

第一部分 引言

第1章 无线业务的应用和需求

第2章 无线通信的技术挑战

第3章 噪声受限和干扰受限系统

本书第一部分介绍无线通信的基本应用，以及这种通信形式的内在技术问题。第1章在简要介绍了无线通信发展史之后，对不同类型的无线业务进行了描述，并指出了它们的主要差别。1.3节将从另一个不同角度来审视同一问题：实际系统中应采用怎样的数据速率、覆盖范围等等，尤其是需要将这些性能措施进行怎样的搭配（例如，短距离时应采用怎样的数据速率发送，长距离时需要怎样的数据速率）？第2章描述了无线通信所面临的技术挑战，特别强调了衰落和同道干扰。第3章描述了设计一个无线系统的最基本问题，即在噪声受限或者干扰受限系统中进行链路预算。

学习了本书这一部分以后，读者将会对不同类型的无线业务有一个概括性的了解，并能理解这些业务中的每一种所涉及的技术挑战。应对这些挑战的措施将在本书后面的各部分中予以描述。

第1章 无线业务的应用和需求

无线通信是近25年间在工程领域里获得巨大成功的传奇之一——不仅从科学的角度讲，其进展有目共睹，而且在市场规模和社会影响方面也是如此。25年前一些默默无闻的公司，由于它们的无线产品，其公司名现在已在世界范围内家喻户晓。并且，在某些国家里，无线产业正支配着整个国民经济。工作习惯甚至人与人之间更为一般的交流方式，都随着可以在“任何地点、任何时间”进行通话的可能性而发生了巨大的变化。

长期以来，人们都将无线通信与蜂窝电话关联起来，因为它具有最大的市场份额，并且对日常生活具有最大的影响力。近来，无线计算机网络也已在人们的工作习惯和用户移动性方面带来了显著的改变，比如在咖啡店里回复电子邮件已成为家常便饭。但是，除了这些被广泛宣传的应用，还有大量人们无法清晰地意识到的应用也已开发出来，并且正在开始改变我们的生活。用无线传感器网络监测工厂，以无线链路代替计算机和键盘之间的线缆，用无线定位系统监视卡车（装载有通过无线射频标签来识别的货物）的位置。对无线工程师们来说，这些各式各样的新应用所形成的技术挑战与日俱增，本书旨在对目前及未来所面临技术挑战的应对措施予以全面论述。

开发新的技术解决方案一般有两条途径：工程驱动和市场驱动。在第一条途径下，工程师们提出一个卓越的科学见解，但并未考虑到直接的应用。随着时间的推移，市场需求可以帮助发现由这一见解所指引并使之成为可能的应用^①。在另一条途径下，市场需要某种特定的产品，由工程师们试着开发出满足这种需求的技术解决方案。本章将描述这些市场需求。我们从无线通信简史开始，旨在向人们传递关于过去100年里科学和市场如何发展的感受。然后描述一些构成当前无线市场主体的业务类型。这些业务类型中的每一种都在数据速率、覆盖范围、用户数目、能量消耗和移动性等方面满足着特定的应用需求。1.3节将讨论所有这些方面。这一节末尾将描述无线设备工程与（由其所引发的）社会人群行为变化的互动关系。

1.1 历史

1.1.1 一切是如何开始的

当我们回首通信的发展历史时，会发现无线通信实际上是最古老的通信形式，因为当吼叫声和丛林鼓声发挥传递信息的作用时无须任何电线或线缆。甚至最古老的“电磁”（光）通信也是无线的，因为通过烟雾传递信息的方式正是基于光信号沿视距（line of sight）线路传播的原理。然而，我们所知的无线通信却肇始于麦克斯韦（Maxwell）和赫兹（Hertz）的努力，他们为我们理解电磁波的传输奠定了基础。在他们开创性的工作之后不久，特斯拉（Tesla）就向人们演

^① 随后，第2章给出了对无线通信中主要技术挑战的总结——工程驱动的解决方案的理论基础。第3章至第23章讨论了这些挑战的技术细节和科学基础，而第24章至第29章详细说明了近些年来已开发的一些特定的系统。

示了借助于电波的信息传输,即实质上的第一个无线通信系统。1898年,马可尼(Marconi)进行了从一条船上到英吉利海峡怀特(Wight)岛的为世人瞩目的无线通信演示。值得注意的是,虽然特斯拉是在这一至关重要的尝试中第一个取得成功的,马可尼却具有更好的公众影响力,从而被广泛地引证为无线通信的发明者,并因此获得了1909年的诺贝尔奖^①。

在随后的年月里,广播的应用(及后来的电视)逐渐遍及全世界。虽然在目前“通行的”意义上我们经常不把广播或电视理解为“无线通信”,但从科学意义上,它们的确应归入此范畴,因为同样是借助于电磁波将信息从一个地方传送到另一个地方。如汽车电台所证实的,甚至可以将它们视为“移动通信”。大量的基础性研究,尤其是关于无线传播信道的研究,最初都是为了娱乐广播的有效传播而开展的。到了20世纪30年代后期,一个无线信息传输的广大网络(尽管是单向的)已然就位。

1.1.2 第一个系统

与此同时,双向移动通信的需求开始显现。在警察局和军队中,这种双向通信有着显而易见的应用前景,并且它们也是最先将无线系统用于封闭的用户群的机构。第二次世界大战期间及其结束后不久,军事应用带动了许多研究。这也是通信的许多理论基础基本奠定的时期。克劳德·香农(Claude Shannon)的开创性著作*A Mathematical Theory of Communications*(《通信的数学理论》)就出现于这一时期,它明确指出了在数据速率和信噪比受限情况下进行无差错传输的可能性。该著作中的某些提议,比如在频率选择信道中采用最优功率分配,时至今日才刚刚被引入无线系统中。

无线通信在20世纪40年代和20世纪50年代有几个重要进展。公民波段(CB)电台的应用得到普及,从而建立起公路上汽车与汽车之间新的通信方式。采用这些系统进行的通信,对于传送至关重要的交通信息,以及在拥有这些设备的司机们所组成的封闭群体内部传递有关情况,都是非常有用的,但却缺少与公用电话系统的接口,通信距离也被限制在大约100 km,这取决于(移动)发射机的发射功率。1946年,第一个移动电话系统在美国圣路易斯投入使用。这一系统具有与公共电话交换网络(PSTN)这一陆上有线电话系统之间的接口,尽管这一接口不是自动的,还需要人工电话接线员。然而,由于整座城市总共只有6个语音信道,这个系统很快就遭遇到用户容量的限制。这就激发了人们去研究即使所分配的频谱受限,也能提升可同时服务的用户数目的方法。美国电话电报公司(AT&T)公司贝尔实验室的研究人员找到了答案:蜂窝原理,将地理区域划分为许多小区,不同小区内可以使用相同频率。时至今日,这一原理构成了绝大多数无线通信的基础。

尽管理论上取得了突破,蜂窝电话在20世纪60年代并没有经历显著的增长。然而,在另一条不同的阵线上,人们取得了鼓舞人心的进展:1957年,苏联发射了第一颗人造卫星(Sputnik),美国紧随其后。这一进展预示着卫星通信这一新的研究领域的出现^②。许多基本问题亟待解决,包括大气传播效应、太阳风暴的影响、为卫星设计太阳能板及其他长效电源等问题。如今,卫星通信已成为无线通信的一个重要领域(尽管不是本书要专门讨论的问题)。其最为普及的应用是卫星电视的传送。

^① 实际上,马可尼的专利在20世纪40年代被撤消了。

^② 卫星通信,特别是通过静止轨道卫星进行的通信,早在20世纪40年代就已经被科幻小说家科拉克(Arthur C. Clark)提到过。

1.1.3 模拟蜂窝系统

20 世纪 70 年代,人们重新拾起对蜂窝通信的兴趣。在科学研究方面,这些年中,针对路径损耗、多普勒谱、衰落统计量,以及决定模拟电话系统性能的其他参量建立了模型,并实现了公式化。这方面工作的集大成者是杰克斯(Jakes)所著的 *Microwave Mobile Radio* 一书[Jakes 1974],它总结了当时这一领域内的技术发展水平。20 世纪 60 年代和 20 世纪 70 年代也出现了许多最初专门为陆上有线通信进行的基础研究,后来亦被证明同样有助于无线通信。例如,自适应均衡器的基本理论以及当时逐渐形成的多载波通信的概念。

就无线电话走向实用而言,设备小型化方面的进展使人们对“便携式”设备的想象日趋现实。像摩托罗拉(Motorola)和 AT&T 这样的公司为争夺该领域的领先地位而相互竞争,并且为促进其发展做出了重大贡献。日本电话和电报(NTT)公司 1979 年在东京建成了商用蜂窝电话系统。然而,却是由一家瑞典公司建立起了第一个具有大的覆盖范围和自动交换功能的系统:直到这时,爱立信 AB(Ericsson AB)公司主要以其电话交换设备为人们所熟悉,人们原以为该公司对无线通信不感兴趣。可是,正是在交换技术方面的专业经验和采用数字交换技术的决定(在那时是比较大胆的),使其能将一个大区域内的不同小区整合到单个网络中,并建立起北欧移动电话(NMT)系统[Meurling and Jeans 1994]。要注意的是,虽然交换技术是数字的,但射频传输技术仍然是模拟的,因而仍称为模拟系统。后来,其他一些国家开发出了自己的模拟电话标准,例如美国的系统称为高级移动电话系统(AMPS)。

NMT 系统的调查还确立了一种估算市场规模的有趣方法:在瑞典,商业顾问们将可能的移动电话用户数目和梅赛德斯 600(Mercedes 600,那时的顶级豪华轿车)的数目等同起来。移动电话永远不可能成为一个规模巨大的市场,这似乎是显而易见的。同样的想法也出现在蜂窝电话的发明者(AT&T)的管理层。根据一家咨询公司的建议,他们认定移动电话永远不可能吸引数量巨大的使用者,并停止了蜂窝通信的商业活动^①。

模拟系统为无线革命铺平了道路。20 世纪 80 年代期间,它们以激动人心的步伐得到了发展,在欧洲,其市场占有率已高达 10%,尽管在美国其影响力要稍差一些。在 20 世纪 80 年代初,电话是“便携式的”,而绝非手持的。在大多数语言里,它们仅仅被称为“车载电话(carphones)”,因为电池和发射机装载于汽车的行李箱里,由于过于沉重而不能随身携带。但到了 20 世纪 80 年代末,具有良好的通话质量和令人十分满意的电池使用时间的手机已经比比皆是。模拟手机质量之优异以至于数字电话在一些市场领域难以立足,似乎完全没有进一步发展的必要性。

1.1.4 GSM 及世界范围的蜂窝革命

尽管公众并未意识到从模拟向数字转变的必要性,网络的运营者却更清楚这一点。模拟电话具有较差的频谱效率(第 3 章将讨论其原因),并且由于蜂窝市场的快速增长,网络运营者对于为更多用户提供可用频谱有很高的兴致。此外,通信领域的研究已经开始不可逆转地转向了数字通信,而且还包括数字无线通信。20 世纪 70 年代后期和整个 20 世纪 80 年代,在遍及全世界的许多研究实验室中,人们都在进行着这方面的探索,研究内容涉及频谱的高效调

^① 当人们逐渐意识到原先的决定的荒唐之处时,这些商业活动在 20 世纪 90 年代初期得到重新启动。AT&T 随即花了超过 100 亿美元收购麦克考(McCaw)公司,并将它重新命名为 AT&T Wireless。

制方式、信道失真与时变性对数字信号的影响、多址方案及更多其他问题。因此，对于该领域的那些行家而言，实际系统随着研究的深入将很快变为现实已经是非常明了的事情了。

欧洲再一次走在了前头。欧洲电信标准协会(ETSI)的下设小组开始研究制定全欧洲强制性的数字蜂窝标准，并且该标准后来被世界上绝大多数国家所采用，这就是全球移动通信系统(GSM)。该系统的开发贯穿于整个20世纪80年代，于20世纪90年代初期开始实际的部署，并且立即为用户所接受。由于其附加特性、更好的语音质量及安全通信的潜力，基于GSM业务的市场份额在其引入市场的两年内就超越了模拟业务。在美国，向数字系统的转变稍微慢了一些，但截至20世纪90年代末，这个国家的通信业务也基本上完全数字化了。

数字电话使得已经迈上成功之路的蜂窝通信变成了一颗“重磅炸弹”。2004年，蜂窝数字电话在西欧的市场占有率已超过80%，而在斯堪迪纳维亚半岛上的某些国家，其市场占有率则接近了100%（许多人拥有两部或三部手机）。在美国其占有率也超过了50%，在日本则达到约70%。以绝对数目而论，中国已成为最大的独立市场，在2004年就拥有了约3亿数字电话用户。

无线系统的发展也使人们清楚地意识到了标准化的必要性。只有相互兼容，并且每一部接收机能够“理解”每一部发射机，即它们遵从同样的标准，设备之间才能交流。但应该如何来确立这些标准呢？不同的国家提出了不同的处置方式。美国采用的是“不插手(hands-off)”的处置方式：准许各种不同标准投入使用，由市场来决定谁是最后的赢家(或几个赢家)。20世纪90年代，当用于数字蜂窝通信的频率被拍卖时，频谱牌照的购买者可以选择他们想采用的系统标准。因此，如今在美国有3个不同的标准同时被采用。日本采用了类似的方式，有两种不同的系统为争夺其第二代(2G)蜂窝系统的市场而相互竞争。在日本和美国，同一地理区域上可以运作基于不同标准的多个网络，这就允许用户在不同技术标准之间进行选择。

欧洲的情况就不同了。当数字通信引入时，每个国家通常只有一家运营商(一般就是当时的公共电话运营商)存在。如果这些运营商各自采用不同的标准，就会导致严重的市场分裂(即每个标准只拥有一个小市场)，这对运营商之间的相互竞争没有好处。此外，由于欧洲的地理区域划分比美国和日本频繁得多，因此国家之间的漫游是经常性的，若各自采用不同的标准，将不可能实现漫游。因而，为整个欧洲设定单一的共同标准是理所当然的。这一决定总的来说被证明对无线通信的发展有利，因为它扩大了经济规模并且降低了新业务的成本，从而提高了新业务的可接受程度。

1.1.5 新无线系统及电信泡沫的爆裂

尽管蜂窝通信在一般人群中为无线通信勾画出了美好的发展图景，但20世纪90年代还是有各种不同层次的新业务陆续进入市场。无绳电话开始取代许多家庭里的“常规”电话。这些无绳电话的最初版本采用的都是模拟技术；然而，对于这一应用，数字技术同样被证明是更为优越的。在其他方面，模拟通话被窃听的可能性、邻近的非法使用者“劫持”了模拟无绳基站并进行非法通话却由他人付费的可能性，导致必须转向数字通信。然而无绳电话从来就未能取得蜂窝电话那样壮观的市场规模，它们只占有一个固定的市场。

20世纪90年代充满希望的另一个市场是固定无线接入和无线本地环路(WLL)，也就是将通向用户住所的铜线替换为无线链路，但它并没有移动性所具有的特殊好处。这期间提出了许多技术方案，但最终无一例外地都失败了。究其原因，经济、政治方面的因素不比技术因

素少。无线本地环路的原始动机是使另外的电话业务提供商可以争取到用户,同时又绕开了属于当前业务提供商的用于接入的铜线。然而,20世纪90年代中期,全世界所有的电信管理者都规定现有的有线业务提供商必须向其他的业务提供商租借其线路,通常出租价格还非常优惠。这就消除了无线本地环路大部分的经济基础。类似地,固定无线接入被作为以具有竞争力的价格来提供宽带数据接入的方案加以推广。然而,与数字用户线(DSL)技术和有线电视之间的价格战已经大大减弱了这种接入方式的经济吸引力。

因此,最大的宝藏似乎在于创建“第三代(3G)”系统(在模拟系统和诸如GSM之类的2G系统之后)[Bi et al. 2002],使蜂窝系统得以进一步的发展。2G系统基本上是纯话音传输系统,尽管也包括一些简单的数据业务,如短消息(SMS)。新的系统将在时速达到500 km/h的情况下,提供可与运气不佳的综合业务数字网(ISDN)相比的数据速率(144 kbps),甚至高达2 Mbps。经过漫长的商讨以后,订立了两个标准:3GPP(第三代伙伴计划,受到欧洲、日本和一些美国公司支持)和3GPP2(受到另一部分美国公司支持)。在世界绝大多数地区,新的标准还需要新的频谱划分,而且对这些频谱使用权的销售已成为一些国家的国库收入的一个重要来源。

3GPP的发展及早前美国对IS-95 CDMA(码分多址)的引入,触发了关于码分多址和用于无线通信的其他扩频技术(见第18章)的大量研究;到20世纪90年代末,多载波技术(见第19章)也已在研究界取得了强势的地位。多用户检测,即利用多址干扰的结构信息,能够大大减轻其影响,特别是在20世纪90年代初期,多用户检测就已经是许多研究者关注的另一个领域了。最后,多天线系统(见第20章)领域从1995年起有了迅猛发展,有时该领域的研究论文数几乎占无线通信物理层设计研究领域发表论文总数的一半之多。

3G蜂窝系统频谱的销售及一些以无线业务为主导的公司的首次公开募股(IPO),昭示着20世纪90年代的“电信泡沫”已经登峰造极了。2000年和2001年,市场在狂跌之下终于崩溃了。随着其倡导者的破产,许多新的无线系统(如固定无线)的发展停滞了,同时另一些系统(包括3G蜂窝系统)的部署也大大放缓。最令人不安的是,许多公司减缓甚至完全停止了研究,整个经济的萎靡不振也导致学术研究的资金匮乏。

1.1.6 无线通信的复兴

从2003年起,几个方面的发展使得人们重拾起对无线通信的兴趣。第一个就是2G和2.5G蜂窝通信在新兴市场和新兴应用的刺激下所取得的持续性增长。只需举出一例:2008年,甚至在其第一个3G网络正式投入运营之前,中国已拥有了超过5亿的手机用户。世界范围内,2008年,在用手机大约有35亿部,其中绝大多数是基于2G和2.5G标准的。

此外,尤其在日本、欧洲和美国,3G网络已实现了广泛的覆盖并广受欢迎(2008年,在西欧,总的手机市场渗透率超过了100%;在美国,这个数字则接近了90%)。与有线方式具有可比性的数据传输速率(5 Mbps)得以实现。继而,这一进展带动了相应设备的层出不穷,这些设备不仅支持语音通话,也能够支持互联网浏览和流媒体形式的音频和视频接收。这类设备之一的iPhone,首次推出时即获得了公众的巨大关注,而实际上还有很多手机都具有相似的性能。在美国,这些被称为“智能手机”的设备占有了20%的手机市场。所有这些进展导致了针对手机的数据传输业已成为一个规模庞大的市场。

甚至是在3G网络刚刚开始部署时,就已经开始了下一代(有时称为4G或3.9G)系统的开

发。大多数基础设施制造商正集中精力于主流 3G 标准的长期演进(LTE)方面的研发。一种植根于固定无线接入系统的替代性标准也已开始部署。另外,用手机收看电视节目(无论是直播电视还是预录制的剧集)正在变得越来越普及。对 4G 网络和电视传输而言,多输入多输出的正交频分复用(MIMO-OFDM)(见第 19 章和第 20 章)成为选定的调制方式,已推动了这一领域的研究。

第二个重要进展是无线计算机网络,即无线局域网(WLAN)取得了意想不到的成功。符合 IEEE 802.11 标准(见第 29 章)的设备已使计算机几乎可以像手机那样灵活而机动地使用。这一标准化进程早在 20 世纪 90 年代中期就已经启动了,却形成了几个不同的版本,而制造商之间的深度竞争最终影响了如今的大规模生产和应用。目前,无线接入点比比皆是,不仅在家庭和办公室,在机场、咖啡店和其他类似场所也都可以进行无线接入。因此,依靠便携式电脑和互联网接入办公的许多人士在选择何时何地工作进行时拥有了更大的自由度。

第三方面的进展在于,无线传感器网络为从远端站点对工厂甚至住所的监测与控制提供了新的可能性,并且在军事和安全监控领域也可以得到应用。对传感器网络的兴趣激发了对 ad hoc 和 P2P(peer to peer)网络的研究热潮。这类网络无须专门的基础结构。如果信源和信宿之间的距离过于遥远,则网络中的其他节点将为信息最终到达信宿提供传递信息的帮助。由于它们的网络结构与传统的蜂窝网络有很大的不同,需要进行大量的新的研究。

总的来说,“无线通信的复兴”基于以下 3 种趋势:(i) 产品类型的宽泛化;(ii) 已有产品数据传输的高速率化;(iii) 用户密度的高密集化。这些趋势决定了该领域的研究走向,也为许多晚近的科学开发提供了原动力。

1.2 业务类型

1.2.1 广播

第一种无线业务是广播电台。在此项业务中,信息传送给不同的,也可能是移动的用户(见图 1.1)。将广播电台与诸如蜂窝电话这样的业务区分开的属性有如下 4 个。

1. 信息仅在一个方向上传送。只有广播电台(或电视台)将信息发送到广播(或电视)的接收者;听众(或观众)不向电台发送任何信息。
2. 向所有用户传送的信息都是一样的。
3. 信息是连续发送的。
4. 许多情况下,多部发射机发送相同的信息。在欧洲尤其如此,在那里由国家广播网络完成整个国家的覆盖,并在国家的各个角落播出同样的节目^①。

上述属性极大地简化了广播电台网络的设计。设计发射机时不必对接收机有更多的概念或考虑过多,也无须提供双工信道(不需要将信息从用户接收机传送到电台发射机)。该业务的可能用户数目也对发射机的结构不构成影响,即不必操心是有上百万用户还是只有一个用户,发射机都发送出同样的信息。

以上描述对于传统的模拟广播电视和电台而言基本上是正确的。卫星电视和广播就有所

^① 美国的情形略有不同,在那里通常是“地方台”只完成单个大城市地区的覆盖,而且常常只有一部发射机。

不同了,因为其发射常常只面向所有可能用户的一小部分(付费电视或者依观看次数计费的用户),因此需要对播放内容加密,以阻止未经授权的用户观看。然而,要注意的是此处的“保密性”问题不同于常见的蜂窝电话。对于付费电视,授权用户群中的所有成员都应能方便地获取相关内容(多播, multicast),而对于蜂窝电话,每个呼叫仅能由呼叫本身所针对的那个用户听到(单播, unicast),而不让其网络提供商的所有用户都听到。

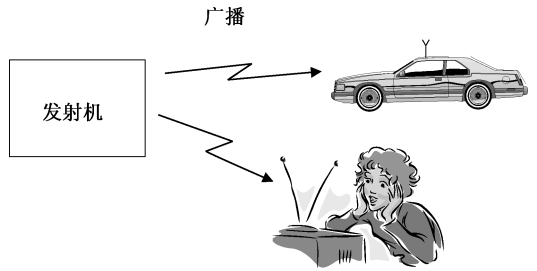


图 1.1 广播发送原理

尽管它们在经济上具有毋庸置疑的重要性,但广播网络不是本书的关注重点,篇幅的限制影响了本书对其进行更详尽的讨论。虽然如此,记住它们是无线信息传送的一种特殊情况仍然是有意义的,并且诸如同播(simulcast)数字电视和交互式电视,尤其是诸如供计算机和手机接收的流媒体电视之类的一些新进展,趋向于使广播和蜂窝电话之间的差别进一步模糊化。

1.2.2 寻呼

与广播相似,寻呼系统也是单向无线通信系统。这些系统具有以下特点(见图 1.2)。

1. 用户只能接收信息,不能发送信息。所以,一个“寻呼”(信息)只能由寻呼中心发起,而不能由用户发起。
2. 信息的发送目标和接收方都只限于一个单独的用户。
3. 发送信息的数量非常小。刚开始时,接收信息由单比特信息构成,向用户指示“有人发送了一条信息给你”。然后用户必须打一个电话(常常是公用电话)到寻呼中心,在那里由一个寻呼服务人员重复之前保留的信息内容。后来,寻呼系统变得更加复杂,允许传送短消息。例如,给出需要用户回复的另一个电话号码或者一个紧急事件的即时状况,但能提供的信息量很有限。

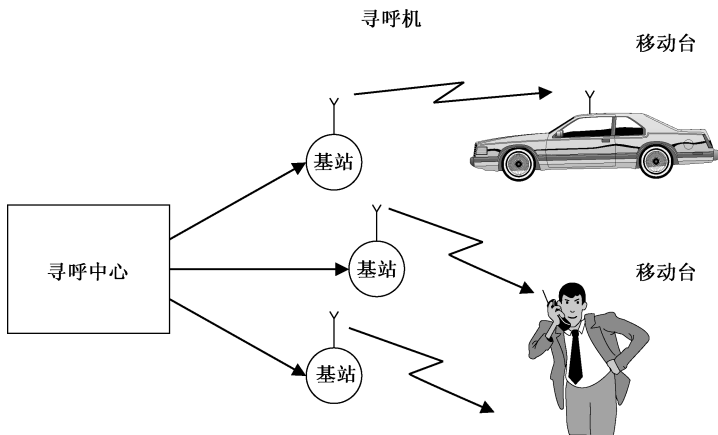


图 1.2 寻呼系统原理

由于通信的单向性及信息量较少,此业务所需带宽较小。这就允许该项业务工作在较低

载频上(如 150 MHz),这一频段只有少量频谱可供使用。稍后将会了解到,这样的较低载频更容易做到,只用很少的发射机来完成一个大区域的良好覆盖。

寻呼机在 20 世纪 80 年代至 20 世纪 90 年代早期非常流行。对于某些专业群体(如医生),寻呼机是该群体的必备工具,使他们可以在较短的时间内响应紧急事件。然而,蜂窝电话技术的成功大大降低了寻呼的吸引力。蜂窝电话可以提供寻呼机的所有业务,此外还增加了许多其他特性。2000 年后寻呼系统的主要吸引力就在于其可达到的更好的区域覆盖。

1.2.3 蜂窝电话

蜂窝电话是经济上最重要的无线通信形式,具有以下特征。

1. 信息流是双向的。用户可以同时发送和接收信息。
2. 用户可以位于(全国性的或国际性的)网络的任何一个地方。他(她)或者通话双方都不必知道用户的位置,网络必须考虑到用户的移动性。
3. 一次呼叫可以由网络发起,也可以由用户发起。换句话说,蜂窝用户可以被呼,也可以主呼。
4. 一个通话仅针对某单个用户,其他网络用户不应该听到这一通话内容。
5. 用户的高度移动性。在一次通话期间用户位置可能会显著变化。

图 1.3 示意了蜂窝系统的原理。移动用户同与其建立了良好无线连接的基站通信。各个基站都连接到移动交换中心,移动交换中心与公共有线电话系统相连。

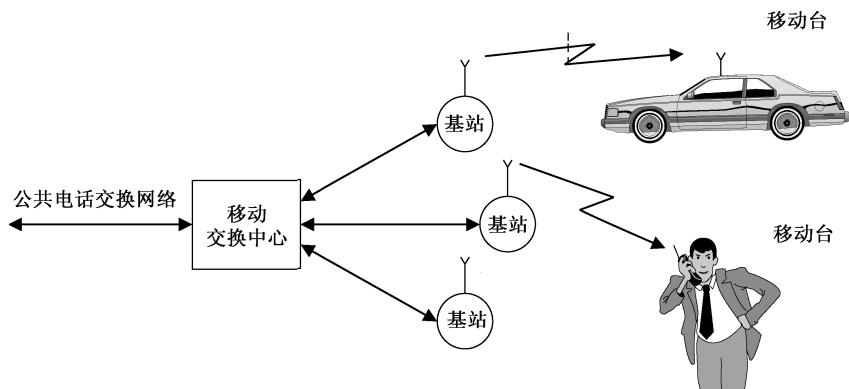


图 1.3 蜂窝系统的原理

由于每个用户都想要发送或接收不同的信息,一个蜂窝网络中的有效用户数是受限的。可用带宽必须在不同用户之间共享,这可以通过不同的“多址”方案加以实现(见第 17 章至第 20 章)。这是与广播系统的一个重要差别。在广播系统中,用户(接收机)的数目是没有限制的,因为所有的接收机接收同样的信息。

为增加可能用户的数目,采用了蜂窝原理:一家网络提供商的服务区域被分成许多子区域,称为小区(cell)。在每个小区内,不同用户必须分享可用带宽,以下考虑每个用户占用不同载频的情况。即使是相邻小区也必须使用不同的频率,以使同道干扰足够低。但对于相互之间距离足够远的小区,可以使用相同的频率,这是因为各自发射机发出的信号随着传输距离的增加就会变得更弱。因此,在一个国家里,可能有成百上千的小区使用着相同的频率。

蜂窝电话技术的另一个重要方面是不限制用户的移动性。为了能够实现通信,用户可以位

于网络覆盖区域的任何位置(即,并不限制用户在特定小区内)。而且,他(她)也可以在通话期间从一个小区移动到另一个小区。蜂窝网络具有与公共电话交换网络及其他无线系统的接口。

正如无线通信简史回顾中所指出的,蜂窝电话在 20 世纪 80 年代开始流行起来,现已成为在全世界拥有超过 10 亿用户的最具优势的通信形式。正是由于这个原因,本书将经常从蜂窝电话技术里提炼示例,尽管所阐明的一般原理同样适用于其他无线系统。第 24 章至第 28 章将对最流行的蜂窝系统进行详尽的描述。

1.2.4 集群无线电

集群无线电系统是蜂窝电话的一种重要变形,这种无线系统和公共电话交换网络之间没有连接,因此它支持封闭用户群之间的通信。显而易见的应用包括警察局、消防局、出租车和其他类似业务。封闭用户群使一般蜂窝系统不可能(或者很难)实现的如下几项技术革新成为可能。

1. 群呼。可同时与多个用户通信,或者可以实现系统中多个用户之间的会议通话。
2. 呼叫优先级。一般蜂窝系统运作的基本程序是“先到先服务”。一旦建立起一个呼叫,就不能中断该呼叫^①。在蜂窝系统下这是合情合理的,因为网络运营者不能确定呼叫的重要性或紧迫程度。然而,对于集群无线电系统,如用于消防部门的系统,这一程序是不可行的。有关紧急事件的通知必须传达到受其影响的群体中,尽管这样做意味着中断正在进行中的优先级较低的呼叫。因而,集群无线电系统必须能决定呼叫的优先级,并允许为支持高优先级的呼叫而挂断低优先级的呼叫。
3. 中继网络。网络的覆盖范围可以通过将每个移动台都作为其他移动台的中继站来获得延伸。因此,在基站覆盖范围以外的移动台可以向基站覆盖范围内的另一移动台发送信息,由后者将消息传递给基站;为了最终将消息传递到基站,系统甚至可以采用多次中继的方式。这种方式增加了网络的有效覆盖区域和可靠性。然而,此方式却只能用于集群无线电系统,而不能用于蜂窝系统,因为一般的蜂窝用户都不愿接受为其他用户中继消息所必然造成的对其电池能量的消耗。

1.2.5 无绳电话

无绳电话技术所描述的无线链路是手持机和直接与公共有线电话系统相连的基站之间的链路。与蜂窝电话的主要差别是,与无绳电话相关联并且可以与之通信的仅仅是一个孤立的基站(见图 1.4)。因此,不存在移动交换中心;反之,基站直接与公共电话交换网络相连。这样就出现了以下几种重要结果。

1. 基站无须具备任何网络功能。当出现来自公共电话交换网络的呼叫时,没必要查找移动台的位置,同样也没必要提供不同基站之间的切换。
2. 无中心系统。用户一般在其居所或办公地点有一个基站,但该基站不会影响任何其他基站。因为这个原因,没必要(也不可能)进行频率规划。
3. 无绳电话由用户控制的事实也意味着不同的计费模式。不存在可以为移动台和基站的

^① 除了因技术问题导致的通话中断,比如用户移动到了覆盖区域之外。

连接计费的网络运营商；反之，唯一出现的费用是由基站接入公共电话交换网络的费用。

在其他许多方面，无绳电话与蜂窝电话是相似的。无绳电话支持呼叫区内的移动性；信息流是双向的；呼叫既可以由公共电话交换网络发起，也可以由移动用户发起，并且还必须具有使呼叫不被非法用户截获或侦听，以及禁止非法呼叫的措施。

无绳系统还演变为无线专用自动小交换机(PABX)(见图 1.5)。在其最简形式下，一个专用自动小交换机配备有一个基站，可以同时服务于几部手持机，既可以将它们连接到公共电话交换网络，又可以将它们(同一公司或房间内的呼叫)相互连接。在其更高级的形式下，专用小交换机包含有连接至一个中心控制站的多个基站。这种系统基本上具备了与蜂窝系统一样的功能，仅能根据覆盖范围的大小来区分这种全功能专用小交换机和蜂窝网络。

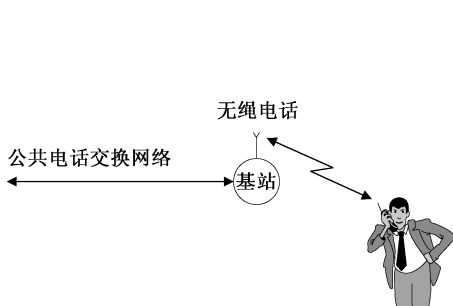


图 1.4 简单无绳电话的原理

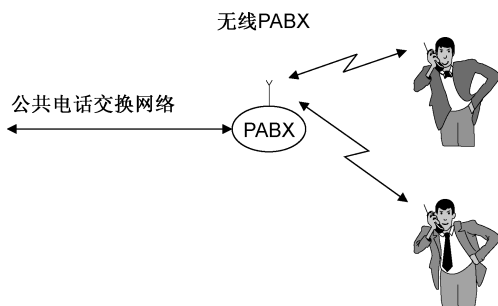


图 1.5 无线专用自动小交换机(PABX)的原理

第一个无绳电话系统是仅可建立手持机和基站之间的简单无线链路的模拟系统。通常，它们甚至不能提供起码的安全性(即阻止非法呼叫)。目前的系统是数字的，并可提供更复杂的功能。在欧洲，增强型数字无绳电话(DECT)系统(见配套网站 www.wiley.com/go/molisch)是最重要的标准；日本有一个类似的系统，称为个人手持电话系统(PHS)，它提供了无绳电话及蜂窝系统的替代系统(全功能的专用自动小交换机系统覆盖了日本的绝大部分地区，并可以提供公共接入)的可能性。这两种系统都工作在 1800 MHz 频段，使用的是专门为无绳应用预留的频谱。在美国，数字无绳电话主要工作在与其它无线业务共享的 2.45 GHz ISM(工业、科学和医疗)频段。

1.2.6 无线局域网

无线局域网(WLAN)的功能属性与无绳电话非常相似，将单个移动用户设备连接到公共陆上有线系统(public landline system)。这种情况下，“移动用户设备”通常是便携式电脑，而公共陆上有线系统指的是 Internet。无绳电话系统最主要的好处是其支持用户的移动性，从而方便了用户。无线局域网甚至对将固定位置的电脑(台式机)连接到 Internet 也是有用的，因为可以节省敷设电缆到计算机所在位置的费用。

无线局域网和无绳电话之间最重要的差别是所需数据速率的不同。无绳电话传送(数字)语音，最多需要 64 kbps，而无线局域网至少要与其所连接的 Internet 速度一样快。对于个体用户(家庭)应用，这意味着速率要在 700 kbps(美国的 DSL 速率)至 3~5 Mbps(美国和欧洲的有线电视接入提供商支持的速率)，以及 20 Mbps 或更高(日本的 DSL 速率)之间。对于具有更高速互联网连接的公司，速率要求相应地也更高。现已开发出许多标准以满足这些高数据速

率的需求,并且所有这些标准都带有 IEEE 802.11 标识。最原始的 IEEE 802.11 标准支持以 1 Mbps 的速率传输;最流行的 802.11b 标准(即人们熟知的 WiFi)支持高达 11 Mbps 的速率,802.11a 标准将速率提升到 55 Mbps。2008 年/2009 年推出的 802.11n 标准已经能够实现更高的传输速率。

在原理上,无线局域网设备可以连接到任何采用相同标准的基站(接入点)。然而,接入点的拥有者可以对接入进行限制(如通过适当的安全设置)。

1.2.7 个域网

当网络覆盖区域变得比无线局域网更小时称之为个域网(Personal Area Network, PAN)。此类网络多数是为了达到简单的“电缆替代”效果。例如,符合蓝牙(Bluetooth)标准的设备支持手机和头戴式免持耳机之间的无电缆的无线连接,这种情况下的两设备之间距离小于 1 m。在这类应用中,数据速率相当低(小于 1 Mbps)。近来,娱乐系统的组件之间(DVD 播放器到电视)、计算机与其外设(打印机,鼠标)之间,以及其他类似的应用受到了重视,并且许多个域网标准已由 IEEE 802.15 小组开发完成。这些应用采用了超过 100 Mbps 的数据速率。

用于更短距离的网络称为体域网(Body Area Network, BAN),这种网络使置于用户身体不同部位的设备之间的通信成为可能。这类体域网在患者健康和医疗设备(如心脏起搏器)的监测领域扮演着日渐重要的角色。

最后要指出,个域网和体域网既可以采用类似于蜂窝方式的网络结构,也可以形成 1.2.9 节将讨论的 ad hoc 网络。

1.2.8 固定无线接入

固定无线接入也可以看成无绳电话或无线局域网的演化形式,它从根本上替代了用户和陆上有线系统之间的专用线缆连接。与无绳系统的主要差别在于:(i) 用户设备不具移动性;(ii) 基站几乎总是服务于多个用户。此外,通过固定无线接入设备中继之后的传输距离(在 100 m 到几十 km 之间)要比通过无绳电话中继后的传输距离长得多。

固定无线接入的目的在于:不必从中心交换局到用户所在的办公室或居所敷设电缆,就能向用户提供电话和数据连接。考虑到敷设电缆施工所需的高昂劳动力成本,这种接入方式应该是一种较经济的方式。然而,值得关注的是,绝大多数建筑(尤其是在发达国家的市区)都已经存在现成的某种形式的线缆,普通电话线、电视电缆甚至光纤。不同的国家电信主管部门的管理条例均强调拥有这些线缆的运营商必须允许与之竞争的公司使用其线缆。结果,固定无线接入的主要市场就在于向农村地区提供覆盖,以及在不具备任何有线基础设施的发展中国家建立连接。总之,固定无线接入的商业运行状况已经很让人失望(见 1.1.5 节)。IEEE 802.16(WiMAX)标准试图通过在系统中引入某些有限的移动性来缓解这一问题,因而也就模糊了与蜂窝电话技术之间的界限。

1.2.9 ad hoc 网络和传感器网络

到目前为止,我们已讨论过“基于基础设施”的无线网络,在这种网络中,特定的设施(基站、电视发射机等)被有计划地刻意设置在固定的地点,以进行网络控制并实现与其他网络之间的接口。网络的尺寸可能各不相同(从仅可覆盖一间公寓的局域网到能够覆盖整个国家的

蜂窝网络),但区分“基础设施”和“用户设备”是它们共同的核心原则。然而,存在着另一种网络,其中只有一类设备并且所有的设备都可以移动,它们根据位置 and 需要自行组织起来形成网络。这类网络称为 ad hoc 网络(见图 1.6)。在一个 ad hoc 网络中仍然可以存在“控制器”,但选择哪个设备作为主终端和选择哪个设备作为从终端,都是在网络形成时相机而定的。ad hoc 网络也不分等级。实际的数据传输(即物理层通信)几乎与基于基础设施的网络完全相同,但在媒体接入和网络功能上都是非常不同的。

ad hoc 网络的好处在于低成本(因为无须基础设施)和高度灵活性。缺点则包括效率较低、通信范围较小,以及可以囊括进网络的设备数目受限。ad hoc 网络在目前传感器网络的迅速发展中发挥着重要作用,后者用于支持楼宇控制(基于传感数据对空调、灯光等进行控制)、工厂自动化、安全监控等领域设备之间的通信。ad hoc 网络在应急通信(当基础设施被毁坏时,比如遭地震毁坏)和军事通信领域也发挥着相应的作用。

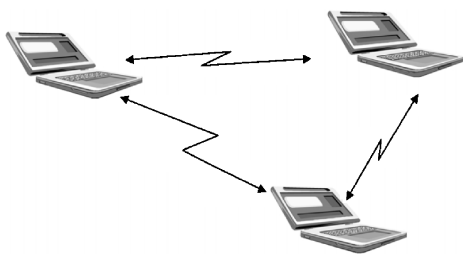


图 1.6 ad hoc 网络的原理

1.2.10 卫星蜂窝通信

除了在卫星市场创造最大收益的电视,蜂窝通信是卫星的第二个重要应用。卫星蜂窝通信与陆基蜂窝通信虽然有着同样的工作原理,但却存在着重要的差别。

“基站”(即卫星)距移动台的距离相当远。对于静止轨道卫星,距离为 36 000 km;对于近地轨道(LEO)卫星,距离为几百千米。因此,需要更大的发射功率,卫星上必须使用高增益天线(许多情况下移动台也用这种天线),并且若用户在建筑物内部,则通信几乎无法进行。

另一个与陆基蜂窝系统的重要差别在于蜂窝尺寸。由于卫星与地球之间的遥远距离,即使对近地轨道卫星而言,蜂窝直径小于 100 km 也是不可能的;对静止轨道卫星,蜂窝区域会更大。这样大的蜂窝尺寸对卫星系统而言,既是最大的优点也是最大的缺点。积极的一面在于,即使针对地广人稀的区域,也容易做到良好的覆盖,单个小区就可以覆盖撒哈拉地区的绝大部分。另一方面,这个区域内的频谱效率非常低,也就意味着(假定分配给这项业务的频谱有限)只有很少的人可以同时通信。

建立一个“基站”(即卫星)的费用比为陆基系统建造基站的费用高得多。不仅通信卫星的发射非常昂贵,而且还必须为作为卫星和公共电话交换网络之间链接点的地面站建造适用的基础设施。

以上所有问题所产生的后果就是,卫星通信系统的商业状况迥异于其他系统,该系统定位于以昂贵的价格向少量用户提供必不可少的通信手段。灾区和战区的救护工人与记者、船基通信,以及远离海岸的石油钻井平台上的工人,都是这种系统的典型用户。国际海事卫星(INMARSAT)系统是这种通信的最主要的提供者。20 世纪 90 年代后期,铱(IRIDIUM)计划试图通过 60 多颗近地轨道卫星向人们提供更低价格的卫星通信服务,但最后以破产告终。

1.3 业务需求

理解无线设计的关键在于,要明确不同应用在数据速率、覆盖范围、移动性、能量消耗等方面有不同的需求。设计用户以 500 km/h 速度移动时还能在 100 km 范围内支持 Gbps 数据速

率的系统是完全没有必要的。之所以强调这一事实是因为在工程师中有一种不良趋向,即意图设计“可以做除洗碗以外的任何事”的系统;而诉诸于科学的观点,这样的系统势必是价格昂贵且频谱效率低下的。下面将罗列系统设计中将遇到的种种需求的变动范围,还将列举哪些需求会出现在哪些不同的应用之中。

1.3.1 数据速率

无线业务的数据速率取决于具体的应用,覆盖了从几 bps 到几 Gbps 的广大范围。

- 传感器网络通常要求的数据速率从几 bps 到大约 1 kbps。一般来说,传感器测量某种关键性参数,比如温度和速度等,然后以范围从毫秒级到小时级的一定间隔发送当前数值(仅对应于几比特)。从大量传感器搜集信息再将其传送出去以便进一步处理的传感器网络,其中心节点往往需要较高的数据速率。这种情况下,可能需要高达 10 Mbps 的数据速率。这些“中心节点”显示出与无线局域网或固定无线接入更多的相似性。
- 语音通信通常需要 5 ~ 64 kbps 的速率,这取决于所需的音质和压缩的程度。对于需要较高频谱效率的蜂窝系统,标准的信源数据速率约为 10 kbps。对于无绳电话,由于无须复杂的语音压缩,因此可采用更高的数据速率(32 kbps)。
- 基本的数据业务需要 10 ~ 100 kbps 的数据速率。这些业务中有一类是采用手机的显示屏来提供类互联网信息的。由于显示屏较小,所需数据速率通常也低于传统互联网应用的速率。另一类数据业务提供了到便携式电脑的无线移动连接。这种情况下,大多数用户需要至少与拨号上网相当的速率(约 50 kbps),尽管基本业务有时也采用 10 kbps 的速率(利用事先为语音准备的同类通信信道)。在美国、欧洲和日本,基本数据业务基本上已被高速数据业务所替代,但在世界的其他地方它仍发挥着重要作用。
- 计算机外设与类似设备之间的通信。为了取代连接计算机外设(如鼠标和键盘)和主机的线缆(对于手机也有类似的情况),使用约 1 Mbps 数据速率的无线链路。这些链路在功能特性上与以前流行的红外连接相似,但通常可以提供更高的可靠性。
- 高速数据业务。无线局域网和 3G 蜂窝系统用于提供快速互联网接入,速率范围为 0.5 ~ 100 Mbps(目前仍处于开发之中)。
- 个域网主要用于明确这种无线网络的覆盖范围(至多 10 m),但常常也含有高数据速率(超过 100 Mbps)的意思。大多用于连接消费娱乐系统的各个组件(从计算机或 DVD 播放器向电视输送视频)或者高速的计算机连接(无线 USB)。

1.3.2 覆盖范围和用户数目

不同网络之间的另一明显差异在于覆盖范围和所服务的用户数目。这里所说的“覆盖范围”是指一对发射机和接收机之间的距离。在大型网络中,一个系统可以提供的覆盖区域是通过大量基站共同作用实现的,而这与此处所说的覆盖范围几乎无关。

- 体域网(BAN)完成附着于身体的不同设备之间的通信覆盖,如从腰际皮套里的手机到挂于耳际的耳机。因此,覆盖范围是 1 m 级的。体域网一般包含于个域网中。
- 个域网包括那些可以达到约 10 m 距离的网络,覆盖了一个用户的“个人空间”。连接计算机组件的网络和家庭娱乐系统网络都是个域网的实例。由于较小的覆盖范围,个域网内的设备数目较少,并且都与单个的“主设备”相关联。同时,相重叠的个域网(即共享相同

的空间或房屋)数目也不多,通常少于5个。这就使小区规划和多址更加简单。

- 无线局域网和无绳电话覆盖更大的范围,无线局域网的覆盖范围可以达到100 m。用户数通常限制在10个左右。当用户数增多的情况(如会议或集会)发生时,每个用户的数据速率会有所下降。无绳电话可以达到300 m的覆盖范围,与一个基站连接的用户数与无线局域网是同一数量级的。注意,无线专用自动小交换机却可以覆盖更大的范围和容纳更多的用户,如前所述,基本上可以把它看成小型专用的蜂窝系统。
- 蜂窝系统的覆盖范围要大于无线局域网之类的系统。微小区的典型覆盖半径为500 m,而宏小区的覆盖半径可以是10 km或30 km。小区内的有效用户数目常在5~50之间,这取决于可用带宽和多址方案。如果系统向某个用户提供高速数据业务,那么有效用户数目一般会有所减少。
- 固定无线接入业务的覆盖范围与蜂窝系统接近,即在100 m到几十km之间。同时,用户数目也与蜂窝系统有着相近的数量级。
- 卫星系统提供相当大的蜂窝尺寸,常常覆盖若干个国家甚至若干个洲的全部区域。小区尺寸完全取决于卫星的轨道,静止轨道卫星提供比近地轨道卫星更大的小区尺寸(半径为1000 km)。

图1.7是不同应用情况下的数据速率和覆盖范围的关系图。显然,如果所需覆盖范围较小,则比较容易达到更高的数据速率。固定无线接入是一个例外,它在相当长的传输距离上需要高的数据速率。

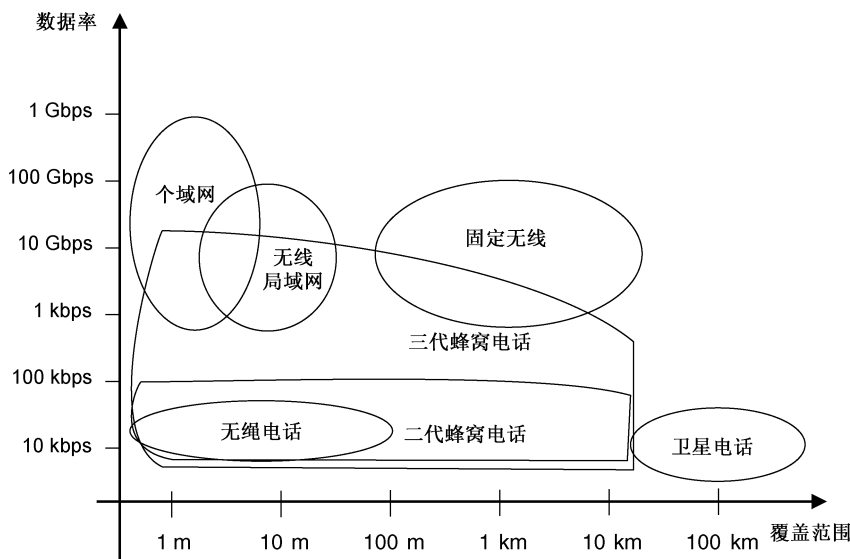


图 1.7 不同应用情况下的数据速率和覆盖范围的关系

1.3.3 移动性

无线系统还在对用户移动程度的支持上存在差别。无线通信对用户的主要吸引力之一在于允许用户在通信过程中到处移动。然而,对移动性的需求存在如下不同等级。

- 固定设备的安装一次到位,随后无论与基站通信还是彼此之间通信,其位置都是固定不

变的。对这些设备而言,采用无线传输技术的主要动机在于避免敷设线缆。尽管这些设备不移动,它们所使用的传播信道却可能是时变的:既可能是由于有人走过,又可能是因为环境的变化(机器、家具等重新摆放)。固定无线接入是典型的例子。还要注意所有有线通信(如公共电话交换网络)都可归入此类。

- 游牧型设备。游牧型设备在特定位置停留一定的时间(若干分钟到若干小时),然后会移动到另一不同的位置。这意味着,在一次“降落”(设备摆放妥当)期间,可认为设备是固定设备,然而从一次降落到下一次降落,环境可能发生彻底的变化。便携式电脑是典型的例子:人们不会在走来走去时操作他们的便携式电脑,而是将它们放置在桌面上使用。他们可能会将电脑携带至另一位置,然后在那里继续使用。
- 低移动性。许多通信设备会在步行速度下使用。步行用户操作的无绳电话和蜂窝电话是典型的例子。低移动性产生的效应是信道变化得相当慢,并且在多基站系统中,从一个小区到另一个小区的切换很少发生。
- 高移动性通常描述的是速度范围约 30 ~ 150 km/h 的情形。在行驶中的汽车里,人们所操作的蜂窝电话是一个典型的例子。
- 极高移动性以高速列车和飞机为代表,速度为 300 ~ 1000 km/h。这样的速度对物理层设计(多普勒频移,见第 5 章)和小区间切换这两方面形成了前所未有的挑战。

图 1.8 显示了不同应用情况下的移动性和数据率之间的关系。

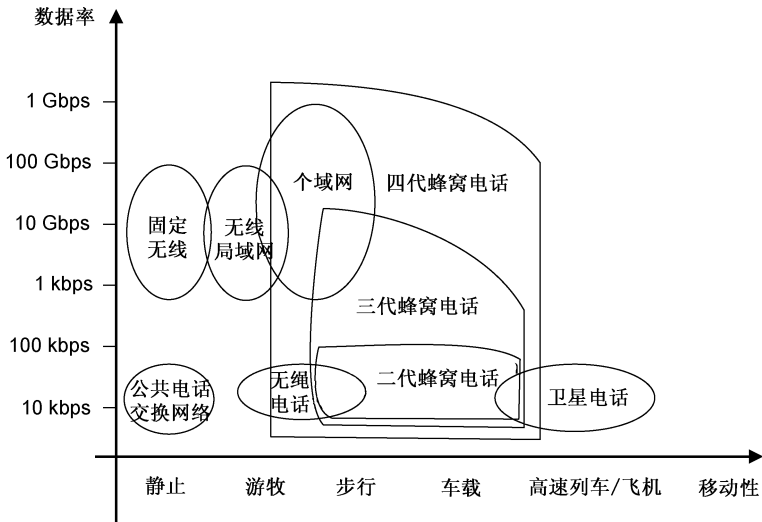


图 1.8 不同应用情况下的移动性和数据率之间的关系

1.3.4 能量消耗

能量消耗是无线设备的一个关键问题。大多数无线设备使用(一次性或可充电)电池,因为无线设备应不受任何形式的线缆的束缚,无论是用于通信的线缆,还是用于提供电能的连线。

- 可充电电池。游牧型和移动设备,如便携式电脑、蜂窝电话和无绳电话,常借助于可充电电池来工作。待机时间和使用时间是用户满意度的决定性因素之一。能量消耗一方面取决于数据传送的距离(记住,必须维持一个最小的信噪比),另一方面取决于所传

送的数据数量(信噪比正比于每比特能量)。过去100年间,电池的能量密度增加缓慢,以至于在使用和待机时间方面的主要进展来自尽可能地降低设备的电能消耗。对于蜂窝电话,最低要求是通话时间应超过2 h,而待机时间应超过48 h。对于便携式电脑,电池能量的消耗并非主要由无线发射机所决定,而相反主要是由硬盘使用和处理器速度之类的其他因素所决定。

- 一次性电池。传感器网络的节点通常使用价格低廉又可提供较高能量密度的一次性电池。而且,通常不考虑更换电池,一般是在电池用尽以后就把包括电池和无线收发信机的传感器废弃不用。显然,与使用可充电电池的设备相比,在这种情形下能量高效的操作就显得更为重要了。
- 电力电源。可以将基站和固定设备连接到电力电源,所以能量消耗对于它们而言并非主要的关注点。因此,如果可能,将尽可能多的功能特性的实现(及由此带来的能量消耗)由移动台转移到基站是人们所希望的。

用户对于电池的需求也是重要的市场卖点,尤其是在蜂窝手机市场。

- 电池占了一部移动台重量的绝大部分(70%~80%)。手机的重量和尺寸都是重要的卖点。20世纪80年代中期,蜂窝电话一般称为“车载电话”,因为移动台只能放在汽车行李箱内运输,并通过汽车电池供电。到20世纪80年代末,电池的重量和尺寸下降到约2 kg,以至于用户可以用背包携带它。到2000年,电池重量已减少到约200 g。这一进展部分源于更高效的电池技术,但更大程度上源于手机功耗的降低。
- 手机(原材料)的成本也在相当大的程度上取决于电池。
- 用户既要求几天的待机时间,又要求在再次充电之前至少可以通话2 h。

这些“商业”因素决定了电池的最大尺寸(及电能容量),因此也决定了待机和通话期间的允许能耗。

1.3.5 频谱的使用

频谱的分配可以是基于专用的,也可以是基于共享的。这在很大程度上决定了多址方案和系统所必须提供的抗干扰能力。

- 业务和运营商专用频谱。在这种情况下,一部分确定的电磁波谱以专用的方式分配给某业务提供商。主要的例证就是蜂窝电话,网络运营者以专用的方式购买或者租用(价格一般非常高)频谱。由于是专用的分配方式,运营者对分得的频谱有完全控制权,也就可以去规划将频谱的不同部分用于不同的区域,以使干扰最小化。
- 允许存在多个运营商的频谱。
 - 业务专用频谱。在这种情况下,频谱只能供特定业务使用,而不是分配给特定的运营商。相反,用户可在无须牌照的情况下建造符合规格的设施。这种方式无须(或不允许)干扰规划,而是按照能够避免相同区域上其他用户所带来干扰的思路进行系统设计。由于唯一的干扰源来自相同类型的设施,相对而言,不同设备之间的相互协调就比较简单。对发射功率加以限制(对所有用户均加以限制),是这种方式得以有效实现的关键所在。否则,如果每个用户都仅为压过其他的干扰而盲目增加功率,那么势必导致一场用户之间的“军备竞赛”。

- 分配给不同业务和不同运营者的免费频谱。2.45 GHz 的 ISM 频段是最广为人知的例子。这一频段允许使用微波炉、WiFi 局域网和蓝牙无线连接,以及其他许多应用。对于这种情况,也要求每个用户必须遵守严格的发射功率限制,以便不对其他系统和用户造成太大的干扰。然而,用户间的相互协调(以最小化干扰)变得几乎不可能实现,因为不同系统之间无法交换协同工作的信息,甚至常常无法确定干扰的确切属性(带宽、占空比)。

2000 年以后,两项新的频谱使用举措已经公布,但至今仍未能真正广泛应用。

- 超宽带系统将信息扩展到非常宽的带宽,同时具有非常低的功率谱密度。因此,传输频段可以包括那些已分配给其他业务使用的频段,而不会造成明显的干扰。
- 自适应频谱占用。先确定某特定频段当前的使用情况,然后使用频谱中尚未占用的部分。

1.3.6 传输方向

并非所有的无线业务都需要在两个方向上传递信息。

- 单工系统仅在一个方向上发送信息,例如广播系统和寻呼系统。
- 半双工系统可以在两个方向上发送信息。然而,在任何时刻只允许一个方向的发送。步话机(Walkie-talkies)在讲话时需要用户按下一个按键,是这类系统的典型例子。注意,在使用中,一方用户在结束其发送时必须向另一方用户示意,例如表达“通话完毕”来结束本次通话,这样另一方的用户就知道自己现在可以发送了。
- 全双工系统允许同时在两个方向上传输,例如蜂窝电话和无绳电话。
- 非对称双工系统。就数据传输而言,我们常常发现一个方向(常常是下行链路)的数据速率要比另一个方向高得多。即便如此,它仍然保持着全双工的能力。

1.3.7 服务质量

不同无线业务对服务质量的要求也有着很大的差别。服务质量的第一个重要指标是针对语音业务的语音质量和针对数据业务的文件传送速度。常采用平均印象分值(MOS)来度量语音质量,它表示了对接收语音质量的大量(主观)个人判断(按 1 到 5 分的分值来衡量)的平均值(见第 15 章)。数据传输的速率简单地以 bps 来度量,显然速率越高越好。

业务的可获得性也是一个相当重要的指标。对于蜂窝电话和其他语音业务,服务质量常按照对“阻塞呼叫^①比例加上中途掉话的呼叫比例的 10 倍”取补^②的方式来计算。这个公式考虑到了一个正在进行的通话被中断要比根本无法打通一个电话更使人困扰的事实。对于欧洲和日本的蜂窝系统,这项服务质量的测量值常常可以超过 95%,而这个值在美国相当低^③。

对于紧急业务和军事应用而言,服务质量按对“阻塞呼叫比例加上中途掉话的呼叫比例”取补来测算更好一些。在紧急情况下,打不通电话的情况与正在进行的通话被中断的情况一样使人困扰。并且系统必须以更加牢靠的程度来规划,因为这时需要服务质量高于 99%。对

① 这里,“阻塞呼叫”包括了所有不成功的呼叫尝试,既包括那些由于信号强度不够所造成的不成功呼叫,也包括因网络容量不足所造成的那些。

② 取补即用 1 去减。——译者注

③ 造成这种差异的原因部分源于历史和经济因素,部分源于地理因素。

于诸如工厂自动化系统这样的应用,需要“超可靠(ultrareliable)系统”,这类系统要求服务质量超过 99.99%。

还有一个相关的指标是通信的允许延迟(等待时间)。对于话音通信,从一个人讲出到另一个人听到信息的延迟应该不超过约 100 ms。对于视频和音乐流,延迟可以更大一些,因为对大多数用户而言数据流的缓冲(至多几十秒)是可接受的。在话音和视频流通信中,先发送的数据先被接收者收到这一点是很重要的。对于数据文件,可接受的延迟常常会更大一些,并且数据到达接收端的顺序并不重要(例如,在从服务器下载电子邮件时,是第 1 封还是第 7 封邮件先到达客户端对用户而言并不重要)。然而,对某些数据应用而言,即使很小的延迟也是致命的,例如对于控制类应用、保安和安全监控等。

1.4 经济和社会因素

1.4.1 构建无线通信系统的经济条件

无线系统的设计不仅要着眼于针对特定的应用取得优化的性能,还应在合理成本的前提下达到上述目的。由于经济因素影响系统的设计,所以科学家和工程师必须至少对市场和销售环节所施加的约束有基本的认识。无线设备设计的一些指导原则如下。

- 将尽可能多的功能由采用(更昂贵的)模拟器件实现转变为采用数字电路实现。数字电路的造价与模拟电路的造价相比,前者随时间而降低的速度要快得多。
- 对大批量市场应用,要设法将尽可能多的元件集成到单个芯片上。大多数系统力求仅采用两片芯片,一片用于模拟射频电路,一片用于数字(基带)处理。进一步将其集成到单个芯片(片上系统)上去是人们所希望的。为利基(niche)市场所生产的产品就不同了,这些产品一般都试图采用通用处理器、专用集成电路(ASIC)或者有现货供应的器件,因为在这种市场应用场合,售出器件的数量有限,更高集成度芯片的设计显得得不偿失。
- 由于人工劳动力非常昂贵,应避免需要人力介入的任何形式的电路(如射频元件的调谐)。而且,这一点对于大批量市场产品的生产更为重要。
- 为提高开发过程及生产的效率,应将同样的芯片用到尽可能多的系统中。

谈及无线系统和业务的设计,必须辨别如下两种不同的类型。

- 对于那些移动性对其系统本身具有重要性的系统,例如蜂窝电话技术。这些业务会向用户收取额外的费用,即收费会比可获得同样通信效果的有线系统更昂贵。蜂窝电话就是一个恰当的例子。在过去,其每分钟价格一直高于陆上有线电话,并且看来还将持续高于后者,尤其是在与基于 IP 协议的话音(VoIP)电话业务相比时。尽管存在这一事实,如果价格差别不太大,这些业务就仍能与传统的有线业务竞争,并最终超过有线业务。20 世纪 90 年以来的发展状况无疑已经使人们看到了这一趋势,因为许多消费者(甚至许多公司)不再使用有线业务,而仅仅依靠蜂窝电话技术进行通信。
- 无线接入仅被当成廉价的线缆替代方案,不具有附加属性的那些业务,例如固定无线接入。这些系统必定相当注重经费的多少,因为无线基础设施的构建成本必须低于敷设新的有线连接线路或购买现有线路的使用权所需的费用。

1.4.2 无线通信市场

蜂窝电话是一个已取得巨大增长的充满活力的市场。然而,在不同的国家,其市场占有率是不同的。影响市场占有率的一些因素如下。

- 所提供业务的价格。业务价格依次受到竞争程度、运营商为获得更大市场占有率而接受一些损失的意愿,以及运营商的额外成本投入(特别是频谱执照的购买费用)的影响。然而,业务的价格并不总是市场占有率的决定性因素,斯堪迪纳维亚半岛虽然有着相对高的价格,但仍然具有世界上最高的市场占有率。
- 移动台的价格。如果消费者同意订立长期合同,则移动台通常由运营商赞助,并且要么是免费的,要么只以象征性的价格销售。“预付费”业务是例外情况,这种情况下用户购买指定的若干分钟的业务使用权(此时,手机以全价卖给消费者)。在市场分布的另一端,高端设备通常需要由消费者进行数目不小的共同支付。
- 所提供业务的吸引力。许多市场中,由不同网络运营商提供的业务的价格几乎是相同的。运营商们试图通过不同的特性(如更好的覆盖、文字和图片消息业务等)来区分彼此。由于允许用户来确定符合自己需要的业务,这些改进特性的提供一般也有助于扩大市场规模。
- 普遍的经济状况。显然,良好的普遍经济状况为一般客户在诸如移动通信业务之类的“非基本需求”上消费更多创造了条件。在那些收入的很大比例用来满足诸如食物和居住之类基本需求的国家,蜂窝电话市场显然就很有限制了。
- 现有电信基础设施。在那些现有陆上有线电信基础设施缺乏的国家和地区,蜂窝电话和其他无线业务可能是通信的唯一方式。这将导致高的市场占有率。遗憾的是,这些地区往往又是上面提到的经济状况糟糕的地区(大部分收入都被用来满足基本需求)。这样的事实状况尤其对固定无线接入的发展形成了阻碍^①。
- 大众的倾向性。有一些可以扩大蜂窝市场的社会因素:(i)人们对新技术(新发明)抱有积极的态度,例如在日本和斯堪迪纳维亚半岛;(ii)人们认为通信是生活中必不可少的组成部分,例如在中国;(iii)人们的高度移动性,由于人们在一天绝大部分时间里都不在其办公室或家里,就像在美国那样。

无线通信已经成了一个如此巨大的市场,以至于这一行业中绝大多数公司甚至都不为大多数消费者所知。消费者容易了解网络运营商和手机制造商。然而,零部件提供商和其他辅助行业比比皆是。

- 蜂窝电话基础设施制造商。大多数手机制造商同时也向网络运营商提供基础设施(基站、交换机等)。
- 零部件制造商。大多数手机制造商从外部提供商那里购买芯片、电池、天线等零部件。随着许多制造商和系统集成商剥离了他们的半导体部门,这一外购趋势得到了进一步的加速。甚至有些手机公司根本就不制造任何东西,而仅仅从事设计和市场运作。
- 软件提供商。软件及应用正在成为市场中日益重要的部分。例如,手机铃声业已成就

^① 简单明了地说:“这一产品的市场是那些负担不起该费用的人群。”

了数十亿欧元的市场。类似地,由于手机要具备越来越多的个人数字助理(PDA)的功能,手机操作系统和应用软件变得愈加重要了。

- 系统集成商。无线局域网和传感器网络要么需要集成到大网络中,要么需要与其他硬件结合使用(例如,传感器网络必须集成到工厂的自动化系统中)。这就为原始设备制造商(OEM)和系统集成商提供了新的行业领域。

1.4.3 行为影响力

工程技术并非凭空出现的,人们的需求改变着工程师们的研发内容,而他们的劳动成果也影响着人们的行为。蜂窝电话使我们可以随时进行通信联系,大多数人希望如此。然而应该意识到,这种应用改变了我们的生活方式。从前,我们不可能去呼叫某个人,而是去呼叫某个位置。那意味着职业或个人生活之间基本上是完全隔离的。正是由于蜂窝电话,我们可以在任何时间呼叫到任何一个人,既可能在夜晚被工作中的同事呼叫,也可能在会议进行中被自己的熟人呼叫;换句话说,职业和私人生活会掺杂在一起。较积极的一面是这样还会带来新的更便利的工作形式,以及更大的灵活性。

另一重要的行为影响力在于蜂窝电话礼节的发展(或者缺失)。大多数人倾向于认同在欣赏歌剧表演期间听到手机振铃是令人不愉快的事情,同时仍然有相当数量的人在同样场景下不愿意将他们的电话转入“静音”模式。此外,人们看上去并不情愿对已经振铃的手机全然不顾。人们往往愿意打断正在进行的任何事情来接听手机。主叫识别、自动应答功能等是工程师们所提供的用于缓解这些问题的方案。

更值得关注的严肃事情是,无线设备尤其是蜂窝电话有时可能会关乎生死。登山事故发生以后能够在野外打出求助电话无疑是一种救生方法。用于雪崩幸存者的定位设备具有类似的作用。不利的一面是,被电话交谈分散注意力的司机对公路交通构成了严重的危险。佐治亚理工大学最近的研究表明,在驾驶中进行手机通话(即使使用了免提设备),所造成的危险性与酒驾无异。驾驶中收发短消息的情况更糟。本书作者希望读者在记住书中所呈现的许多技术知识的同时,从本书中汲取的最最重要的启示就是:千万不要在驾驶中发送短消息或通话!!!再强调一次,这个问题并非纯技术问题,尽管已提出大量方案(包括“关机”按键)来试图解决这一问题。这是一个用户应改善行为的问题,也是工程师可以做些什么来促进这一改善的问题。