基本概念为“调制技术” (Modulation) 与“多工技术” (Multiplex)。其中调制技术是将模拟电磁波调制成不同的波形,来代表 0 与 1 两种不同的数字信号,这样才能利用天线传送到很远的地方 (这里只谈数字调制技术,不讨论早期的 AM、FM 这种模拟调制技术)。多工技术则是将电磁波区分给不同的使用者使用,由于手机必须设计给所有的人使用,当每支手机都把电磁波丢到空中,该如何区分那个电磁波是谁的呢?

### 数字调制技术 (Digital modulation)

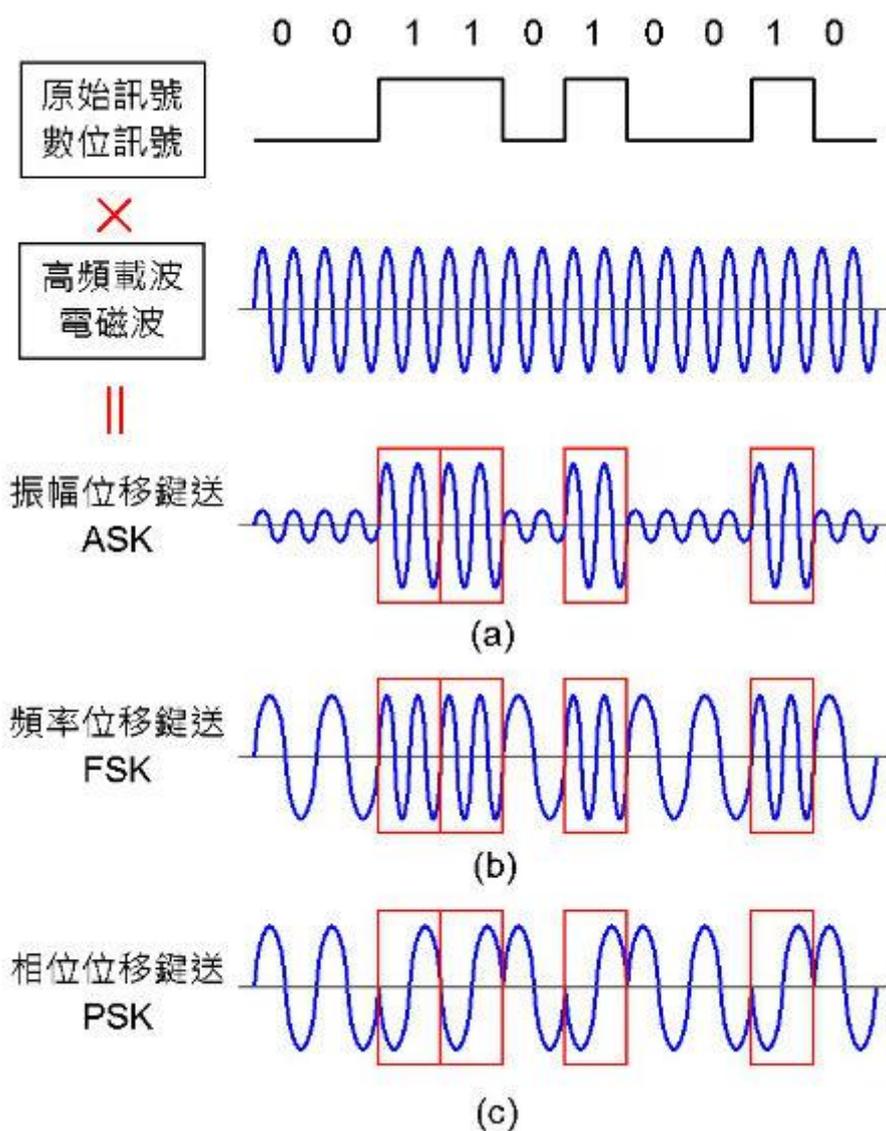
现在的手机是属于“数字通讯”,也就是我们讲话的声音 (连续的模拟信号),先由手机转换成不连续的 0 与 1 两种数字信号,再经由数字调制转换成电磁波 (模拟信号载着数字信号),最后从天线传送出去,原理如图一所示。



▲ 图一：数字通讯示意图。（Source: [the noun project](http://the-noun-project.com/)）

电磁波是连续的能量，如何利用电磁波替我们传送这些 0 与 1 的数字信号呢？因此科学家发明了下列 4 种数字调制技术：

1. 振幅位移键送(ASK): 利用电磁波的“振幅大小”载着数字信号(0 与 1) 传送出去，振幅小代表 0，振幅大代表 1，图二 (a) 所示。
2. 频率位移键送(FSK): 利用电磁波的“频率高低”载着数字信号(0 与 1) 传送出去，频率低代表 0，频率高代表 1，图二 (b) 所示。
3. 相位位移键送 (PSK)：利用电磁波的“相位不同 (波形不同)”载着数字信号 (0 与 1) 传送出去，相位  $0^\circ$  代表 0，相位  $180^\circ$  代表 1，图二 (c) 所示。
4. 正交振幅调制 (QAM)：同时利用电磁波的“振幅大小”与“相位不同 (波形不同)”载着数字信号 (0 与 1) 传送出去。



▲ 图二：数字信号调制技术。(a) ASK：振幅小代表 0，振幅大代表 1；(b) FSK：频率低代表 0，频率高代表 1；(c) PSK：相位  $0^\circ$  代表 0，相位  $180^\circ$  代表 1。

数字调制技术的优点包括可以侦错与除错、可以压缩与解压缩、可以加密与解密、更好的抗噪声能力等，我们所使用手机 2G 的 GSM / GPRS、3G 的 UMTS、4G 的 LTE / LTE-A、无线区域网络 (Wi-Fi)、蓝牙 (Bluetooth) 等都是使用数字调制，显然数字通讯是发展的趋势。

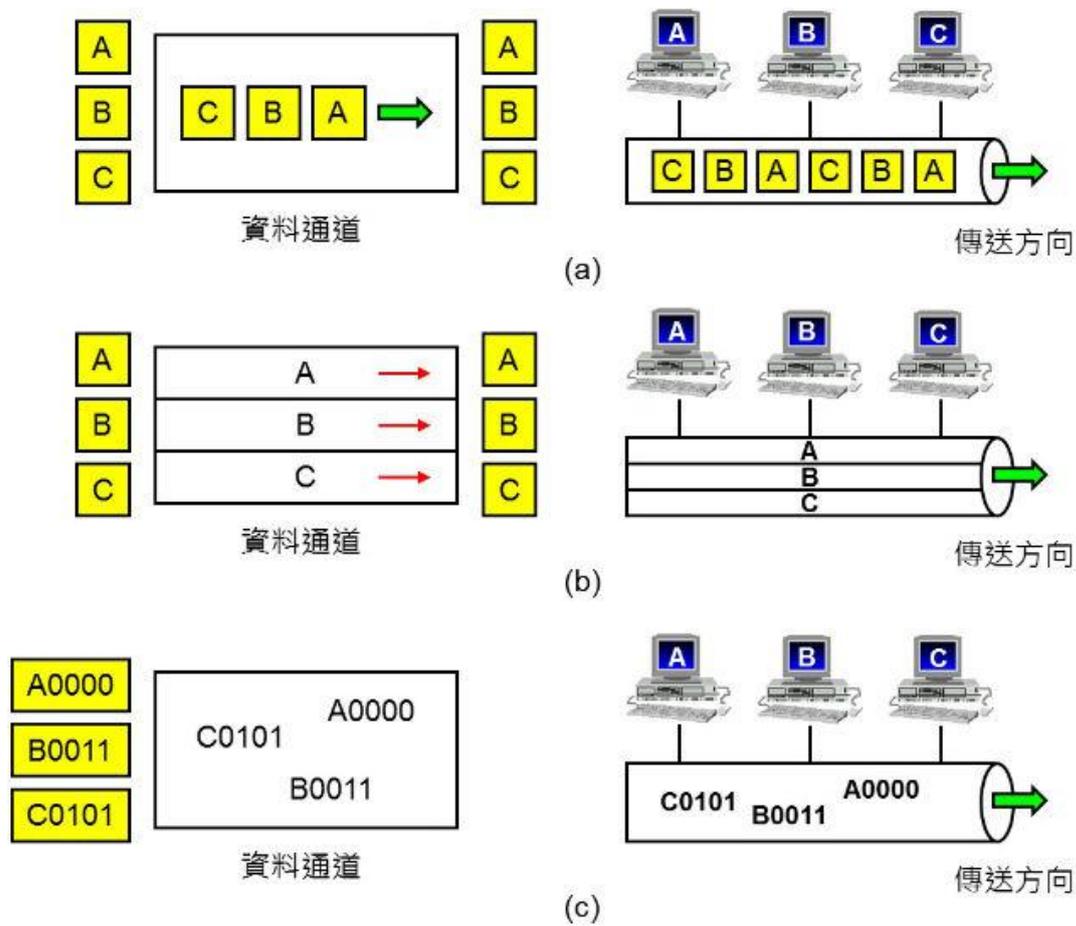
传送端将数字信号 (0 与 1) 转变成不同的电磁波波形称为“调制 (Modulation)”；同理，接收端将不同的电磁波波形还原成数字信号 (0 与 1) 称为“解调 (Demodulation)”，所有的通讯设备一般都必须同时支持传送 (调制) 与接收 (解调)，因此科学家把负责调制与解调的元件称为“调制解调器”，英文就把“Modulation”与“Demodulation”的字头组合成一个新单字“Modem”，下回只要听到 Modem 就知道它是在做通讯用的元件啰！

## 多工技术 (Multiplex)

多人共同使用一条资讯通道的方法称为“多工技术”(Multiplex),简单的说,天空只有一个,你的手机要丢电磁波出去,我的手机也要丢电磁波出去,两种电磁波在天空中混在一起,接收端该如何区分那些是你的(和你通话的),那些是我的(和我通话的)呢?

多工技术的目的就是让所有人使用,而且彼此不能互相干扰,为了增加数据传输率,可能必须同时使用两种以上的多工技术,才能满足每个人都要使用的需求。无线通讯常见的多工技术包括下列 4 种:

1. 分时多工接取(TDMA):使用者依照“时间先后”轮流使用一条资讯通道,如图三(a)所示,目前 2G 的 GSM / GPRS 系统有使用 TDMA。
2. 分频多工接取(FDMA):使用者依照“频率不同”同时使用一条资讯通道,如图三(b)所示,前面介绍每一对使用者必须使用“不同的频率范围”来通话,其实就是 FDMA,目前 2G 的 GSM / GPRS、3G 的 UMTS 有使用 FDMA。
3. 分码多工接取(CDMA):将不同使用者的数据分别与特定的“密码(Code)”运算以后,再传送到数据通道,接收端以不同的密码来分辨要接收的信号,如图三(c)所示。目前 3G 的 UMTS 有使用 CDMA。
4. 正交分频多工(OFDM):前面介绍过分频多工(FDMA)是使用者依照“频率不同”同时传送数据,而 OFDM 原理类似,唯一不同的是必须使用彼此“正交”的频率,目前 4G 的 LTE / LTE-A、无线区域网络 (IEEE802.11a/g/n)、数字电视(DTV)、数字音讯广播(DAB)有使用 OFDM。



▲ 图三：多工技术 (Multiplex)。 (a) TDMA：依照时间先后轮流使用； (b) FDMA：依照频率不同同时使用； (c) CDMA：将不同使用者的数据分别与特定的密码运算。

## 多工技术的比喻

多工技术比较复杂，我们可以想像在房子里，甲与乙要讲话，丙与丁要讲话，戊与己要讲话：

- 分时多工接取 (TDMA)：甲与乙先讲一句，再换丙与丁讲一句，再换戊与己讲一句，依此类推，大家轮流 (分时) 讲话彼此就不会互相干扰。
- 分频多工接取 (FDMA)：甲与乙在客厅讲话，丙与丁在书房讲话，戊与己在卧室讲话，大家在不同的房间 (分频) 讲话彼此就不会互相干扰。
- 分码多工接取 (CDMA)：甲与乙用中文讲话，丙与丁用英文讲话，戊与己用日文讲话，这样虽然大家在同一个房子里讲话，各自仍然可以分辨出各自不同的语言，当甲与乙用中文讲话时，丙与丁的英文以及戊与己的日文只是声音干扰而已，不会造成甲与乙解读中文的困扰；同理，当丙与丁用英文讲话时，甲与乙的中文以及戊与己的日文只是声音干扰而已，不会造成丙与丁解读英文的困扰，在这个例子里“用不同的语言讲话”就好像“用不同的密码加密”一样。

## 4G 与 5G 的技术发展目的：增加频谱效率与带宽

“频谱效率”（Spectrum efficiency）是单位带宽（Hz）具有多少数据传输率（bps），可参考表 1 的说明，当单位带宽的数据传输率高，代表频谱效率高，例如：LTE 可以提供上传 2.5bps/Hz，下载 5bps/Hz；LTE-A 可以提供上传 5bps/Hz，下载 10bps/Hz，显然 LTE-A 的频谱效率比 LTE 高。因此 4G 与 5G 技术的发展只为了两个目的：

### 增加频谱效率

由于相同的频率只能使用一次，因此必须利用更新的调制与多工技术来增加频谱效率，让相同带宽的电磁波具有更高的数据传输率，也就是把更多的 0 和 1 塞进相同带宽的电磁波里来传送。

### 增加带宽

由于目前的电磁波频谱里 10GHz 以下的电磁波大部分都已经被用掉了，频谱效率再怎么提高总有技术上的极限，因此科学家只能去挖更高频还没有被使用的电磁波来给 5G 手机用，大家现在明白为什么 Samsung 的 5G 技术会想要使用频率 30GHz（相当于波长 10 毫米）的“毫米波（Millimeter Wave）”了吧！

表 1：数字通讯系统的频谱效率比较表

世代	系統名稱	多工方式	調變方式	通道頻寬	資料傳輸率 上傳/下載 (bps)	頻譜效率 上傳/下載 (bps/Hz)
2G	GSM	FDMA TDMA	GMSK	200KHz	9.6K/14.4K	0.05/0.07
2.5G	GPRS		GMSK	200KHz	9.6K/115K	0.05/0.58
2.75G	EDGE		8PSK	200KHz	384K/384K	1.92/1.92
3G	WCDMA	FDMA CDMA	QPSK	5MHz	64K/2M	0.01/0.40
3.5G	HSDPA		16QAM	5MHz	384K/14.4M	0.08/2.88
3.75G	HSUPA		QPSK	5MHz	5.76M/14.4M	1.15/2.88
4G	LTE	FDMA	64QAM	20MHz	50M/100M	2.5/5
4G	LTE-A	OFDM	64QAM	100MHz	500M/1G	5/10

注：表 1 中的频谱效率是直接以数据传输率除以通道带宽，但是不同世代的通讯系统使用不同的技术，这个并没有考虑进去，因此表中不同世代应该分开来比较才有意义。

# 解析通讯元件

我们了解到无线通讯的频谱有限，分配非常严格，相同带宽的电磁波只能使用一次，为了解决僧多粥少的难题，工程师研发出许多“调制技术”（Modulation）与“多工技术”（Multiplex），来增加频谱效率，因此才有了 3G、4G、5G 不同通讯世代技术的发明，那么在我们的手机里，是什么元件负责替我们处理这些技术的呢？

## 调制技术与多工技术

首先我们要了解“调制技术（Modulation）”与“多工技术（Multiplex）”是完全不一样的东西，让我们先来看看它们到底有什么不同？

**数字信号调制技术（ASK、FSK、PSK、QAM）：**将模拟的电磁波调制成不同的波形来代表 0 与 1 两种不同的数字信号。ASK 用振幅大小来代表 0 与 1、FSK 用频率大小来代表 0 与 1、PSK 用相位（波形）不同来代表 0 与 1、QAM 同时使用振幅大小与相位（波形）不同来代表 0 与 1。

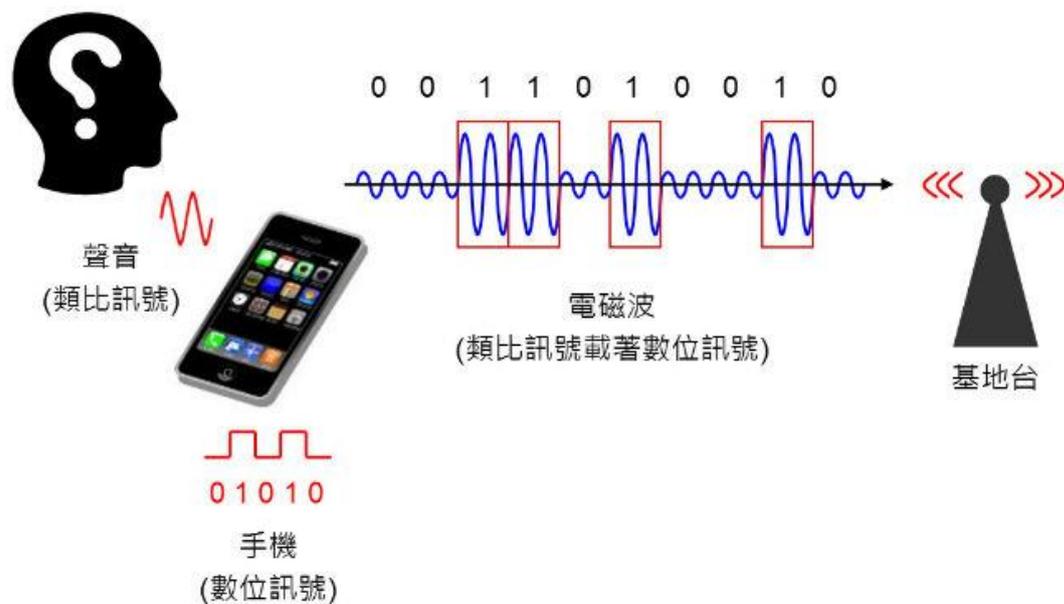
好啦，每个人的手机天线要传送出去的数字信号 0 与 1 都变成不同波形的电磁波了，问题又来了，这么多不同波形的电磁波丢到空中，该如何区分那些是你的（和你通话的），那些是我的（和我通话的）呢？

**多工技术（TDMA、FDMA、CDMA、OFDM）：**将电磁波区分给不同的使用者使用。TDMA 用时间先后来区分是你的还是我的，FDMA 用不同频率来区分是你的还是我的，CDMA 用不同密码（正交展频码）来区分是你的还是我的，OFDM 用不同正交子载波频率来区分是你的还是我的。

值得注意的是，不论数字信号调制技术或多工技术，都是在数字信号（0 与 1）进行运算与处理的时候就一起进行，一般是先进行多工技术再进行数字信号调制技术（OFDM 除外），所以多工技术与调制技术必定是同时使用。

## 数字调制技术（Digital modulation）

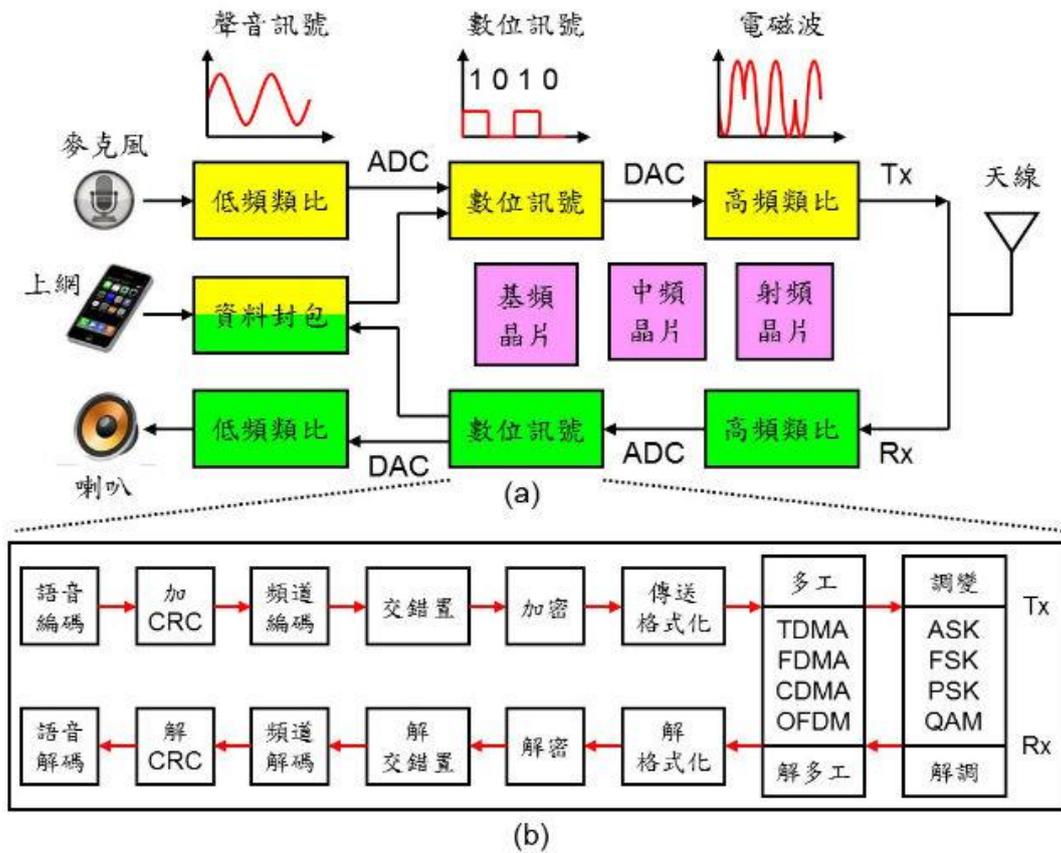
现在的手机是属于“数字通讯”，也就是我们讲话的声音（连续的模拟信号），先由手机转换成不连续的 0 与 1 两种数字信号，再经由数字调制转换成电磁波（模拟信号载着数字信号），最后从天线传送出去，原理如图一所示。



▲ 图一：数字通讯示意图。（Source: [the Noun Project](#)）

## 数字通讯系统架构

数字通讯系统的架构如图二（a）所示，使用者可能使用智能手机打电话进行语音通信或上网进行数据通信，我们分别说明如下：



▲ 图二：通讯系统架构示意图。

语音上传（讲电话）：声音由麦克风接收以后为低频模拟信号，经由低频模拟数字转换器（ADC）转换为数字信号，经由“基频芯片（BB）”进行数据压缩（Encoding）、加循环式重复检查码（CRC）、频道编码（Channel coding）、交错置（Inter-leaving）、加密（Ciphering）、格式化（Formatting），再进行多工（Multiplexing）、调制（Modulation）等数字信号处理，如图二（b）所示。

接下来经由“中频芯片（IF）”也就是高频数字模拟转换器（DAC）转换为高频模拟信号（电磁波）；最后再经由“射频芯片（RF）”形成不同时间、频率、波形的电磁波由天线传送出去。

语音下载（听电话）：天线将不同时间、频率、波形的电磁波接收进来，经由“射频芯片（RF）”处理后得到高频模拟信号（电磁波），再经由“中频芯片（IF）”也就是高频模拟数字转换器（ADC）转换为数字信号。

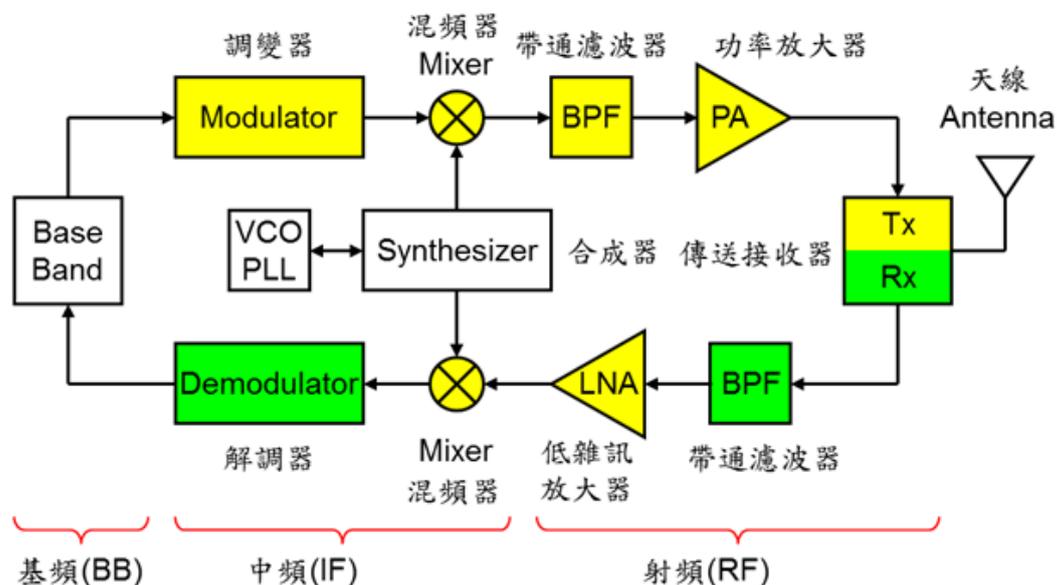
接下来经由“基频芯片（BB）”进行解调（De-modulation）、解多工（De-multiplexing）、解格式化（De-formatting）、解密（De-ciphering）、解交错置（De-inter-leaving）、频道解码（Channel decoding）、解循环式重复检查码（CRC）、数据解压缩（Decoding）等数字信号处理，最后再经由低频数字模拟转换器（DAC）转换为低频模拟信号（声音）由麦克风播放出来。

数据通信（上网）：基本上数据通信不论上传或下载都是数字信号，所以直接进入基频芯片（BB）处理即可，其他流程与语音通信类似，在此不再重复描述。

注：通讯的原理就是一大堆的数学，由于手机是我们天天都在用的东西，一般人对通讯感多感少都有些好奇想要进一步了解，但是往往走进教室第一堂课看到的就是一大堆复杂的数字：傅立叶转换（Fourier Transform）、拉普拉斯转换（Laplace Transform）、离散（Discrete），立刻就打退堂鼓，为了简化复杂度让大家容易看懂，上面对于数字通讯系统的介绍只是示意，与实际的情况会有落差，建议有兴趣进一步了解的人可以立足于上面的概念，来进一步了解技术细节。

## 无线通讯系统架构

基于前面的介绍，我们来看看智能手机里几个重要的集成电路（IC），主要包括：基频（BB）、中频（IF）、射频（RF）三个部份，如图三所示，每个部分都可能有一个到数个集成电路（IC），也有可能是把数个集成电路（IC）封装成一个，称为“系统单封装（System in a Package, SiP）”，或把数个芯片整合成一个，称为“系统单芯片（System on a Chip, SoC）”。



▲ 图三：无线通讯系统架构示意图。

**基频芯片（Baseband, BB）**：属于数字集成电路，用来进行数字信号的压缩 / 解压缩、频道编码 / 解码、交错置 / 解交错置、加密 / 解密、格式化 / 解格式化、多工 / 解多工、调制 / 解调，以及管理通讯协定、控制输入输出界面等运算工作，著名的移动电话基频芯片供应商包括：高通（Qualcomm）、博通（Broadcom）、迈威尔（Marvell）、联发科（MediaTek）等。

**调制器 (Modulator)**：将基频芯片处理的数字信号转换成高频模拟信号（电磁波），才能传送很远。

**混频器 (Mixer)**：主要负责频率转换的工作，将调制后的高频模拟信号（电磁波）转换成所需要的频率，来配合不同通讯系统的频率范围（无线频谱）使用。

**合成器 (Synthesizer)**：提供无线通讯电磁波与射频集成电路（RF IC）所需要的工作频率，通常经由“相位锁定回路（PLL: Phase Locked Loop）”与“电压控制振荡器（VCO: Voltage Controlled Oscillator）”来提供精准的工作频率。

**带通滤波器 (Band Pass Filter, BPF)**：只让特定频率范围（频带）的高频模拟信号（电磁波）通过，将不需要的频率范围滤除，得到我们需要的频率范围（频带）。

**功率放大器 (Power Amplifier, PA)**：高频模拟信号（电磁波）传送出去之前，必须先经由功率放大器（PA）放大，增强信号才能传送到够远的地方。

**传送接收器 (Transceiver)**：负责传送（Tx: Transmitter）高频模拟信号（电磁波）到天线，或是由天线接收（Rx: Receiver）高频模拟信号（电磁波）进来。

**低噪声放大器 (Low Noise Amplifier, LNA)**：接收信号时使用，天线接收进来的高频模拟信号（电磁波）很微弱，必须先经由低噪声放大器（LNA）放大信号，才能进行处理。

**解调器 (Demodulator)**：接收信号时使用，将高频模拟信号（电磁波）转换成数字信号，再传送到基频芯片（BB）进行数字信号处理工作

所以手机上传（讲电话）的原理是：先由基频芯片（BB）处理数字语音信号，再经由调制器（Modulator）转换成高频模拟信号，由混频器（Mixer）转换成所需要的频率，由带通滤波器（BPF）得到特定频率范围（频带）的高频模拟信号（电磁波），由功率放大器（PA）增强信号，最后由传送接收器（Tx）传送到天线输出。

相反的，手机下载（听电话）的原理是：先由天线传送过来高频模拟信号（电磁波），由传送接收器（Rx）接收进来，再经由带通滤波器（BPF）得到特定频率范围（频带）的高频模拟信号，由低噪声放大器（LNA）将微弱的信号放大，由混频器（Mixer）转换成所需要的频率，由解调器（Demodulator）转换成数字语音信号，最后由基频芯片（BB）处理数字语音信号。

## 通讯相关集成电路：基频、中频、射频

前面介绍的无线通讯系统后端（Back end）使用基频芯片来处理数字信号，前端（Front end）则所使用的集成电路（IC）大致上可以分为“射频芯片”与“中频芯片”两大类，分别使用不同材料的晶圆制作：

**中频芯片 (Intermediate Frequency, IF)**：又称为“模拟基频 (Analog baseband)”，概念上就是“高频数字模拟转换器 (DAC)”与“高频模拟数字转换器 (ADC)”，包括：调制器 (Modulator)、解调器 (Demodulator)，通常还有中频放大器 (IF amplifier) 与中频带通滤波器 (IF BPF) 等，通常由矽晶圆制作的 CMOS 元件组成，可能是数个集成电路，某些可能整合成一个集成电路 (IC)。

**射频芯片 (Radio Frequency, RF)**：又称为“射频集成电路 (RFIC)”，是处理高频无线信号所有芯片的总称，通常包括：传送接收器 (Transceiver)、低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA)、带通滤波器 (BPF)、合成器 (Synthesizer)、混频器 (Mixer) 等，通常由砷化镓晶圆制作的 MESFET、HEMT 元件，或矽锗晶圆制作的 BiCMOS 元件，或矽晶圆制作的 CMOS 元件组成，目前也有用氮化镓 (GaN) 制作的功率放大器，可能是数个集成电路，某些可能整合成一个集成电路 (IC)。

感谢 technews Dr. J