

1

绪论

科学技术的发展日新月异,使得人类的工作方式和生活方式发生了巨大而深刻的变化。在过去的十几年中,无线网络获得了长足的发展,从蜂窝语音电话发展到无线接入因特网(Internet)和无线家用网络。无线网络给人们的生活带来了深刻的影响。在经过十几年的指数型增长后,今天的无线产业已成为世界上最大的产业之一。

近年来,无论是国际还是国内,在通信和半导体工业中,出现了一些新情况和新问题。特别是由于通信工业和技术的迅猛发展,直接推动着对集成电路的广泛需求,使通信设备终端芯片、手机芯片和宽带网络接入芯片等的发展遇到前所未有的机遇和挑战。

众所周知,由于工作频率的日益提高,模拟和数字电路设计师们正在不断地开发和改进电路。用于无线通信的模拟电路工作在 GHz 波段,高性能计算机、工作站以及作为这方面例子的个人计算机,它们所用的时钟频率也不断地增加。全球定位系统(GPS)载波频率在 1227.60MHz~1575.42MHz 范围内,个人通信系统中的低噪声放大器工作在 1.9GHz,在 C 波段的卫星广播采用 4GHz 上行和 6GHz 下行系统。一般说来,由于无线通信的快速发展,更紧凑的放大器、滤波器、振荡器和混频器电路正被设计出来并交付使用。通常这些电路的工作频率高于 1GHz。毫无疑问这种趋势将会继续下去,因此不仅要有独特性能的技术装置,而且要在设计时专门解决在常用的低频系统中没有遇到过的问题。

本章介绍了射频电路的发展历史,现代通信系统,射频电路在系统中的作用与地位,射频电路与微波电路和低频电路的关系,以及射频电路的应用领域等内容。

1.1 发展历史

最初的电子线路设计,大约要追溯到 18 世纪末和 19 世纪初。当时的蓄电池已能可靠地工作,该电池后来用它的发明者伏打的名字命名为伏打电池。伏打电池为驱动最初的电路提供了可靠的直流能源。之后又出现了低频交流功率源,按照法拉第感应定律工作的变压器,能更有效地输送电力,而只有很小的传输损耗。由于爱迪生、西门子和特斯拉等的伟大发明创造,电力产生和配电工业迅速增长并走进我们的生活。

1864 年,麦克斯韦在伦敦英国皇家学会首次发表的一篇文章中,综合人类关于电学和磁学的知识,提出了电场和磁场通过其所在的空间中交连耦合会导致波传播的设想,从理论上预言电磁波的存在,并证明光也是电磁场能量的一种形式。这在当时是全新的概念。其后,1887 年赫兹用实验证实了麦克斯韦的设想:电磁能量可通过空间发射和接收,并对电磁波的传播进行了演示。1895 年,马可尼首次进行电磁波通讯实验,实现了第一个实际的无线电通信装置。这些 19 世纪的重大发现和发明,预示着未来无线通信领域的迅速发展。进入 20 世纪后,1907 年福瑞斯特发明了世界上第一只具有放大作用的电子器件——真空三极管,对通信等技术的发展起了很大的作用。早期无线通信主要是航海应用,当时巨大的海船是远距离运输的主要工具,在船上用很大的天线和设备进行“低频”信号通信。此后,无线通信经历巨大的演变,从 1920 年的无线电广播,到 1930 年的电视(TV)传输,无线电通信的进展对文化和社会的发展产生了巨大的影响。广播和电视变成大众化的信息媒体,影响着每个人的日常生活。

随后,科学技术进一步发展,发明了集成电路,这是 20 世纪最为重大的发明之一,它极大地改变了人类的生活。从贝尔实验室的肖克莱等人在 1947 年发明了第一只晶体管,到德州仪器公司(TI)的科尔比在 1958 年发明第一块集成电路,再到今天英特尔公司推出包含数千万个晶体管的奔腾Ⅳ处理器芯片,所经历的时间不过短短半个世纪。现在全世界每年生产数十亿的集成电路芯片,这些芯片被应用到了人类生活的方方面面,散布在地球的各个角落。

要提到的是,在电信等技术的发展过程中,半导体技术起了决定性的作用。例如,自 1962 年以来,电话技术迅速地向数字传输和交换发展。推动这个发展的动力,不是由于基于数字传输和交换的优越性,而主要是固体电子学的进展。在 20 世纪 40 年代,人们已经知道数字脉冲编码调制(PCM)技术的优点,但直到 1962 年,市场上才出现第一个 PCM 系统。

之后,引入了可以达到更高工作频率的新型晶体管,并于 70 年代发明了小型、手持和便携式无线电装置(对讲机),这些装置至今仍用来处理一些突发事件,如警务、消防和救护等。虽然早在 1964 年就实现了第一个微波单块集成电路(MMIC),但是直到 70 年代

后期和 80 年代早期, MESFET 晶体管发明后, MMIC 才真正进入实用化阶段。

再后, 通信等技术持续而快速地发展, 1980 年出现了移动电话, 并于 1990 年引入了全球定位系统(GPS)。

现今的无线通信网络(如全球移动通信 GSM 系统), 极大影响着人们的个人通信方式。人们还通过其他通信方式, 如电子邮件(E-mail)、无线辨认和跟踪系统(RFID)以及便携式多媒体终端等, 交流着大量信息。

通信技术的进一步发展要求无线通信设备能在任何地方、任何时间使用, 这就要求其体积小、重量轻、功耗低(电池可以更小、更轻、更持久), 这就对集成电路技术提出了更高要求。

射频(RF)和微波(MW)通信, 即无线通信, 是利用无线电电磁波作为信息载体的通信方式, 所利用的频段在 50MHz 到 30GHz 这个宽广的范围内。它的产生和发展也是人类历史上具有里程碑意义的大事。它使人类的信息交流摆脱了时间和空间的限制, 具有高度的机动性和灵活性。长久以来, “天涯若比邻”的梦想得以真正实现。现在射频通信已经涵盖了从最尖端的航天军事到最简单的电动玩具在内的人类生活。特别是个人无线通信市场的成熟和发展使得全球的手机用户超过一亿, 而无线局域网也发展迅猛。预计到 2010 年无线通信用户将达到十亿人并超过有线通信用户。而这一切, 从马可尼实现无线电通信以来不过刚刚一个世纪, 从麦克斯韦预言电磁波的存在也不到一个半世纪。

可以说, 集成电路和射频通信的发展对人类进入信息社会起到了不可估量的推动作用。而随着技术的不断进步, 集成电路朝系统集成(SOC, System-On-a-Chip)发展是大势所趋, 特别是对于射频通信这样复杂的系统来说更是如此。而一个完整的射频系统也同时包含了数字电路和模拟电路, 是一个数模混合系统。

起初, 收发机由 3 片或 4 片芯片加上一些外部元件组成。之后, 很快发展到 2 片芯片(一芯片进行模拟信号处理, 另一芯片进行数字信号处理)加上一些外部元件。元件数再进一步降低, 直至在单片上实现全部收发机功能(模拟信号处理和数字信号处理)。降低成本、功耗和重量, 是追求的目标。这会遇到很多难题, 如数字信号对模拟信号的干扰, 还有工艺的兼容问题。目前, 用 CMOS 工艺以大量晶体管实现数字信号处理的复杂算法, 是比较容易的。但是射频模拟功能的实现比较困难。以前, 都是用 GeSi 和 GaAs 工艺实现射频模拟功能, 但成本高, 且更重要的是, 它和数字 CMOS 工艺不兼容, 无法实现单片集成。所以, 进一步发展的瓶颈是模拟前端, 即天线和数字信号处理器之间的接口。所有这些因素导致了用集成电路工艺来实现射频系统的研究和开发热潮。在硅 CMOS、BiCMOS、双极工艺、GaAs MESFET、异质结双极晶体管(HBT)、GeSi 器件等众多工艺中, 由于器件和材料的原因, 虽然硅 CMOS 的高频性能和噪声性能不是最好的, 但是由于它的工艺最为成熟、成本最低、功耗最小、集成度最高, 应用也最为广泛, 况且随着技术水平的提高, 特别是按比例缩小技术, MOS 晶体管的频率特性和噪声特性也逐渐得到改善,

因此从长远来看,CMOS 射频集成电路将是未来的发展趋势。事实上,最近几年,世界各国的研究人员在 CMOS 射频集成电路的设计和制作方面进行了大量的研究,并取得了可喜的进展,使 CMOS 射频集成电路的性能不断得到提高,并朝着实用化迈出了坚实的步伐。

1.2 现代通信系统概述

1.2.1 通信系统的组成

电子通信系统用于发送来自信源的消息或信息到一个或多个目的地。由信源产生的信息可以是语音、图像或纯文本等。典型的通信系统可以用图 1-1 所示的功能方框图来表示。

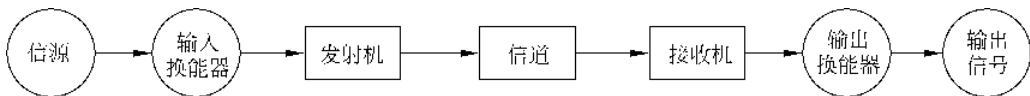


图 1-1 通信系统的功能方框图

输入换能器将信源的输出转换为适于传输的电信号,例如,话筒用来将声音信号转换为电信号,而数码相机将图像转换为电信号。输出换能器则将接收的电信号转换为适合用户的形式(如声音信号、图像等)。

通信系统的核心由三个基本部分组成,即发射机、信道和接收机。

(1) 发射机。发射机用于将电信号转换成适合信道传输的形式。发射机一般要使信号与信道匹配,即进行调制,用信息信号改变一个正弦型载波的幅度、频率或相位。例如,在调幅无线电广播中,被传输的信息信号包含在一个正弦型载波的幅度变化中,这是幅度调制。而在调频无线电广播中,被传输的信息信号包含在一个正弦型载波的频率变化中,这是频率调制。类似地,还有相位调制。调制方式的选择基于性能和成本因素的考虑,如带宽、发射机引入的噪声和干扰以及放大信号的电子器件等。除调制之外,发射机通常还包含信号滤波、信号放大等功能。在无线传输中,还要用天线将信号辐射出去。

(2) 信道。通信信道是用于将信号从发射机送到接收机的物理介质。在无线传输中,信道通常是大气(自由空间),而电话信道通常是各种媒体,包括电缆、光缆等。不管是在什么媒介中,信号传输都会遇到各种干扰。影响信道质量的最常见干扰是加性噪声,它产生于接收机的前端,称为热噪声。在无线传输中,外来的加性噪声来自人为噪声和天线接收的大气噪声,前者如汽车点火噪声,后者如雷暴中的闪电等。在某些无线信道,如用于长距离的短波无线传输中,信号退化的形式是多径衰落。加性和非加性信号畸变具有随机特征,以统计形式表述。

(3) 接收机。接收机的功能是恢复包含在所接收信号中的信息信号。如果信息信号是以载波调制传输的,则接收机进行载波解调,从正弦型载波中提取有用信息。解调的信息信号的保真度与调制方式、加性噪声强度以及其他各种干扰的强度有关。除完成信号解调这个主要功能之外,接收机还要完成许多辅助功能,如信号滤波和噪声抑制等。

1.2.2 数字通信系统

上面所述的电通信系统隐含着信息信号具有连续的时变波形,即模拟信号,产生该信号的信源是模拟源。模拟信号可以通过载波调制后直接在信道上传输,并在接收机中进行解调,我们称这种系统为模拟通信系统。

另一方面,模拟信号也可转换为数字形式,信息可通过数字调制来传输,并在接收机中解调为数字信号。用数字调制来传输模拟信号的最重要优点是信号的保真度高,特别是在长途传输中,数字传输能很好地再生(还原)数字信号,从而消除在每个再生点的噪声干扰。而相反地,长途传输中,当用放大器周期性地提升信号电平时,模拟传输中的加性噪声则是和信号一起被放大的。选择数字通信的另一个理由是模拟信息可能是高度冗余的,通过数字处理,在进行数字调制之前可以除去这些冗余,提高信道传输的效率。数字通信的第三个优点是数字系统的实现成本比较低。在某些应用中,信号本身就是数字的,例如计算机数据、英文文本等,这时,产生数据的信息源称为离散(数字)源。

图 1-2 给出了数字通信系统的功能框图和基本单元。在发射端,信源输出可以是模拟信号,如音频或视频信号,也可以是数字信号,如计算机数据。其中,信源产生的信息将被转换为二进制数码序列。理想情况下,我们用尽可能少的二进制数码序列表示信源输出,即寻求一种信源输出的有效表示来减少甚至消除信息冗余。有效地将模拟或数字源转换为二进制数码序列的过程称为信源编码或数据压缩。来自信源编码器的二进制数码序列称为信息序列,它被传送到信道编码器。信道编码器的作用是引入某种冗余,以便在接收端克服信号在信道传输中受到的噪声和干扰的影响。附加的冗余可以提高接收数据的可靠性,改进信号的保真度。信道编码器输出的二进制序列传送到数字调制器,后者用作与信道的接口。因为几乎所有的信道都能传输电信号(波形),数字调制器的主要功能是把二进制信息序列映射成信号波形。

接收端的基本功能是完成发射端的反变换,即进行解调、解码等。其任务是从带有噪声干扰的信号中恢复出原始信息。对于多路复用信号,还有解复用装置,以实现分路。最后,当模拟输出信号合乎要求时,信源解码器接收由信道解码器输出的序列,并重建信源的原始信号。由于信道解码的误差和信源解码器可能引入的畸变,信源解码器输出的信号是原始输出的一个近似。这个重建信号和原始信号之间的差异是数字通信系统所引入畸变的一个量度。

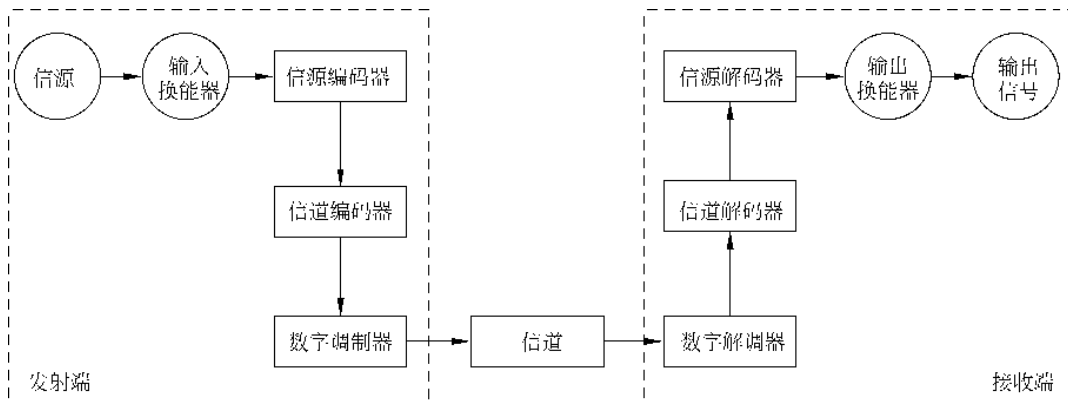


图 1-2 数字通信系统的组成

1.2.3 通信信道及其特性

如前所述,通信信道起着连接发射机和接收机的作用。现代通信系统的信道大致有如下五种:

(1) 有线信道。电话网络广泛利用有线电缆来进行数据和视频的传输,双扭线和同轴电缆是基本的导向电磁信道。用于连接用户和中央局的电话线有几百千赫的带宽,而同轴电缆的可用带宽是几兆赫。通过这些信道传输的信号幅度和相位会发生畸变,并被加性噪声所污染。双扭线信道还有邻近信道的串话干扰。由于有线信道承担国家和世界的大部分日常通信业务,所以对其传输性质和失真减小,进行了大量的研究。

(2) 光纤信道。光纤提供的信道带宽要比同轴电缆高几个数量级。过去的十年光纤得到长足的发展,对信号的衰减很低。目前已开发高可靠的信号产生与检测的光子器件。光纤的大带宽有可能为用户提供一系列服务,如语音、数据、传真和视频等。光纤通信系统中的发射机或调制器是一个光源(发光二极管或激光器),用信号调制其强度来传输信息。光波在光纤中传播并被周期性放大,以补偿信号的衰减。在接收端,用光二极管检测光强度,并输出正比于光强的电信号。可以预期,今后光纤信道将逐步取代电话网络中的有线信道。

(3) 无线电磁信道。在无线通信系统中,电磁能量是用天线耦合到传播介质的。天线的物理尺寸和形状与频率有关。电磁波传播模式有三种,即地波、天波和视线传播。

- 地波。当频率较低时(0.3MHz~3MHz),地波是主要的传播模式,最大传输距离约 160 千米(或 100 英里)。大气噪声、人为噪声和接收机的电子元件热噪声是主要的干扰。
- 天波。天波利用电离层的散射传播,其距离可达数百英里。其常见问题是“信号多径”,它是在信号以不同的延迟经过多个传播途径到达接收机时产生的,导致数字通信系统中的码间干扰。同时,多径引起的信号分量可能互相抵消,导致信号衰落。

- 视线。在频率很高时,主要传播模式是视线传播。对地面通信系统,发射和接收天线之间必须直接可视而无障碍。因此,电视台或微波中继系统的天线必须要在高塔上,以获得大覆盖范围。频率达到红外和可见光区的电磁波,可被用于视线通信,如卫星和卫星之间的链接。

(4) 水下声频信道。在过去的几十年中,海洋勘探活动愈来愈多。要将水下传感器获得的数据传输到海面,然后通过卫星转发到数据收集中心。电磁波在水下只能传播很短的距离。相反,声波信号可以传播几十甚至几百英里。因此,在水下只能用声波。

(5) 存储信道。信息的存储和检索系统构成当今数据处理活动的重要部分。磁带、磁盘和光盘等都可看成通信信道。将信号存储于磁带、磁盘或光盘相当于通过电话或无线电信道发射信号。而从存储系统读出信号则相当于接收机恢复发送的信号。和电话或无线通信系统一样,在存储系统的读出信号中有电子元件的加性噪声和邻轨干扰。随着技术的发展,存储系统的密度和存储量有了很大的提高。

1.2.4 通信信道的数学模型

通信信道是进行信息传输的媒介,对信号的质量具有很重要的影响。为了预测通信系统的性能,需要对通信信道进行建模。下面介绍三种常用的通信信道模型,这三种数学模型能很好地表征现代通信所用到的大多数信道。

1. 加性噪声信道

对于通信信道,最简单的数学模型是加性噪声信道,如图 1-3 所示。其中,传输信号 $s(t)$ 被一个附加的随机噪声 $n(t)$ 所污染。加性噪声可能来自电子元件和系统接收端的放大器,或传输中受到的干扰。

如果噪声主要是由电子元件和接收放大器引入的,则为热噪声,统计学上表征为高斯噪声。因此,该数学模型称为加性高斯噪声模型。因该模型可以广泛地应用于许多通信信道,又由于它数学上易处理,所以这是目前通信系统分析和设计中主要应用的信道模型。信道衰减很容易结合进这个模型,当信号遇到衰减时,则收到的信号为

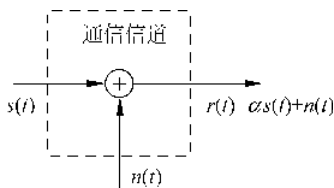


图 1-3 加性噪声信道

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t) \quad (1-1)$$

其中, α 表示衰减因数。

2. 线性滤波信道

在某些信道中,如有线电话信道,采用滤波器确保传输的信号不超出规定的带宽,因而不会相互干扰。这种信道数学上一般用带有加性噪声的线性滤波信道表征,如图 1-4 所示。

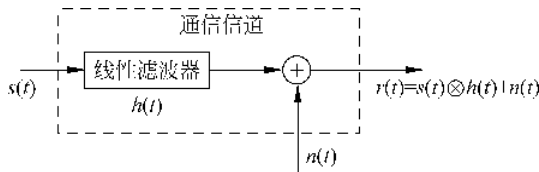


图 1-4 带加性噪声的线性滤波信道

如果信道输入信号是 $s(t)$, 则输出信号是

$$r(t) = s(t) \otimes h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1-2)$$

其中, $h(t)$ 是线性滤波器的冲激响应, $\otimes$ 表示卷积。

3. 线性时变滤波器信道

在水下声频信道和电离层无线信道中, 因传输信号是时变多径传播, 数学上可用时变线性滤波器来表示。这种线性滤波器的特性由时变信道冲激响应 $h(\tau, t)$ 来表征, $h(\tau, t)$ 是指在时间 $t - \tau$ 施加冲激, 信道在时间 t 的响应。带加性噪声的时变滤波器信道如图 1-5 所示。

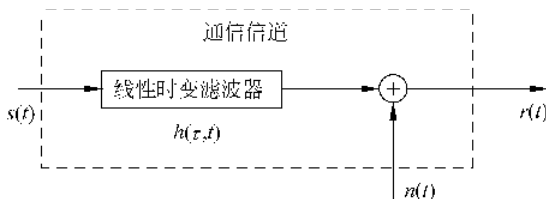


图 1-5 带加性噪声的线性时变滤波器

如输入信号是 $s(t)$, 则信道的输出信号是

$$r(t) = s(t) \otimes h(\tau, t) + n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau, t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1-3)$$

多径信号传输通过的信道, 如电离层和移动蜂窝无线信道是式 1-3 的特例, 其时变冲激响应如下:

$$h(\tau, t) = \sum_{k=1}^L a_k(t) \delta(\tau - \tau_k) \quad (1-4)$$

对于 L 多径传输, $a_k(t)$ 表示可能的时变衰减。将式 1-4 代入式 1-3, 则接收信号是

$$r(t) = \sum_{k=1}^L a_k(t) s(t - \tau_k) + n(t) \quad (1-5)$$

即接收信号由 L 条路径的分量组成, 其中每个分量被衰减 a_k , 并延迟 τ_k 。

1.3 射频电路在系统中的作用与地位

现代通信系统复杂多样, 并正以惊人速度向前发展, 如无绳电话、蜂窝(移动)电话、家用卫星网络、全球定位系统(GPS)和个人通信服务(PCS)等应用都深入到了千家万户。

但是,通信系统(以及其他的系统和设备)的心脏是集成电路,包括模拟集成电路和数字集成电路,而其中射频电路起着举足轻重的作用。例如,对于接收链路来说,从天线接收下来的射频信号,首先经射频前端和其他模拟电路变换到低频的基带内,然后经模数(A/D)转换器转换成数字信号,这些数字信号再经后面的数字信号处理电路完成解码和其他运算后送给相应的应用设备。对于发射链路来说,相应的应用设备采集到的数据,经数字信号处理电路完成编码和其他运算后,送到数模(D/A)转换器转换成模拟信号,然后再经射频前端和其他模拟电路调制到相应的射频范围内,通过天线发射出去(见图 1-6)。

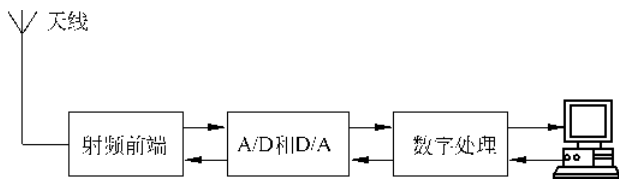


图 1-6 射频通信系统示意图

虽然现在存在着多种无线通信系统,它们在许多方面都不一样,但是所有的无线通信系统都包含一个射频前端模块来调制发送的信号和解调接收的信号。以图 1-7 所示的超外差式通信系统为例,射频前端指从天线到完成第一次频率变换所需要的电路,这些电路对射频信号进行处理。虚线框中即为通常的射频前端,而该框外的模块则通常为独立的模块。

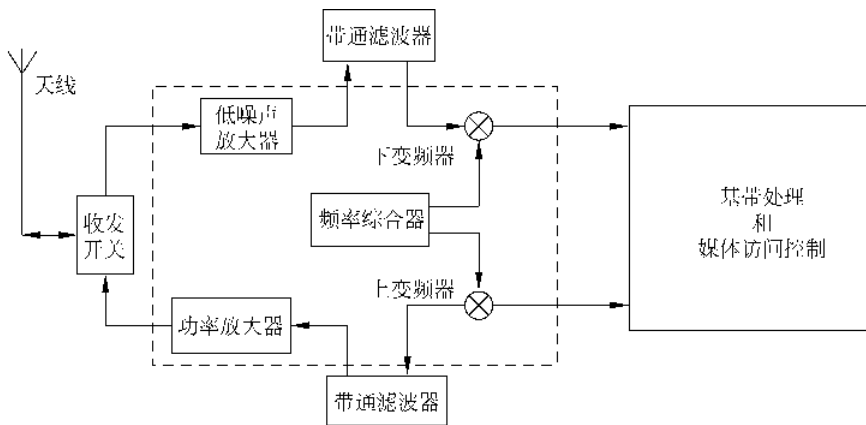


图 1-7 射频前端方框图

接收信号时,射频前端通过天线接收空间传播来的电磁波。由于信号一般都比较微弱,需要使用低噪声放大器对它进行放大。同时,由于空间存在着许多其他的电磁波信号,需要使用滤波器将这些无用的信号过滤掉,保留有用的信号。然后在下变频器中经过与本地产生的振荡信号进行混频,来将信号从射频载波变换到中频或者基带。发送信号时,同接收信号相反,需要将中频或者基带信号经上变频器变换到射频载波,经过功率放

大器放大到一定的功率,然后经过天线发送出去。频率综合器用来产生频率变换所需要的本地振荡信号。射频前端包括低噪声放大器、下变频器、上变频器、功率放大器和频率综合器五个模块和其他必要的偏置电路以及控制电路。当然,将虚线框内外的所有这些电路集成到一个芯片内,形成单芯片射频通信系统,是当前学术界和产业界研究的热点,而且已经有一些这样的芯片见诸报道,这样的芯片就是典型的数模混合集成电路。

综上所述,射频电路在系统中起着关键作用,现代通信系统的发展是与射频电路的发展分不开的。

1.4 射频电路与微波电路和低频电路的关系

1.4.1 频段划分

从现有的射频、微波应用,可以看出这个飞速发展的领域具有很大的潜力,成为未来许多应用的富有成效的资源。

由麦克斯韦方程可知,当电信号通过一个导体时,会产生电磁(EM)波。当信号频率高于最高的音频频率(大约 $15\sim 20\text{kHz}$),EM 波就开始从这个导体向外辐射。当频率高于数百兆赫时,这个辐射很强,通常将这个频率或更高的频率称之为射频(RF)或微波(MW)。

1. 频谱

要想设计一个电路覆盖全部频带,或者将全部频谱应用于某一种用途,是不切合实际的。所以要把频谱划分成许多频带,每个频带有专门的用途。通常一个电路都是被设计成用于某个特定的频带。

频谱有许多种划分和定义,表 1-1 表示频谱的一种划分法。

表 1-1 频谱的划分

频带名称	缩写	频带范围
甚低频	VLF	$3\sim 30\text{kHz}$
低频	LF	$30\sim 300\text{kHz}$
中频	MF	$0.3\sim 3\text{MHz}$
高频	HF	$3\sim 30\text{MHz}$
甚高频	VHF	$30\sim 300\text{MHz}$
超高频	UHF	$0.3\sim 3\text{GHz}$
特高频	SHF	$3\sim 30\text{GHz}$
极高频	EHF	$30\sim 300\text{GHz}$

2. 微波和射频的定义

当工作频率提高到接近 1GHz 或者更高,就会出现一些在低频下没有的现象。