

第一章 概论

1.1 移动通信的发展过程及特点

随着社会的发展，人们对通信的需求越来越高。由于人类政治、经济活动范围日趋扩大及办事效率的不断提高，就要求实现通信的最高目标——在任何时候、任何地方与任何人都能及时有效地联系、交流信息。不难设想，没有移动通信就无法实现这一目标。

所谓移动通信，就是通信的一方或双方是在移动中实现通信的。也就是说至少有一方处在运动中或暂时停留在某一非预定的位置上（其中包括移动台（汽车、火车、飞机、船舰等移动体上）与固定台之间通信，移动台与移动台之间通信，移动台通过基站与有线用户通信等）。

1.1.1 移动通信的发展过程

移动通信可以说从无线电通信发明之日就产生了。1897年，M. G. 马克尼所完成的无线通信实验就是在固定站与一艘拖船之间进行的，距离为 18 海里。

现代移动通信技术的发展始于本世纪 20 年代，大致经历了五个发展阶段。

第一阶段从本世纪 20 年代到 40 年代，称之为早期发展阶段。在这期间，首先在短波的几个频段上开发出专用移动通信系统。

第二阶段从 40 年代中期到 60 年代初期。这一阶段的特点是从专用移动网向公用移动网过渡，接续方式为人工操作，网的容量较小。

第三阶段从 60 年代中期至 70 年代中期。在这期间，美国推出了改进型移动电话系统（IMTS），使用 150 MHz 和 450 MHz 频段，采用大区制、中小容量，实现了无线频道自动选择并能够自动接续到公用电话网。德国也推出了具有相同技术水平的 B 网。可以说这一阶段是移动通信系统改进与完善的阶段，其特点是采用大区制、中小容量，使用 450 MHz 频段，实现了自动选频与自动接续。

第四阶段从 70 年代中期至 80 年代中期。这是移动通信蓬勃发展的时期。1978 年底，美国贝尔试验室研制成功先进移动电话系统（AMPS），建成了蜂窝状移动通信网，大大提高了系统容量。这一阶段的特点是使蜂窝状移动通信网成为实用系统，并在世界各地迅速发展。移动通信大发展的原因，除了用户要求迅猛增加这一主要推动力之外，还有其它领域中技术更新所提供的条件。首先，微电子技术在这一时期得到了长足发展，这使得通信设备的小型化、微型化有了可能，各种轻便电台不断地推出。其次，提出并形成了移动通信新体制。随着用户数量增加，大区制所能提供的容量很快饱和，这就必须探索新体制。在这方面最重要的突破是贝尔试验室在 70 年代提出的蜂窝网的概念。蜂窝网即所谓小区制，由于实现了频率复用，大大提高了系统容量。可以说，蜂窝概念真正解决了公用移动通信系统要求容量大与频率资源有限的矛盾。第三是随着大规模集成电路的应用而出现的微处理器技术日趋成熟，以及计算机技术的迅猛

发展，从而为大型通信网的管理与控制提供了技术手段。

第五阶段从 80 年代中期以来，这是数字移动通信系统发展和成熟时期，以 AMPS 和 TACS 为代表的第一代蜂窝移动通信网是模拟系统，模拟蜂窝网虽然取得了很大成功，但也暴露了一些问题，例如 频谱利用率低 移动设备复杂 费用较贵 业务种类受限制以及通话易被窃听等，最主要的问题是容量已不能满足日益增长的移动用户的需求，解决这些问题的方法是开发新一代数字蜂窝移动通信系统，数字无线传输的频谱利用率高，可大大提高系统容量，另外 数字网能提供语音、数据多种业务服务 并与 ISDN 等兼容，到 80 年代中期，欧洲首先推出了泛欧数字移动通信网 GSM 的体系，随后，美国和日本也制定了各自的数字移动通信体制，泛欧网 GSM 已于 1991 年 7 月开始投入商用，在近几年内，数字蜂窝移动通信在我国高速发展，已有用户达 3 000 万，成为陆地公用通信的主要系统。

1.1.2 移动通信的特点

移动通信与固定点间通信相比，具有下列主要特点：

1. 移动通信的传输信道必须使用无线电波传播，在固定通信中，传输信道可以是无线电波，也可以是有线电，但移动通信中，由于至少有一方处于运动状态，显然必须使用无线电波传播。

2. 电波传播特性复杂，在移动通信系统中由于移动台不断运动，不仅有多普勒效应，而且信号的传播受地形、地物的影响也将随时发生变化，例如 受建筑物阻挡造成的阴影效应 会使信号发生慢衰落；多径传播会使信号发生快衰落，即信号幅度出现快速、深度衰落，致使接收信号场强的瞬间变化达 30 dB 以上，因此，只有充分研究移动信道的特征，才能合理设计各种移动通信系统。

3. 干扰多而复杂，移动通信系统除受天电干扰、工业干扰和各种噪声的干扰外，基站常有多部收、发信机同时工作，服务区内的移动台分布不均且位置随时在变化，故干扰信号的场强可能比有用信号高达几十分贝（如 70 dB ~ 80 dB），通常将近处无用信号压制远处有用信号的现象，称为远近效应，这是移动通信系统的一种特殊干扰，此外，还有多部电台之间发生的邻道干扰、互调干扰以及使用相同频道而产生的共频道干扰等。

4. 组网方式多样灵活，移动通信系统组网方式可分为小容量大区制和大容量小区制两大类，前者采用一个基站（或称基地台）管辖和控制所属移动台，并通过基站与公用电话网（PSTN）相连接，以进行无线用户与有线用户相互之间的通信，小区制根据服务区域，可组成线状网（如铁路、公路沿线）或面状的蜂窝网，在蜂窝网中由若干小区组成一个区群，每个小区均设基站，区群内的用户使用不同信道（在频分多址中即为使用不同的频道），移动台从一个小区驶入另一个小区时，需进行频道切换，亦称过境切换，此外，移动台从一个蜂窝网业务区驶入另一个蜂窝网业务区时，被访蜂窝网也能为外来用户提供服务，这种过程称为漫游，移动通信网为满足这些要求，必需具有很强的控制功能，如通信呼叫的建立和拆除、频道的控制和分配，用户的登记和定位，以及过境切换和漫游的控制等。

5. 对设备要求更为苛刻，一般移动通信设备都是便携式或装载于汽车、飞机等移动体中，不仅要求操作简单、维修方便，而且要保证在振动、冲击、高低温等恶劣环境下工作，此外，还要求设备体积小、重量轻和省电等。

6. 用户量大而频率有限，我国现有 A、B、C、D、E 和 F 六个频段总共约 5 000 个频点，远远满足不了通信业务增长的需要，为了解决这一矛盾，除了开辟新的频段之外，研究各种有效利用

频率技术和新的体制是移动通信面临的重要课题。

1.2 移动通信基本技术

随着移动用户数猛增,为满足新的通信业务、通信功能和通信质量要求,多址技术、调制技术、语音编码、信道编码、分集接收等移动通信新技术日新月异,层出不穷,推动着移动通信迅猛发展。

1.2.1 多址技术

在蜂窝移动通信系统中,有许多用户台要同时通过一个基站和它的用户台进行通信,因而必须对不同用户台和基站发出的信号赋予不同的特征,使基站能从众多的用户台的信号中区分出哪一个用户台发出来的信号,而各用户台又能识别出基站发出的信号中哪个是发给自己的信号,解决这个问题的办法称为多址技术。

有差别才能进行鉴别,能鉴别才能进行选择,多址技术的基础是信号特征上的差异。一般来说,信号的这种差异可以表现在某些参数上,例如信号的工作频率、信号的出现时间以及信号具有的特定波形等,其要求是各信号的特征彼此独立,或者说正交,或者说任意两个波形之间的相关函数等于 0 或接近于 0。

多址技术的基本类型有频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)和码分多址(CDMA)。实际中也常用到其它一些多址方式,其中也包括这三种基本多址方式的混合多址方式,比如,时分多址/频分多址(TDMA/FDMA)、码分多址/频分多址(CDMA/FDMA)和时分多址/码分多址(TDMA/CDMA)等等。

选择什么样的多址方式取决于通信系统的应用环境和要求。就数字蜂窝移动通信网络而言,由于用户数和通信业务量急增,一个突出的问题是在频率资源有限的情况下,如何提高通信系统的容量。因为多址方式直接影响到蜂窝通信系统的容量,因而采用什么样的多址方式,更有利于提高这种通信系统的容量,一直是人们非常关心的问题,也是当前研究和开发移动通信的热门课题。

一、频分多址(FDMA)

频分多址是把通信系统的总频段分成若干个等间隔的频道(或称信道)分配给不同的用户使用。这些频道互不交叠,其宽度应能传输一路数字语音信息,而在相邻频道之间无明显的串扰。图 1-1 是这种频道划分的示意图。图中,在高低两个频段之间留有一段保护频带,其作用是防止同一部电台的发射机对接收机产生干扰。具体的作法是:如果基站的发射机在高频段的某一频道中工作时,其接收机必须在低频段的某一频道中工作;与此对应,移动台的接收机要在高频段相应的频道中接收来自基站的信号,而其发射机要在低频段的相应的频道中发射送往基站的信号。图 1-2 是 FDMA 通信系统的工作示意图。由图可知,这种通信系统的基站必须同时发射和接收多个不同频率的信号;任意两个移动用户之间进行通信都必须经过基站的中转,因而必须同时占用 4 个频道才能实现双工通信。不过,移动台在通信时所占用的频道并不是固定指配的,它通常是在通信建立阶段由系统控制中心临时分配的,通信结束后,移动台将退出它占用的频道,这些频道又可以重新分给别的用户使用。

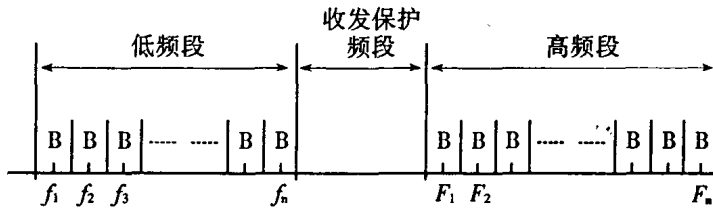


图 1-1 频分多址的频道划分

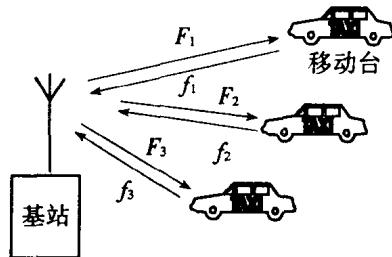


图 1-2 FDMA 系统的工作示意图

在数字通信系统中采用 FDMA 制式的优点是技术比较成熟和易于与现实模拟系统兼容，缺点是系统中同时存在多个频率的信号容易形成互调干扰，尤其是基站因为要集中发送多个频率的信号这种互调干扰更容易产生。

二、时分多址 (TDMA)

(一) 时分多址的原理

时分多址是把时间分割成周期性的帧，每一帧再分割成若干个时隙（无论帧或时隙都是互不重叠的），然后根据一定的时隙分配原则，使各个移动台在每帧内只能按指定的时隙向基站发送信号，在满足定时和同步的条件下，基站可以分别在各个时隙中接收到各个移动台的信号而不混扰。同时，基站发向多个移动台的信号都按顺序安排在预定的时隙中传输，各移动台只要在指定的时隙内接收，就能在合路的信号中把发给它的信号区分出来。图 1-3 是 TDMA 通信系统的工作示意图其中 (a) 是基站向移动台传输，常称正向传输或下行传输，(b) 是移动台向基站传输，常称反向传输或上行传输。

TDMA 通信系统和 FDMA 通信系统相比具有以下主要特点：

1. TDMA 系统的基站只用一部发射机，可以避免像 FDMA 系统那样因多部不同频率的发射机同时工作而产生的互调干扰。
2. TDMA 系统不存在频率分配问题，对时隙的管理和分配通常要比对频率的管理与分配简单而经济。因此，TDMA 系统更容易进行时隙的动态分配。如果采用话音检测技术，实现有话音时分配时隙，无话音时不分配时隙，还有利于提高系统容量。
3. 因为移动台只在指定的时隙中接收基站发给它的信息，因而在一帧的其它时隙中，可以测量其它基站发送的信号强度，或检测网络系统发送的广播信息和控制信息，这对于加强通信网络的控制功能和保证移动台的越区切换都是有利的。
4. TDMA 系统必须有精确的定时和同步，保证各移动台发送的信号不会在基站发生重叠或混淆，并且能够准确地指定的时隙中接收基站发给它的信号。同步技术是 TDMA 系统正常工作的重要保证，往往也是比较复杂的技术问题。

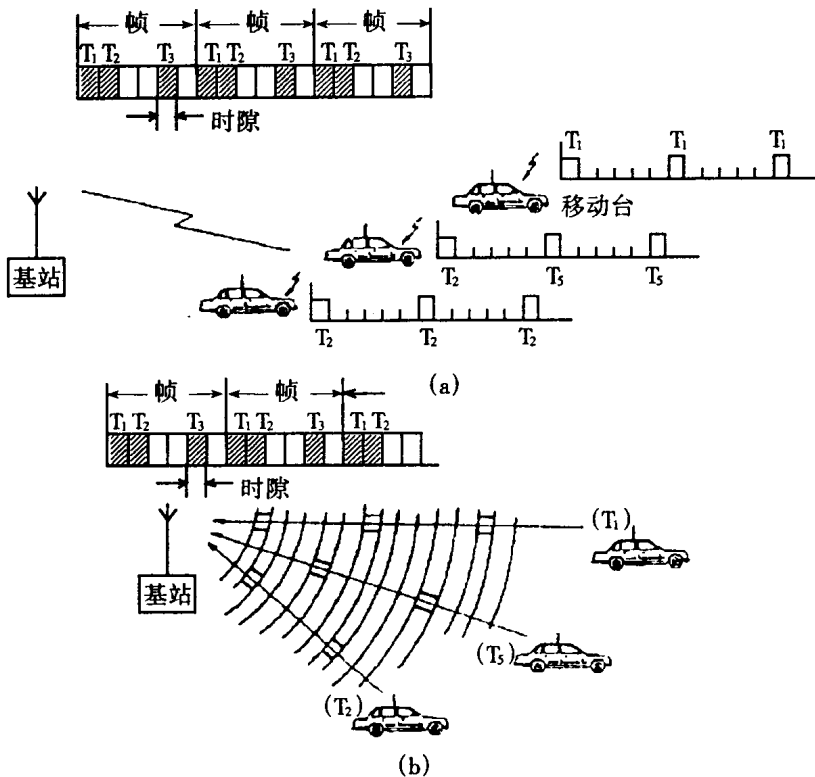


图 1-3 TDMA 通信系统的工作示意图

(二) 时分多址通信系统的帧和时隙

不同通信系统的帧长度和帧结构通常是不一样的。TDMA 蜂窝式通信网络所用的时帧长度一般在几 ms 到几十 ms 的范围内。时帧结构和通信系统的双工方式有关。移动通信的双工方式有频分双工 (FDD) 和时分双工 (TDD) 之分。所谓频分双工是基站 (或移动台) 的收发设备要在两个不同的频率上工作，而且这两个频率之间要有足够的保护间隔。如果基站在高频率发射和在低频率接收，则移动台必须在低频率发射和在高频率接收。

所谓时分双工是基站或移动台的收发设备均在同一频率上工作，因而同一部电台的发射机和接收机只能用轮流工作的办法，才能实现双工通信。

不同系统所采用的时隙结构可能有很大差异，即使在同一系统中，不同传输方向 (正向与反向) 上的时隙结构也可能不尽相同。实际上，不可能规定一种通用的格式来适应各种系统的需要。

在移动通信中，信号的传播存在着随机时延。因为移动台的位置在通信网内是随机分布的，也是经常变化的，所以移动台和基站之间的距离是一个随机变量，通信距离的不同，使得信号的传播时延也不同。因而，即使移动台与基站的时钟都非常精确，信号到达对方接收机时也不可能完全准确地落入对方的时隙。为了防止不同时隙的信号因为时延差不同而在相邻时隙发生交叠，通常在时隙末尾或开头设置一定的保护时间。此保护时间对移动台向基地台传输信息的时隙来说是不可缺少的。保护时间的大小可以根据最大通信距离估算出来。在保护时间内不发送信息。

在移动台进行数据传输时，如果信息的传输速率高到一定程度，则因为多径传播引起的码间干扰会明显地使系统的误比特率增大。在这种情况下，接收机通常采用自适应均衡技术，以

减少这种码间干扰的影响。所以，有些通信系统常常在各个时隙中包含自适应均衡所需要的训练序列。

图 1-4 是一种时隙结构的示意图；该图只说明了时隙结构的基本形式，并没有考虑不同系统在不同使用场合下的特殊要求。

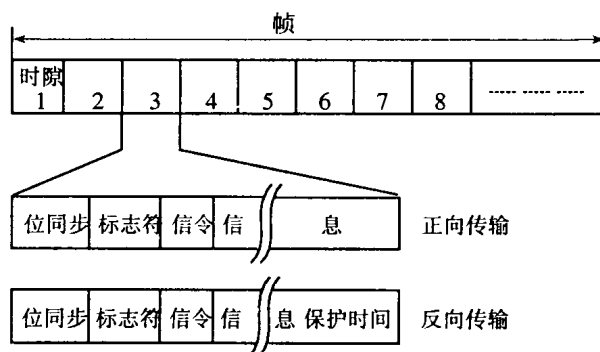


图 1-4 TDMA 系统的时隙结构示意图

(三) 时分多址通信系统的同步和定时

同步和定时是 TDMA 移动通信系统正常工作的前提。因为通信双方只允许在规定的时隙中发送信号和接收信号，所以必须在严格的帧同步、时隙同步和比特（位）同步的条件下进行工作，如果通信设备采用相干检测，则接收机还必须获得载波同步。

1. 位同步是接收机正确解调的基础。在移动通信系统中，用于传输位同步信息的方法有两种：一种是用专门的信道传输；另一种是插入业务信道中传输，比如在每一个时隙的前面发送一段“0”、“1”交替的信号作为位同步信息。此外，在有些通信系统中，位同步信息是从其数字信号中提取的，用这种办法可以不再发送专门的位同步信息，但考虑到 TDMA 通信系统是按时隙以猝发方式传输信号的，为了迅速、准确而可靠地获得位同步信息，不宜采用这种方法。由于信号在移动环境中传输时，经常受到干扰、噪声和多径衰落的损伤，那么，接收机在提取同步信息时，必须采取措施减少由于干扰、噪声、衰落或误码引起的相位抖动，同时还要通过保护电路进行保护，防止因为偶然的原因使接收机失步，引起通信中断。

2. 帧同步和时隙同步所采用的方法一样，如果需要，可以在每帧和每时隙的前面分别设置一个同步码作为同步信息。同步码的选择是在帧长度确定后，根据信道条件和对同步的要求而确定的。对帧同步和时隙同步的要求是建立在时间短、错误捕获概率小、同步保持时间长和失步概率小。

从提高传输效率出发，希望同步码短些，从同步的可靠性和抗干扰能力考虑，希望同步码长些。对同步码的码型选择，应使之具有良好的相关性，不易被信息流中的随机比特所混淆而出现假同步。

三、码分多址 (CDMA)

在 80 年代初，当模拟蜂窝系统问世不久，人们就开始研究和开发数字蜂窝通信系统。数字蜂窝通信系统采用什么样的多址方式，一直是人们非常关注的问题。从原理上讲，无论频分多址、时分多址或码分多址所能提供的系统容量都是一样的。但是，结合具体的应用条件和工作环境，能得到的通信容量就不同了，甚至有一定的差异。码分多址并非新近提出的概念，卫星通

信已成功地应用了这种多址方式.而如何把 CDMA 应用到蜂窝通信网络,以及会不会获得比其它多址方式更高的通信容量,则是近年来人们非常关心的问题,也是有争议的问题.

(一) 码分多址的原理

在 CDMA 通信系统中,不同用户传输信息所用的信号不是靠频率不同或时隙不同来区分,而是用各自不同的编码序列来区分,或者说,靠信号的不同波形来区分.如果从频率或时隙来观察,多个 CDMA 信号是互相重叠的,接收机用相关器可以在多个 CDMA 信号中选出其中使用预定码型的信号.其它使用不同码型的信号因为和接收机本地产生的码型不同而不能被解调.它们的存在类似于在信道中引入了噪声或干扰,通常称之为多址干扰.

在 CDMA 蜂窝通信系统中,用户之间的信息传输也是由基站进行转发和控制的.为了实现双工通信,正向传输和反向传输各使用一个频率,即通常所谓的频分双工.无论正向或反向传输除去传输业务信息外,还必须传送相应的控制信息.为了传送不同的信息,需要设置相应的信道.但是,CDMA 通信系统既不分频道又不分时隙,无论传送何种信息的信道都是靠采用不同的码型来区分.类似的信道属于逻辑信道.这些逻辑信道无论从频域或时域来看都是互相重叠的,或者说它们均占用相同的频段和时间.逻辑信道分为正向传输的逻辑信道和反向传输的逻辑信道.有关 CDMA 系统的详细情况请参见第五章.

1.2.2 调制技术

调制技术的选择直接影响数字移动通信系统的质量和容量.就本质而言,数字调制技术就是对基带信号加以适当的处理,使其适合在信道上传输.

数字调制技术是移动通信系统的关键技术,需具有下列性能:

1.窄的已调信号占有频带.移动通信系统是一种多波道运行系统,已调信号功率谱带外辐射对邻波道产生干扰,导致信息传输质量下降.为了保证传输质量,必须使信噪比大于 20 dB;考虑到在移动台运动时的衰落深度可达 40 dB ~ 60 dB,所以要求已调信号在邻道的辐射干扰实际低于有用信号 60 dB ~ 80 dB.

2.高的频谱效率.目前在 VHF 和 UHF(150 MHz ~ 900 MHz)频段的移动通信系统中,话音信号大多采用 SCPC 方式的 FM 传输,载频间距为 25 kHz.如果采用 16 kbit/s 语音速率,在同样的波道间隔建立带宽有效的数字信道,那么数字调制技术的实际频谱效率必须优于 1 bit/s/Hz.

3.好的误码性能.移动通信环境存在衰落、干扰和噪声,数字移动通信系统比模拟系统有更强的抗干扰能力,有利于缩短信道再用距离,提高信道利用率,降低发射功率,简化设计技术要求.

4.能接受差分检测.由于移动通信系统接收信号的衰落和时变特性,相干解调性能明显变劣,而差分检测不需载波恢复,能实现快速同步,获得好的误码性能,因而差分解调的数字调制方案被越来越多地应用于数字移动通信系统中.

5.在非线性信道性能劣化小,电源效率高.为了降低功耗,移动通信的发信机通常都采用丙类功放,所以要求通过非线性时不产生失真.

6.调制解调设备简单.以上几个方面均达到是不可能的,何况它们彼此之间也有矛盾.所以我们在评价一种调制方案时,应根据实际应用情况,对各方面折衷考虑,做到有主次之分.

在第二代数字移动通信系统中,泛欧 GSM 采用 GMSK 调制方式,它在非线性信道具有较好的性能,电路技术成熟,并已有与之相应的数字语音编码、信道编码和调制解调等集成电路;

美、日等国采用 $\frac{\pi}{4}$ -QPSK 其频谱效率高 要求高效的线性功率放大器。我国移动通信发展遵循 TACS 灼式，其载频间隔为 25 kHz， $\frac{\pi}{4}$ -QPSK 的选用为在 25 kHz 间隔传输 37 kbit/s ~ 42 kbit/s 的数字信息提供了可能。

近年来，移动通信的发展十分迅速，用户数目急剧增加，传统通信系统的容量已经越来越不能满足通信要求了。由于频谱资源有限，不可能靠无限增加频道数来解决问题。随着多种技术的采用以及优化，调制技术也有了很大的发展，下面将介绍三种对于第三代移动通信系统已初步显示出其优越性的高效调制方案。

一、可变速率调制

陆地移动通信中无线信号受到多径效应的作用会产生严重的幅度衰落和时延扩展，造成误比特率性能恶化。克服幅度衰落的一种措施是增加发射功率，加大幅度余量。但在蜂窝系统中发射功率是严格受限的，否则会增加同频道干扰，降低系统容量。另一种方法是降低无线信道中的比特传输速率，使得在判决电路中增加观察时间，提高判决准确程度。从另一个角度看，为克服时延扩展造成的码间串扰，降低传输速率也会带来好处。但是，降低了传输速率也就降低了频谱资源的利用率，这在频率资源日益紧张的移动通信中是不能接受的。一种较理想的方法是根据移动信道随机变化的情况自适应地改变无线传输速率：信道条件好时，用较高速率；信道条件差时，降低传输速率。这就是所谓可变速率调制。研究证明，这种调制方法可以在频谱效率和系统误码性能两方面都达到令人满意的程度。

实际上，可变速率调制是一种和基本调制方式相结合的传输控制方法。可以采用不同的判断信道条件好坏的准则和不同的改变速率的方案，发展成各种可变速率的调制方法。可变速率调制实质上是一种自适应调制技术。自适应调制技术是在无线多媒体接入系统中提出来的，在给定数据传输质量的情况下，它根据业务量、平均信干比、平均时延、断话概率和数据速率等来决定采用的调制方式，包括 QPSK、16QAM 或 64QAM 分集技术。

二、多载波调制——MCM

为了支持高比特率的传输，消除或减少移动信道中延时扩散的影响，人们提出了许多方案，其中多载波调制是一种性能优异、适用于未来移动通信系统的技术。

多载波调制——MCM(Multi-Carrier Modulation) 是一种适用于带限信号传输的调制技术，能最大限度提高信道容量，有效克服脉冲干扰和窄带干扰，很好地抗多径衰落和延时性能。它的思想可以源于 50~60 年代，当时人们提出了在相互间隔一个码元速率的多个载波上进行并行的交错 QAM 调制来传输信号。但由于受条件限制，产生并行、稳定的并行多路载波，并在接收端很好地恢复它比较困难，使得该技术一度难以实用。随着通信技术和数字信号处理技术的发展，采用 FFT 使实现 MCM 成为可能，MCM 技术才又重新被人们重视，并得到广泛地应用。在很多重要技术中，如高速信息公路的用户接入、Internet 网用户接入、无线接入、多用户 CDMA 检测等扮演着重要的角色。

多载波调制的基本原理是将所要传输的数据流分解成若干个比特流，每个子数据流具有低得多的传输比特速率，并且用这些数据流去并行调制多个载波。由于各载波之间的相互正交性，完全消除了彼此之间的串扰，同时可以在接收端利用相同的正交载波组来恢复原始信号。N 个相互正交的载波构成 MCM 系统。

三、网格编码调制——TCM

高效率的数字移动通信系统的实现依靠两方面的努力：一是完成低速率的语音编码；二是完成频谱利用率大于 2 bit/s/Hz 的窄带调制技术。

纠错编码是现代数字通信中常用的抗干扰措施，它的缺陷是纠错编码的冗余度使得信息传输速率降低，传统的数字传输系统其调制和纠错编码是独立设计与实现的，在接收端的解调也是如此。这样的系统是很难提高通信的有效性的。

从信号设计的观点来看，将调制与编码技术结合起来考虑是设计一个高效数字通信系统的最佳途径。1974年 Massey 根据 Shannon 信息理论最早证明了：若编码与调制作为一整体设计可大大提高系统性能。Ungerboeck 在 1982 年发表了具体的研究结果。采用速率为 $\frac{m}{m+1}$ 的卷积码编码器结合调制技术，在相同带宽和速率下可获得 $3 \text{ dB} \sim 6 \text{ dB}$ 的编码增益。由于卷积码和调制信号可以看成是网格码形式，故将这一方式称为格码调制 (Trellis Coded Modulation) 简称为 TCM。

格形编码调制在编码领域的贡献不仅在于其编码技术本身，而且还在于它给人们提供了一种可以通过系统内部的组合优化提高系统总体性能的新思路。

1.2.3 分集接收技术

衰落是影响通信质量的主要因素。快衰落深度可达 $30 \text{ dB} \sim 40 \text{ dB}$ 。如果想利用加大发射功率 (1000 倍 ~ 10000 倍) 来克服这种深度衰落是不现实的，而且会造成对其它电台的干扰。分集接收是抗衰落的一种有效措施，它已广泛应用于包括移动通信、短波通信等随参信道中。

一、什么是分集接收

所谓分集接收是指接收端对它收到的多个衰落特性互相独立 (携带同一信息) 的信号进行特定的处理，以降低信号电平起伏的办法。为说明问题，图 1-5 给出了一种利用“选择式”合并法进行分集的示意图。图中 A 与 B 代表两个同来源的独立衰落信号。如果在任意时刻，接收机选用其中幅度大的一个信号，则可得到合成信号如图中 C 所示。由于在任一瞬间，两个非相关的衰落信号同时处于深度衰落的概率是极小的，因此合成信号 C 的衰落程度会明显减小。不过，这里所说的“非相关”条件是不可少的。倘若两个衰落信号同步地起伏，那么这种分集方法就不会有任何效果。

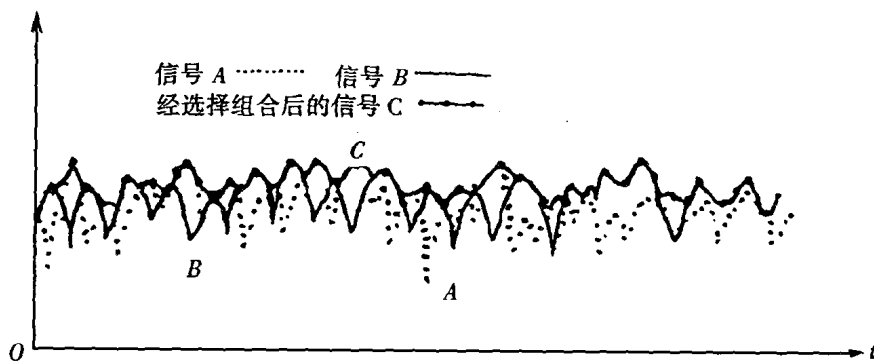


图 1-5 选择式分集合并示意图

(一) 分集方式

在移动通信系统中可能用到两类分集方式：一类称为“宏分集”另一类称为“微分集”。“宏分集”主要用于蜂窝通信系统中，也称为“多基站”分集。这是一种减小慢衰落影响的分集技术，其作法是把多个基站设置在不同的地理位置上（如蜂窝小区的对角上）和在不同方向上，同时和小区内的一个移动台进行通信（可以选用其中信号最好的一个基站进行通信），显然只要在各个方向上的信号传播不是同时受到阴影效应或地形的影响而出现严重的慢衰落（基站天线的架设可以防止这种情况发生），这种办法就能保持通信不会中断。

“微分集”是一种减小快衰落影响的分集技术，在各种通信系统中都经常使用。理论和实践都表明在空间、频率、极化、场分量、角度及时间等方面分离的无线信号都呈现互相独立的衰落特性。据此，微分集又可分为下列六种：

1. 空间分集。空间分集的依据在于快衰落的空间独立性，即在任意两个不同的位置上接通一个信号，只要两个位置的距离大到一定程度，则两处所收到的信号的衰落特性是不相关的。为此，空间分集接收机至少需要两付相隔为 d 的天线。间隔距离 d 与工作波长、地物及天线高度有关。在移动信道中，通常取：

$$\begin{aligned} \text{市区} \quad d &= 0.5\lambda; \\ \text{郊区} \quad d &= 0.8\lambda. \end{aligned}$$

在满足上式的条件下，两信号的衰落相关性已很弱， d 越大，相关性就越弱。

由上式可知，在 900 MHz 的频段工作时，两付天线的间隔也只需 0.27 m。在小汽车的顶部安装这样两付天线并不困难，因此空间分集不仅适用于基站，也可用于移动台。

2. 频率分集。由于频率间隔大于相关带宽的两个信号所遭受的衰落可以认为是不相关的，因此可以用两个以上不同的频率传输同一信息，以实现频率分集。根据相关带宽的定义，即

$$B_c = \frac{1}{2\pi\Delta}.$$

式中 Δ 为时延扩展。例如，市区中 $\Delta = 3 \mu\text{s}$ ， B_c 约为 53 kHz。这样频率分集需要用两部发射机（频率相隔 53 kHz 以上）同时发送同一信号，并用两部独立接收机来接收信号。它不仅使得设备复杂，而且在频谱利用方面也很不经济。

3. 极化分集。由于两个不同极化的电磁波具有独立的衰落特性，所以发送端和接收端可以用两个位置很近但为不同极化的天线分别发送和接收信号，以获得分集效果。

极化分集可以看成是空间分集的特殊情况（它也要用两付天线，二重分集情况），但仅仅是利用不同极化的电磁波所具有的不同相关衰落特性，因而缩短了天线间的距离。

在极化分集中，由于射频功率分给两个不同的极化天线，因此发射功率要损失 3 dB。

4. 角度分集。角度分集的作法是使电磁波通过两个不同路径，并以角度到达接收端，而接收端利用多个锐方向性接收天线能分离出不同方向来的信号分量，由于这些分量具有互相独立的衰落特性，因而可以实现角度分集并获得抗衰落的效果。显然，角度分集在较高频率时容易实现。

5. 时间分集。快衰落除了具有空间和频率独立性之外，还具有时间独立性，即同一信号在不同的时间、区间多次重发。如果各次发送的时间间隔足够大，那么各次发送信号所出现的衰落将是彼此独立的；如果接收机将重复收到的信号进行合并，就能减少衰落的影响。时间分集主要用于在衰落信道中传输数字信号。此外，时间分集也有利于克服移动信道中由于多普勒效

应引起的衰落现象. 由于它的衰落速率与移动台的运动速度和工作波长有关, 为了使重复传输的数字信号具有独立的特性, 必须保证数字信号的重发时间间隔满足以下关系:

$$\Delta T \geq \frac{1}{2f_m} = \frac{1}{2(v/\lambda)}$$

式中 f_m 为衰落频率, v 为车速, λ 为工作波长. 例如 移动体速度 $v = 30 \text{ km/h}$ 和工作频率为 450 MHz 可算得 $\Delta T \geq 40 \text{ ms}$.

若移动台处于静止状态, 即 $v = 0$ 由上式可知 要求 ΔT 为无穷大 表明此时时间分集的得益将丧失. 换句话说, 时间分集对静止状态的移动台无助于减小这种衰落.

(二) 合并方式

接收端收到 $M (M \geq 2)$ 个分集信号后 如何利用这些信号以减小衰落的影响 这就是合并问题. 一般均使用线性合并器 把输入的 M 个独立衰落信号相加后合并输出. 假设 M 个输入信号电压为 $r_1(t), r_2(t), \dots, r_M(t)$ 则合并器输出电压 $r(t)$ 为

$$r(t) = \alpha_1 r_1(t) + \alpha_2 r_2(t) + \dots + \alpha_M r_M(t) = \sum_{k=1}^M \alpha_k r_k(t)$$

式中 α_k 为第 k 个信号的加权系数. 选择不同的加权系数, 就可构成不同的合并方式, 常用的有以下两种方式:

1. 选择式合并. 选择式合并是检测所有分集支路的信号, 以选择其中信噪比最高的一支路的信号作为合并器的输出. 由上式可见 在选择式合并器中 加权系数只有一项为 1 其余均为 0.

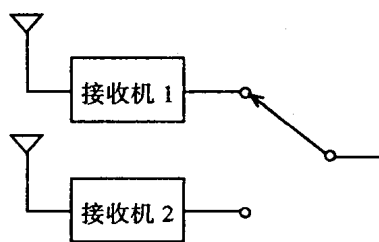


图 1-6 二重分集选择式合并

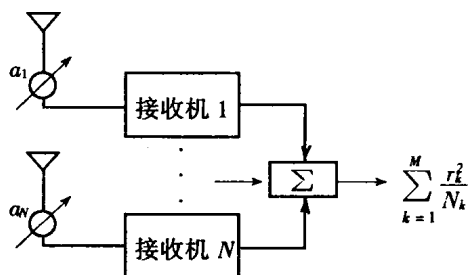


图 1-7 最大比值合并方式

图 1-6 为二重分集选择式合并的示意图. 两个支路的中频信号分别经过解调, 然后作信噪比比较, 选择其中有较高信噪比的支路接到接收机的共用部分.

选择式合并又称开关式相加. 这种方式方法简单, 容易实现. 但由于未被选择的支路信号弃之不用, 因此抗衰落不如后述方式.

需要指出的是, 如果在中频或高频实现合并, 就必须保证各支路的信号同相, 这常常会导致电路的复杂度增加.

2. 最大比值合并. 最大比值合并是一种最佳合并方式, 其方框图如图 1-7 所示. 为了书写简便 每一支路信号包络 $r_k(t)$ 用 r_k 表示. 每一支路的加权系数 α_k 与信号包络 r_k 成正比而与噪声功率 N_k 成反比 即 $\alpha_k = \frac{r_k}{N_k}$.

由此可得最大比值合并器输出的信号包络为 $r_R = \sum_{k=1}^M \alpha_k r_k = \sum_{k=1}^M \frac{r_k^2}{N_k}$.

式中, 下标 k 是表征最大比值合并方式.

1.3 移动通信的发展方向

移动通信发展极其迅速，其发展趋势可概括如下：频段——由短波、超短波到微波 频道间隔——由 100 kHz、50 kHz 到 25 kHz、12.5 kHz 甚至 5 kHz 调制方式——由调幅到调频、振幅压扩单边带 通信方式——由同频单工到异频双工及多频道共用；传输方式——由模拟经模数兼用到全数字化 器件——由电子管经晶体管到大规模集成电路与微处理器；业务——由通话为主将增加低速传真、静止图像、低速数据直到综合业务；需要量——由交通工具数 1‰~1% 逐步增加到 5%~20% 规模——由单机到系统，由点对点通信到网络通信；网络形式——由专用网到公众网，由大区制到蜂窝式小区制；覆盖面积——由局部地区，大中城市到大部分地区、全国甚至跨国；通信领域——由陆地、水面到空中至陆海空一体化；通信容量——由小于 200 用户的小容量到几千用户的中容量及几万用户的大容量。

目前从世界各地发展的趋势来看 移动通信正朝着综合化、集群化、数字化、微型化和标准化方向发展。

综合网 从公众移动通信角度出发，一方面是将汽车电话、火车电话、船舶电话、航空电话，即将陆海空联网成一个全国甚至跨国的综合移动通信系统；另一方面是除电话业务外还扩展数据、传真、图像等各种非电话业务 最终成为综合业务数字网 (ISDN) 的组成部分。

集群化：对专用移动通信而言，当前各部门自建基地台的小容量专用系统无论是频谱还是资金都是较浪费的，发展趋势是共建大容量覆盖整个地区的中继调度系统，做到频率共用、交换控制统一，各部门只需建立简单的指令台。

数字化：随着微电子技术的迅速提高，为移动通信数字化提供了有利条件，只有数字化才可能实现电话与非电话业务的综合化。当前无线电寻呼以及公众移动电话系统中的选呼控制信令多已采用数字技术。移动电话的数字化无疑将是发展方向。

微型化：随着集成电路的迅速发展已经展示了这种可能，即人们梦寐以求的随时随地都可以与世界各地进行通信的目标，不久的将来会成为现实。而且，移动电话体积将小于 100 立方厘米，可方便地装入上衣口袋。

标准化：由于通信的实质就是人类社会按照公认的协定传递信息，标准化问题便显得特别重要，没有技术体制的标准化便无法组成国际统一的通信网，没有设备性能的标准化也不能进行大规模生产和普遍应用。

以下技术代表了移动通信的研究动向：

1. 有效地利用频谱

在移动通信中，必须采用的通信媒介是无线电波。为适应移动通信需求量不断增加，所使用的频段从 150 MHz、450 MHz、900 MHz 到 2 000 MHz，其中能用于陆地移动通信的频带更是有限的。为此在技术上采取措施以有效地利用频谱 这些措施包括：

(1) 频段扩展技术：在陆地移动通信中研究开发 1 GHz~3 GHz 频段，已日益引人注目；

(2) 窄带模拟传输技术：利用超窄带调频把频道间隔从 25 kHz 缩窄到 12.5 kHz。其中必须解决高稳定度的晶体振荡器和高性能滤波器等关键部件，同时还要研究降低邻道干扰技术和克服由于频偏减小而带来的解调增益的下降。

单边带通信已用于衰落速度比较缓慢的短波海上移动通信。单边带 (SSB) 占用频带窄的特点也适用于 VHF/UHF 频段。目前在 VHF 中把频道间隔缩窄到 5 kHz 技术已经成熟 但在陆地

移动通信应用中必须研究解决快衰落的影响问题；

(3) 采用小区方式从空间上提高频率使用效率：这是提高频率使用效率最有效的一种办法，也正是小区制蜂窝网从出现以来发展得如此迅速的根本原因。它可根据移动通信业务量和用户多少，分成大小不同的蜂窝，把许多蜂窝群拼凑在一起，覆盖任意的区域。各蜂窝群的频道可重复使用而不形成严重干扰。所以从原理上讲，在有限频道条件下，蜂窝网可以覆盖任意大的区域，容纳任意多的用户；

(4) 多址共用若干频道，从时间上提高频率使用效率：众多用户共用若干频道，其中任一用户均可在共用频道中选用一空闲频道，以建立通信联络。显然它比一个用户固定分配一个（或一对）频道的办法，频率利用率要高得多，且呼损率较小。

2. 电波传播的研究

移动通信受到最苛刻的制约要算电波传播。由于移动台不断运动，导致接收信号的幅度和相位随时间、地点而不断变化。又受到各种地形、地物的影响，特别是多径传播造成的瑞利衰落致使接收信号极不稳定。目前对 VHF、UHF 传播特性研究，已取得了一定成果。例如著名的奥村曲线可以估算电场强度，但这些实验曲线只能作估算参考，实际情况下往往需作实地测试。另外，人们还在研究利用计算机，将传播路径特性输入数据库，进行模拟计算，以便为移动通信网的工程设计提供依据。

3. 移动通信数字化

数字通信是发展方向已为大家所公认。与模拟通信相比它更能适应对通信越来越高的要求。但是，数字通信一系列优点是用比模拟通信占据更宽的频带而获得的。为了实现移动通信数字化，国内外十分重视窄带数字调制技术。适合于 25 kHz 频道间隔传输数字电话的调制制式主要有最小频移键控 (MSK) 或高斯型最小频移键控 (GMSK)、 $\pi/4$ 四相移相键控 $\pi/4$ -QPSK 等。它们的共同特点是已调信号的包络恒定，抗衰落能力强，信号占据频带窄，带外衰减快，能满足 25 kHz 频道间隔的要求。

4. 抗干扰、抗衰落技术

移动通信中干扰很多，主要是：(1) 外界噪声，如城市中人为噪声、自然噪声（太阳噪声、大气噪声和银河噪声）这些噪声随频率上升而减弱。当频率接近 1 GHz 时，主要噪声是接收机内部噪声了；(2) 相互干扰：例如互调干扰、邻道干扰以及频率再用时的共道干扰等。

克服信号衰落的有效措施是分集接收技术，在移动通信中应用的分集包括空间、极化等。为减小多径衰落，还开展了自适应天线、自适应均衡、扩频技术等研究。

习题

- 1-1 什么叫移动通信？移动通信有何特点？
- 1-2 什么叫多址技术？主要有那几种多址方式？
- 1-3 试述移动通信的发展过程与发展方向。

第二章 移动通信的传输信道

信道是通信系统内连接收发两终端的传输通道，是通信系统的重要组成部分。按传输媒介的不同，信道可分为有线信道和无线信道。有线信道有架空明线、电缆及光纤等；无线信道以电波传播方式分有中、长地表面波传播、短波电离层反射传播、超短波和微波直射传播以及各种反射传播。按信道特性参数随外界各种因素的影响而变化的快慢，通常分为恒参信道和变参信道两类。所谓恒参信道是指其传输特性的变化量极微且变化速度极慢，或者说在相当长的时间内，其参数基本不变；变参信道则与之相反，其传输特性随时间的变化较快，且变化量较大。

移动通信的传输信道属于无线信道，且为典型的变参信道。本章在阐述移动通信的电波传播特性的基础上，着重讨论陆地移动信道的电波传播损耗和衰落，最后一节将介绍噪声与干扰对信号传播的影响以及克服其影响所采取的方法或措施等。

2.1 移动通信的电波传播特性

2.1.1 电波传播方式

现代移动通信广泛使用 150 MHz、450 MHz、900 MHz 等 VHF、UHF 频段，目前正在开发利用的还有 800 MHz、1 800 MHz 和 2 000 MHz 等。

移动通信的电波传播方式如图 2-1 所示，主要有直射波、反射波、地表面波等。在电波传播过程中损耗将不可避免。由于地表面波的损耗随频率的升高而急剧增大，传播距离迅速减小，因此在 VHF 和 UHF 频段地表面波的传播可以忽略不计。除此之外，在移动信道中，电波还会遇到各种障碍物而发生反射和散射现象，它对直射波会引起干涉，即产生多径衰落现象。

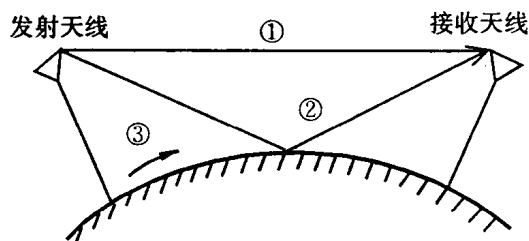


图 2-1 典型的传播通路

下面先讨论直射波和反射波的传播特性。

2.1.2 直射波

一、自由空间的电波传播

所谓自由空间是指相对介电常数 ϵ_r 和相对导磁率 μ_r 为 1 的理想均匀介质空间,电波在自由空间里传播不受阻挡,不产生折射、绕射、反射、散射和吸收,但是当电波经过一段路径传播之后,能量仍会受到衰减,这是由于辐射能量的扩散而引起的。

自由空间传播损耗定义为发射天线辐射功率与接收天线接收功率的比值,即

$$L_{fs} = \frac{P_T}{P_R}$$

式中, L_{fs} 为自由空间传播损耗;

P_T 为发射天线辐射功率;

P_R 为接收天线接收功率。

根据分析,在不考虑发射天线和接收天线功率增益的情况下, L_{fs} 可表示为

$$L_{fs} = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

若以 dB 计得

$$L_{fs}(\text{dB}) = 32.45 + 20 \lg d(\text{km}) + 20 \lg f(\text{MHz}) \quad (2-1)$$

式中, d 以 km 计,它表示收发两端的距离,频率以 MHz 计。

由上式可见,自由空间中电波传播损耗只与工作频率 f 和传播距离 d 有关,当 f 或 d 增大一倍时, L_{fs} 将分别增大 6 dB。

二、大气中的电波传播

(一) 大气折射

在实际移动信道中,电波是在低层大气中传播,由于低层大气不是理想均匀介质,会产生吸收和折射等现象,并且折射率以 n 表示,随大气高度以 h 表示的变化而不同。

当一束电波通过折射率随高度变化的大气层时,由折射定律

$$v = \frac{c}{n}$$

可知,不同高度上的电波传播速度也不同,从而使电波射束发生弯曲,弯曲的方向和程度取决于大气折射率的垂直梯度 $\frac{dn}{dh}$,这种由大气折射率引起电波传播方向发生弯曲的现象,称为大气对电波的折射。

由于折射现象所产生的折射波会同直射波等同时存在,从而易产生多径衰落,但大气折射也有其好处,它有利于超视距传播。

(二) 视线传播极限距离

在 VHF、UHF 频段,大气折射现象尤为突出,它将直接影响视线传播极限距离,视线传播极限距离可由图 2-2 分析,若天线的高度分别为 h_t 和 h_r ,两个天线顶点的连线 AB 与地面相切于 C 点,AC 距离为 d_1 ,BC 距离为 d_2 ,地球的实际半径为 R_0 。

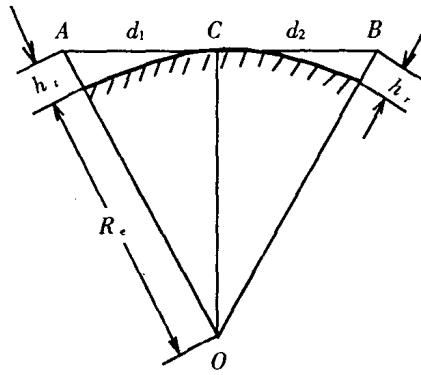


图 2-2 视线传播极限距离

在不考虑大气折射的情况下，直线传播的极限距离

$$d = d_1 + d_2 = \sqrt{2R_0} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (2-2)$$

如果电波传播超过上述极限距离，靠直射波是不能到达接收天线的。但在实际情况下，在超过极限距离的地方也可能收到较强信号，产生这种现象的主要原因是大气折射的缘故。电波在大气层中折射的结果是：实际传播距离要比直线传播的极限距离更远一些。

在标准大气折射下，用地球等效半径 R_e 替代 R_0 ，且 $R_e = 8500 \text{ km}$ ，因此视线传播极限距离

$$d = \sqrt{2R_e} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) = 4.12(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (2-3)$$

式中 h_t 、 h_r 的单位是 m， d 的单位是 km。

2.1.3 反射波

当电波传播中遇到两种不同介质的光滑界面时，如果界面尺寸比电波波长大得多时，就会产生镜面反射。由于大地和大气是不同的介质，所以入射波会在界面上产生反射。如图 2-3 所示。通常在考虑地面对电波的反射时，按平面波处理，即电波在反射点的反射角等于入射角。不同界面的反射特性用反射系数 R 表征，它定义为反射波场强与入射波场强的比值， R 可表示为

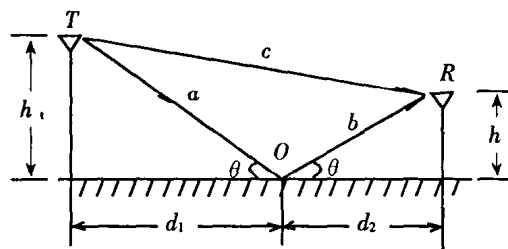


图 2-3 反射波与直射波

$$R = |R| e^{-i\psi} \quad (2-4)$$

式中 $|R|$ 为反射点上反射波场强与入射波场强的振幅比， ψ 代表反射波相对于入射波的相移。

反射系数的大小与入射角 θ 、电波极化方式和反射介质的特性有关。用公式表示为：

$$R = \frac{\sin\theta - z}{\sin\theta + z};$$

这里

$$z = \frac{\sqrt{\epsilon_0 - \cos^2\theta}}{\epsilon_0} \quad (\text{垂直极化});$$

$$z = \sqrt{\epsilon_0 - \cos^2\theta} \quad (\text{水平极化});$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_r - i60\lambda\sigma.$$

其中 ϵ_0 是反射媒介的等效复介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, λ 为波长, σ 为电导率.

图 2-3 为两径传播模型, 由发射点 T 发出的电波分别经过直射线 TR 与地面反射路径 TOR 到达接收点 R . 实际的传播路径是多径的, 但在研究传播问题时往往将其简化, 并且从最简单的情况入手, 仅考虑基站至移动台的直射波以及地面反射波的两径模型是最简单的传播模型. 在很少建筑物的开阔地区, 这种模型可以近似反映出实际传播环境.

图 2-3 中, h_t 和 h_r 分别表示基站和移动台的天线高度, d 为两天线距离. 由于 TR 与 TOR 的路径不同从而会产生附加相移. 求附加相移前, 应先求出路径差 Δd . 在图 2-3 表示的两径模型中:

$$\Delta d = (TO + OR) - TR = \frac{2h_t h_r}{d};$$

由路径差引起的附加相移为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda};$$

式中, $\frac{2\pi}{\lambda}$ 称为传播相移系数, 决定于波长.

这时接收场强 E 可表示为

$$E = E_0(1 + Re^{-i\Delta\varphi}) = E_0(1 + |R|e^{-i(\Psi + \Delta\varphi)}).$$

由上式可见, 直射波与地面反射波的合成场强将随反射系数以及路径差的变化而变化, 有时会同相相加, 有时会反相抵消, 这就造成了合成波的衰落现象. $|R|$ 越接近于 1, 衰落就越严重. 为此, 在固定地址通信中, 选择站址时, 应力求减弱地面反射, 或者调整天线的位置或高度, 使地面反射区离开光滑界面. 当然, 这种作法在移动通信中是很难实现的.

2.2 移动信道的传播损耗

2.2.1 引言

移动信道是一种时变信道. 无线电波在移动信道中传播时会遭受来自不同途径的衰减损害. 一般说来, 这些损害可归纳为三类, 即传播损耗、多径衰落和阴影衰落. 若用公式表示, 接收信号功率可表示为:

$$P(d) = |d|^{-n} \cdot S(d) \cdot R(d);$$

式中, $|d|$ 表示移动台与基地台的距离;

$|d|^{-n}$ 表示移动信道的传播损耗, n 一般等于 3~4;

$R(d)$ 代表多径衰落, 它是由各种反射物和散射体产生的直射波、反射波和散射波的相互