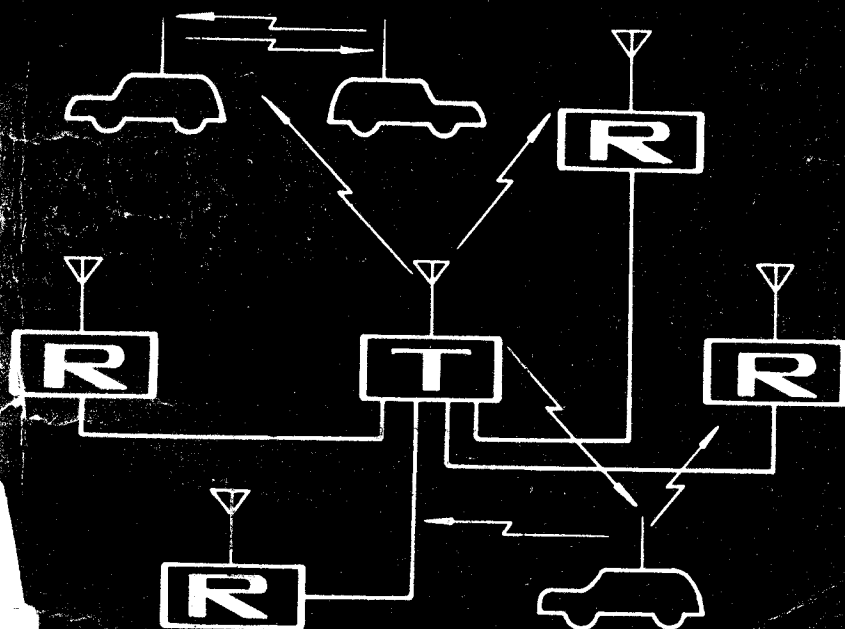


# 移动通信—理论与设计—



## 内 容 简 介

本书比较全面地论述了移动无线通信有关的理论和设计问题，其中包括汽车无线电话、铁路列车无线电话、船舶与航空无线电话以及携带式无线电话的基本原理和有关技术问题。此外，还介绍了电波传播、系统设计、抗干扰及测量等有关实际资料和数据。

本书可供从事移动无线通信的研制、生产和使用维护人员参阅，并可供高等院校有关专业的师生参考。

移動通信  
——理論と設計——  
監修 森永隆広  
電子通信学会 編  
1977年5版

\*  
移动通信  
——理论与设计——  
〔日〕森永隆広 主编  
张家宝 译  
王 臣 苏志安 校

\*  
国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
国防工业出版社印刷厂印装

\*  
850×1168  $1/32$  印张  $7\frac{1}{8}$  179 千字  
1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷 印数：0,001—2,800册  
统一书号：15034·2305 定价：0.91元

## 译者序

随着科学技术的发展,移动无线通信技术日益发展起来。移动无线通信,不仅在国防战术通信网和公安部门通信中占重要地位,而且在民用方面诸如铁路、航运、航空和汽车等各种通信中也得到广泛应用。

目前,移动无线电台实现了体积小、功耗低、双工、全自动交换和多信道自动转换等技术,从而极大地促进了生产和方便了生活。世界各国都在大力研究移动无线通信技术,不久的将来,必有更大的发展。

根据我国社会主义建设的发展和需要,迫切要求发展移动无线通信。如今,我国尚未见到关于移动无线通信技术的专著。为了促进“四个现代化”早日实现,发展我国移动通信事业,我们认为《移动通信》这本专著有一定的参考价值。

本书重点讲述了移动通信网的组成、移动通信特有的干扰和电波传播问题,并附有大量的测试数据、曲线和图表。

本书译文,请北方交通大学无线通信专业的教师张林昌、李振玉、康士棣、田翠云等同志审阅了有关章节,李承恕同志审阅了全书译文,在文字上和技术上提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

限于水平,译文中倘有疏漏不当之处,敬希读者指正。

1980年4月于北京

# 目 录

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>第一章 概论</b>          | <b>1</b>   |
| §1.1 移动无线通信发展情况        | 2          |
| §1.2 移动无线通信的特点         | 4          |
| §1.3 移动无线通信的主要技术问题     | 6          |
| <b>第二章 基础理论</b>        | <b>9</b>   |
| §2.1 调频与调相             | 9          |
| §2.2 调频波与调相波的边带分布      | 17         |
| §2.3 调频与调相时的带宽         | 21         |
| §2.4 调频与调相的信噪比         | 23         |
| <b>第三章 收发信机</b>        | <b>33</b>  |
| §3.1 概述                | 33         |
| §3.2 发射机               | 36         |
| §3.3 接收机               | 55         |
| §3.4 结构                | 74         |
| §3.5 设计要点              | 76         |
| <b>第四章 干扰</b>          | <b>81</b>  |
| §4.1 同信道及邻信道引起的干扰      | 82         |
| §4.2 发射机的边带扩展          | 85         |
| §4.3 互调                | 90         |
| <b>第五章 制式问题</b>        | <b>104</b> |
| §5.1 移动无线通信的运用方法       | 104        |
| §5.2 无线电区域的组成          | 110        |
| §5.3 信号制式              | 117        |
| <b>第六章 移动无线通信的电波传播</b> | <b>127</b> |
| §6.1 概述                | 127        |
| §6.2 地面移动无线通信的电波传播     | 128        |

|      |                     |     |
|------|---------------------|-----|
| §6.3 | 海上移动无线通信的电波传播 ..... | 150 |
| §6.4 | 航空移动无线通信的电波传播 ..... | 156 |
| §6.5 | 外部噪声 .....          | 159 |
| 第七章  | 天线与天线共用装置 .....     | 173 |
| §7.1 | 馈线 .....            | 173 |
| §7.2 | 移动电台天线 .....        | 180 |
| §7.3 | 基地电台天线 .....        | 186 |
| §7.4 | 发射天线共用装置 .....      | 198 |
| §7.5 | 接收天线共用装置 .....      | 202 |
| §7.6 | 收发信天线共用装置 .....     | 203 |
| 第八章  | 测试 .....            | 208 |
| §8.1 | 术语的定义 .....         | 208 |
| §8.2 | 测试方法 .....          | 213 |

# 第一章 概 论

甚高频及特高频移动无线通信，已广泛应用于列车、船舶、警察、报导和出租汽车等社会上各个部门之中，因此，大大提高了社会活动效率。图 1-1 表明了日本人民收入与移动无线电台数量历年变化的情况。其他国家移动无线通信的发展趋势，都大体与人民收入的增加而逐年增长。随着人民生活水平的提高和社会组织机构的高度复杂化，个人的活动势将日益广泛和更加多种多样。因此，可以预料：今后对移动无线通信，将提出使用范围要广、通

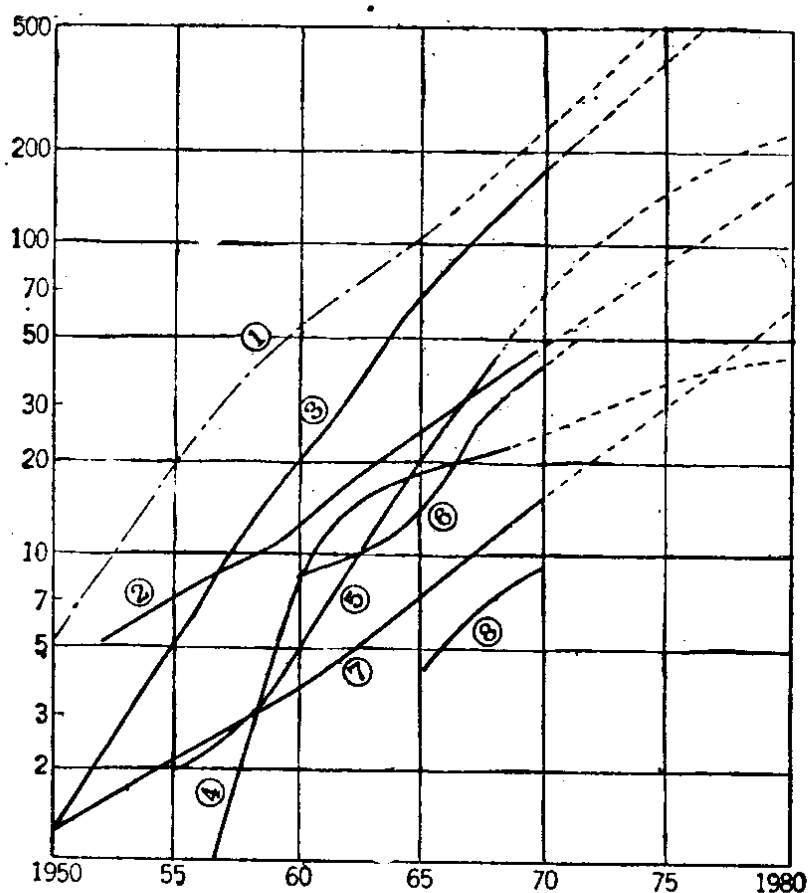


图1-1 人民收入与地面移动电台等历年增长趋势

- ① 美国地面移动无线电台数(1万台)；② 人民收入(兆日元)；  
③ 地面移动无线电台数(1千台)；④ 电视用户(100万)；⑤ 轿车(10万辆)；⑥ 使用无线电话的船舶总艘数(5千艘)；⑦ 用户电话(100万)；⑧ 新干线列车电话利用次数(10万次)。

路容量要大、信息传输要及时和高速化等要求。使用者不仅是列车、船舶和汽车的各个部门，而且要发展到个人。将来，只要能得到允许使用的无线电频率，就将有更大的发展。

日本的甚高频移动无线通信，正式创始于 1948 年，当时研制的是警察使用的 30MHz 频段的调频无线电通信设备。此后，由于列车无线电话和船舶无线电话开始使用，在制式上得到很大发展。随着无线电收发设备的晶体管化和集成电路化，从而在小型化和低功率消耗方面也逐步有所进展。近十年来，移动无线收发信机接收时的功率消耗已减到初期的 1/100，其体积和重量也减到初期的 1/10 以下。

## § 1.1 移动无线通信发展情况

日本的移动无线通信，在战后二十年间有很大发展，1970年，地面移动无线电台台数超过了 10 万台。作为公用通信的：有 150MHz 频段船舶无线电话，使用着约 40 座基地电台来为全国沿岸服务；有东海道新干线的 400MHz 频段的列车无线电话和利用感应式无线电设备的近畿铁路列车无线电话；以及在 150MHz 频段称为“袖珍铃”的无线电呼叫设备等等；在 400MHz 频段的汽车公用无线电话也投入了实际运用。此外，作为专用移动无线通信的还有：30MHz 及 150MHz 频段的警察无线电话；150MHz 频段的报导和警察等共用无线电话；400MHz 频段的出租汽车无线电话等等。至 1970 年止，用于出租汽车的无线电话约有 7 万台之多。

### 1.1.1 汽车无线电话

汽车无线电话最发达的国家是美国，其地面无线电台台数超过了 100 万台。150MHz 频段的汽车公用无线电话，曾于 1949 年在圣路易斯 (St. Louis) 开始使用。现有基地电台 600 台以上，移动电台 2.5 万台。这种系统是人工交换制，操作不便，因此，1964 年又开始应用了 IMTS 这种改进型汽车无线电话<sup>(1)(2)</sup>。

这种系统，是采用双工、全自动交换、移动电台信道自动转换和基地接收台自动选择等方式。目前，正在研究大容量的汽车无线电话，以求更有效地利用频率<sup>(3)</sup>。

在日本，400MHz 频段的汽车无线电话系统，在几年前已达到了实用阶段，处于只要有频率分配随时都可开通的状态。这一系统的特点，是采用了双工、全自动交换制和移动电台 16 个无线电信道自动转换等最新技术。此外，还可以自动转换数个基地接收台。它与美国的 IMTS 系统在技术上非常相似。当前，正在研究更加先进的系统<sup>(4)</sup>。

在欧洲，法国、德国、英国、瑞士、比利时、丹麦、西班牙和芬兰各国，都在运用汽车无线电话。这些国家的用户总数达 8000 左右。最近，法国<sup>(5)</sup>和西德<sup>(6)</sup>也在研制新式汽车无线电话系统。

### 1.1.2 列车无线电话

在日本，1956 年在近畿铁路上开始使用感应式列车无线电话。1960 年在东海道旧干线上使用 400MHz 频段的列车无线电话。1965 年又在东海道新干线上使用新制式的列车无线电话。上述电话系统的通话业务量，一年内通话次数竟达 70 万次以上。这种列车无线电话系统的基地发射台是采用 8 信道多路方式 (SS-FM)；移动电台是采用单信道方式。东京和新大阪是通过 27 座基地电台连接起来的<sup>(7)</sup>。

美国，也是很早以前就开始了列车无线电话业务。

### 1.1.3 船舶无线电话与飞机无线电话

在日本，从 1953 年开始，就在主要港湾使用了 150MHz 频段的船舶无线电话。后来 1964 年 11 月，主要是以航行于日本沿海的小型船舶为对象，开始使用多信道自动转换的 150MHz 频段船舶无线电话系统。截至 1972 年 3 月，用 47 座基地电台为全国

各地开通了通信业务，船舶用户达 5000 艘以上。

在欧洲，面向北海设有 300 多座甚高频海岸电台，其中 70 座以上是提供公用移动通信的。现在，5000 艘以上的船舶装备有甚高频无线电话。美国也在纽约等港湾及五大湖使用 150MHz 频段的电台进行通信业务。船舶无线电台约达 600 台左右。在美国，飞机公用无线电话，自 1957 年起在芝加哥、纽约间开通了通信业务，使用的是 450MHz 频段 6 个信道。

#### 1.1.4 携带式无线电话

作为今后实现携带式电话的一个过渡阶段，各国都在运用无线电个人呼叫系统 (paging system)。1968 年，日本在东京地区开始了无线电呼叫业务，使用的是 150MHz 频段称为“袖珍铃”(Pocket Bell) 的设备。现在全国数个城市开始了这种通信业务，截至 1972 年 3 月，用户已超过了 10 万户。

1963 年，美国使用 35MHz 频段开通了无线电呼叫业务，后来，叫做“随身电话机”(Bell Boy) 的正式系统，在西雅图和华盛顿两地开通使用<sup>(8)</sup>。

1963 年，荷兰也由邮电部经办，开始了叫做 Simofoon<sup>(9)</sup> 的个人呼叫业务，这种系统是用 80MHz 频段的  $V/F$  (话音频带) 脉冲制式，使用三台发射机用两个频率覆盖全国。

无线电呼叫系统，虽然是单方向的，但是实现双方向通话也是可能的，而且，各国都在研究可以连接一般用户电话的携带式无线电话机<sup>(10)</sup>。

### § 1.2 移动无线通信的特点

一说到移动无线通信，或许有人就只想象到是出租汽车无线通信，然而它同固定无线通信意义是不同的，它需要高度的技术。现将移动无线通信的特点列举如下。

(1) 移动无线通信是不能用别的方式来代替的。这就是说，

固定无线通信并不一定要用无线电，它可以通过同轴系统等有线方式，进行点对点（point-to-point）的通信。但是，对于汽车、船舶和飞机等移动体来说，如不依靠无线电是不能通信的。正因如此，要求用小型和轻便的移动无线电台。

（2）移动无线电台是要与用户直接接触的。固定无线通信只是传输的手段，对于通话人来说，传输手段无论是有线还是无线，都是完全无关的问题。然而，在移动无线通信中，无线电台本身直接由用户操作。因此，移动无线电台，特别是用户直接操作的控制器等，要求人体工程学<sup>●</sup>上的妥善安排。在外形和美观上也是必须考虑的。而且在使用上也必须便于外行人操作，要求有保安措施。

（3）移动无线通信，是由一切通信技术的综合技术而构成的。关于交换系统（交换控制、信号系统）、无线电系统（收发信机、天线、电波传播等）、终端设备（拨号盘、送受话器等）等，必须在性能和经济性上，而且在大小等方面都要保持协调，仅某一部分达到小型和高性能，也并无多大意义。

（4）可以使用的无线电频率是有限的。如果考虑电波传播特性、外部噪声特性和天线方向特性等，则适用于移动无线通信的是100~1000MHz频段。而分配给移动无线通信用的频段，也不过是数十兆赫。这样，若考虑到不论在何处都可使用的灵活性时，那么，在同一地区共用相同频率是困难的。如何有效地使用有限的频段，将是一个重要课题。为了有效利用频率，即使系统和机器稍复杂，造价略高，也可以说是不得已的。

（5）移动无线通信的特点是，一座基地电台，下属有许多个移动电台。因此，尽管基地电台在制式上稍微复杂，对于整个系统的经济性也不致有多大影响。假如，在移动电台方面，每台价

---

● 人体工程学：为设计适合人的生理和心理特性的机械，从医学、心理学、物理学、工程学等方面，研究人与人所操纵的机械之间的关系的一种学科（引自《广辞苑》）。——译者注

格高出 10 万日元, 当下属有 100 台时, 则成本就高出 1000 万日元。这一点, 在设计移动无线系统时, 是必须加以考虑的。

(6) 在移动无线通信中, 干扰信号与有用信号的场强之比是非常大的。对于甚高频和特高频移动无线通信来说, 相邻信道仅仅相隔 25 kHz, 可是在有用信号为 0dB $\mu$  的情况下, 而相邻信道的干扰信号有时竟达 90dB $\mu$ 。这在固定无线通信中是不会成为问题的。我们不妨说, 移动无线电台研制的历史, 就是既使机器小型化又使抗干扰特性有所改进的过程。

(7) 在移动无线通信中, 由于建筑物等的反射而使直射波与反射波互相干扰, 以致接收场强的瞬时值变动竟达 20dB 以上。这一点, 就意味着发射功率得到有效利用的, 只是几十分之一。

上述各项, 是移动无线通信的主要特点, 有效地利用这些特点, 克服缺点, 亦即无线电频段的有效利用方法、经济通话质量<sup>●</sup>的改进、干扰的消除或减轻、机器的小型化以及经济化等等, 乃是主要研究的问题。

### § 1.3 移动无线通信的主要技术问题

在移动无线通信中, 关于使用频段、电波传播、调制方式、无线电设备、中继方式和控制方式等方面的技术问题繁多, 其细节将于第五章内叙述。在这里, 仅就无线电频段的分配和调制方式, 作一概括性的介绍。

当前, 在日本是把 30~40MHz 频段作为警察无线电台用, 把 54~68MHz 频段作为国营电信电话公司移动无线电台用, 把 146~162MHz 频段作为消防、报导、运输、船舶无线电话用, 把 335~470MHz 频段作为列车无线电话和出租汽车无线电话使用。其他国家也在使用 60、150 及 400MHz 频段的移动无线电台。开始时, 无线电信道间隔曾为 40kHz 或 50kHz, 而现在已变成为

---

● 经济通话质量: 既提高通话质量, 又降低设备费用。——译者注

20kHz 或 25kHz 的窄频带。因为在窄频带调频的时候,调制指数是以前的  $1/2$ , 所以信噪比降低, 要求收发信机的频率稳定度也更加严格。例如, 在 400MHz 频段情况下, 即使保持  $5 \times 10^{-6}$  的频率稳定度, 收发信机的偏移总计也会有 4kHz 的偏移, 容易受到干扰, 将给通信质量带来影响。

移动无线通信, 特别是地面移动无线通信, 主要是在城市中使用, 因而信噪比会由于外部噪声而降低。正如第六章所述, 随着频率的增高, 外部噪声电平将降低。但是, 达到 1000MHz 左右时, 接收机的内部噪声就开始增大。另一方面, 从传播特性来看, 随着频率的增高, 传播损耗也将增大, 而且波动周期也将缩短。如果考虑传播特性、噪声特性以及天线增益等等, 则作为城市移动无线通信使用的频段, 以 100~1000MHz 为宜。

移动无线通信的调制方式, 一般有调幅 (AM)、调频 (FM) 和调相 (PM)。调频和调相在本质上并无差异, 移动无线电台是使用晶体振荡器, 所以, 一般是使用一种对其输出进行调相的方式。虽然人们常称作调频移动无线通信, 但是, 这种场合是指含有调相这一广义的调频而言的, 更确切地说, 不仅是日本, 而且各国也都对移动无线电台采用晶体控制调相方式。移动无线电台之所以采用广义的调频是因为: (1) 与调幅不同, 接收机输出电平与接收机输入电平无关, 是恒定不变的, 从而对于经常移动而接收场强不断变化的移动无线电台来说, 最为适宜; (2) 由于频偏选取得大, 可使信噪比改善, 而且抗干扰能力强, 等等。但是如最近那样改为窄频带调相时, 则不大可能获得调频的宽频带增益 (比调幅时的信噪比的改善), 与调幅相比, 信噪比改善并不显著。

在移动无线通信中, 单话路的电话为多, 在这种场合下, 无线电法规●中是将电波形式称为  $F_3$ 。F 意味着 FM 和 PM, 3 是指调制信号为电话信号而言的。

● 指日本国的而言。——译者注

最近，对于应用脉冲调制的移动无线通信系统，正在研究任意选址通信系统（RADA——Random Access Discrete Address）。

### 参 考 资 料

- (1) H. W. Nyfand: "An Improved Mobile Dial Telephone System", IRE Trans., VC-12, 1, p. 32, (Sept. 1963).
- (2) V. A. Douglas: "The MJ Mobile Radio Telephone System", Bell Lab. Record, 42, 12, p. 383. (Dec. 1964).
- (3) W. D. Lewis: "Coordinated Broadband Mobile Telephone System", IRE Trans., VC-9, 1, p. 43 (May 1960).
- (4) 森永: "新公衆移動通信方式", 信学会通信方式研資, CS 69-10 (1969-05).
- (5) J. J. Mulla: "STAMP Automatic Mobile Telephone System", Elect. Comm., 43, 4, p. 301 (1968).
- (6) H. Grosser: "A Nation Wide Direct Dialing Mobile Radio Telephone System", IEEE. ICC. (1970).
- (7) 中村, 他: "新幹線列車無線電話システム", 日立評論, 46, 5, p. 126 (昭 39).
- (8) D. Michell, 他: "A 150 MHz Personal Radio Signaling System", Bell Syst. Tech. J., 40, 5, p. 1239 (1961).
- (9) G. M. Uitermark: "A New Service-A Country Wide Radio Code Paging System" Philips Telecomm., 24, 1, p. 1 (Feb 1963).
- (10) 森永, 他: "携帯無線電話方式", 通研発表会論文集, 21, (昭 44-11).

## 第二章 基础理论

### § 2.1 调频与调相

在甚高频和特高频移动无线通信中, 可以采用调频或调相的调制方式。为了弄清调幅、调频和调相之间的区别, 首先讨论一下调幅。在调幅中, 载波的振幅是随调制信号的变化而变化。若设载波电流为  $I \cos \omega_0 t$ , 调制信号的角频率为  $\Omega$  ( $\Omega = 2\pi f$ ), 则已调波为

$$i = I (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_0 t \quad (2-1)$$

式中,  $m_a$  为调制度, 用百分数表示时也称为调制率。

根据三角公式展开, 可将式 (2-1) 写为

$$i = I \left\{ \cos \omega_0 t + \frac{m_a}{2} \cos(\omega_0 + \Omega) t + \frac{m_a}{2} \cos(\omega_0 - \Omega) t \right\} \quad (2-2)$$

如果将图 2-1 的 (b)、(c)、(d) 分别表示的载频、上边频和下边频在各个时间上合成起来, 就得到图 2-1 (e) 所示的调幅波。由式 (2-2) 也可看出, 调幅波包含着三个频率: 载频  $\omega_0$ 、上边频  $\omega_0 + \Omega$  和下边频  $\omega_0 - \Omega$ , 上下边频与载频的距离各为调制信号频率  $\Omega$ 。如果用矢量表示调幅波时, 则如图 2-2 所示。

调频与调相在本质上是等效的, 故统称为角度调制。

现在, 设载波角频率为  $\omega_0$  ( $= 2\pi F_0$ ), 以角频率为  $\Omega$  的调制信号调频时, 其调频波的角频率则为  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$ 。交流信号通常表示为  $i = I \sin \theta$ , 时间  $t$  的相位是从时间  $t = 0$  开始至时间  $t$  的积分, 即

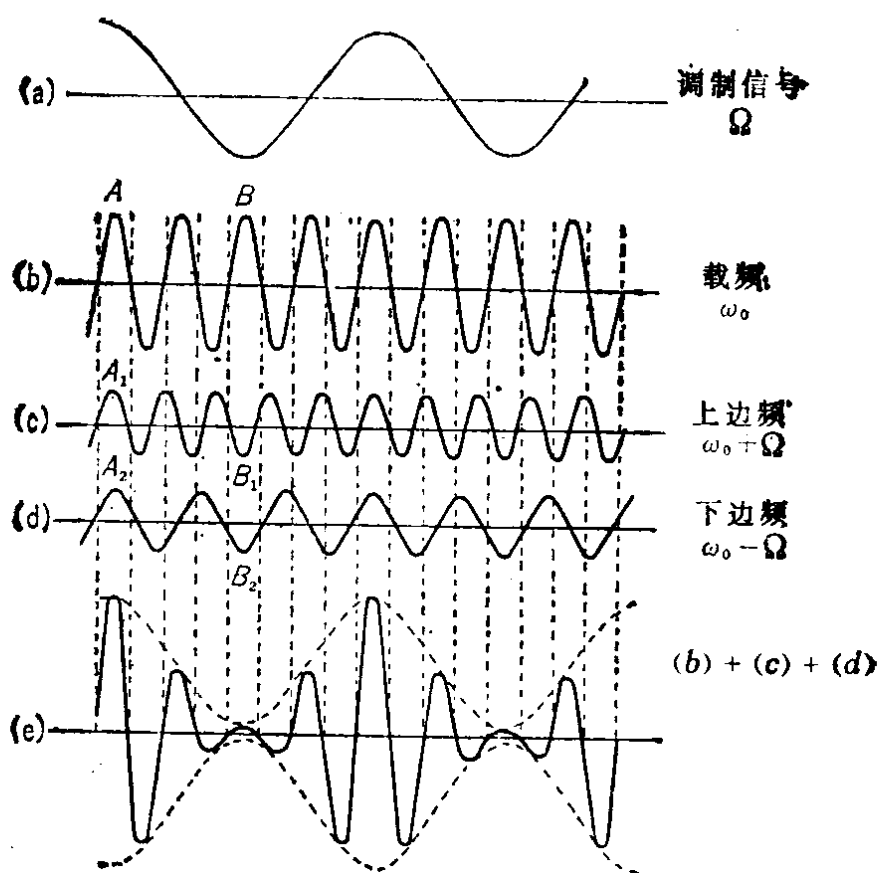


图2-1 调幅波的构成

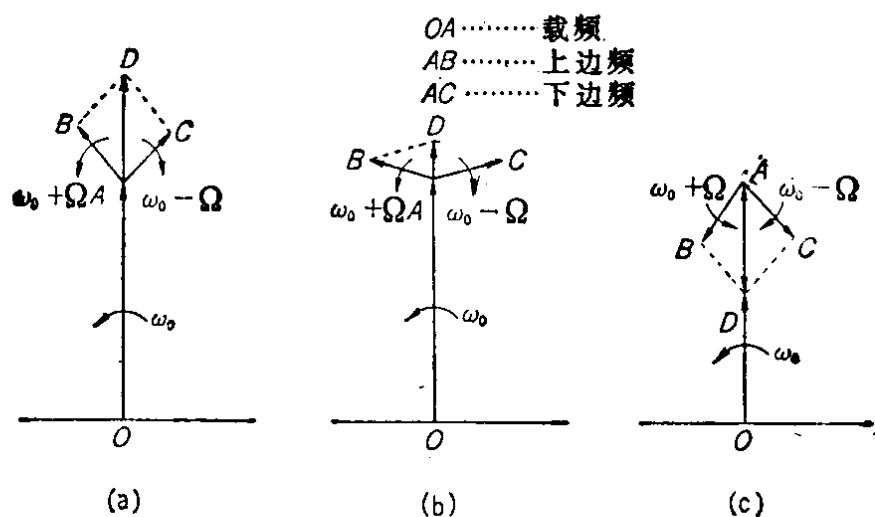


图2-2 调幅波的矢量图

$$\begin{aligned}\theta &= \int_0^t \omega dt = \int_0^t (\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t) dt \\ &= \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t\end{aligned}$$

因此，调频波可由下式给出：

$$i = I \sin \left( \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right) \quad (2-3)$$

这里，称  $\frac{\Delta\omega}{\Omega} \equiv m_f$  为调频波的调制指数。

图 2-3 为调频波波形。在调频中，频偏与调制信号的频率无关，只与其振幅成正比。然而，调制指数却与调制信号的频率成反比。

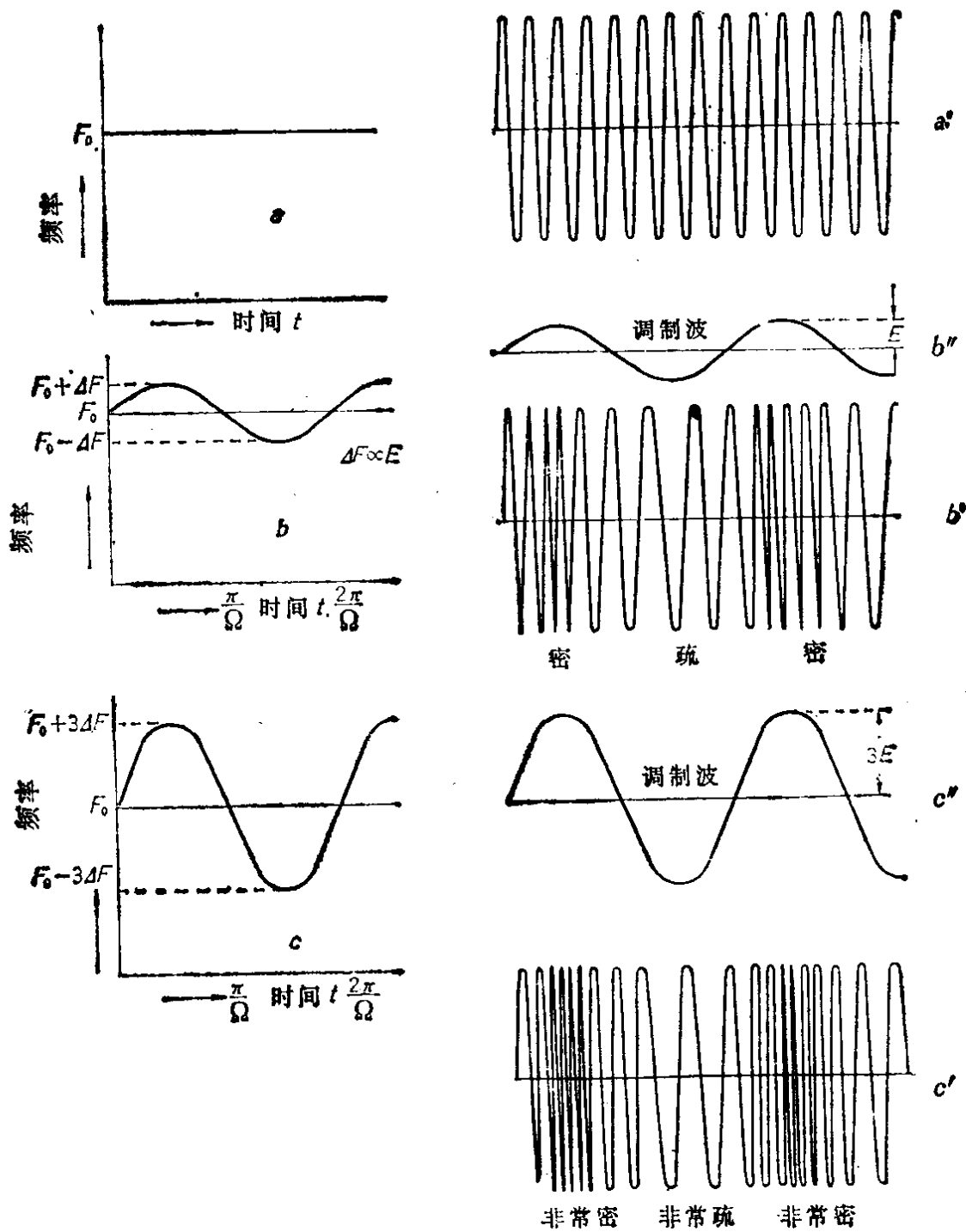


图2-3 调频波的构成

其次, 讨论一下关于调相的情况, 如果图 2-4 (a) 所示为未调制的载波时, 则正如图 (b) 所示, 其相角  $\theta$  是随着时间的增加而增大的。现在, 设载波的频率为  $100\text{kHz}$ , 则相位是每  $1/10^5\text{s}$  增加  $360^\circ$  ( $2\pi$  弧度), 即  $\theta = \omega_0 t$ 。因此, 如图 (c) 所示, 如果用低频率 (例如  $10\text{kHz}$ ) 的正弦波使线性变化的载波相位变化时, 则调相波的瞬时相位为  $\theta = \omega_0 t + \Delta\theta \cos \Omega t$ 。这样, 调相波即可写成

$$i = I \sin(\omega_0 t + \Delta\theta \cos \Omega t) \quad (2-4)$$

式中  $\Delta\theta$  称为最大相位偏移, 单位以弧度 ( $1$  弧度  $= 57^\circ$ ) 表示。在调相中, 相位偏移  $\Delta\theta$  与调制信号的频率无关, 而与其振幅成正比。

如果表示调频波及调相波在时间上的变化情况时, 则如图

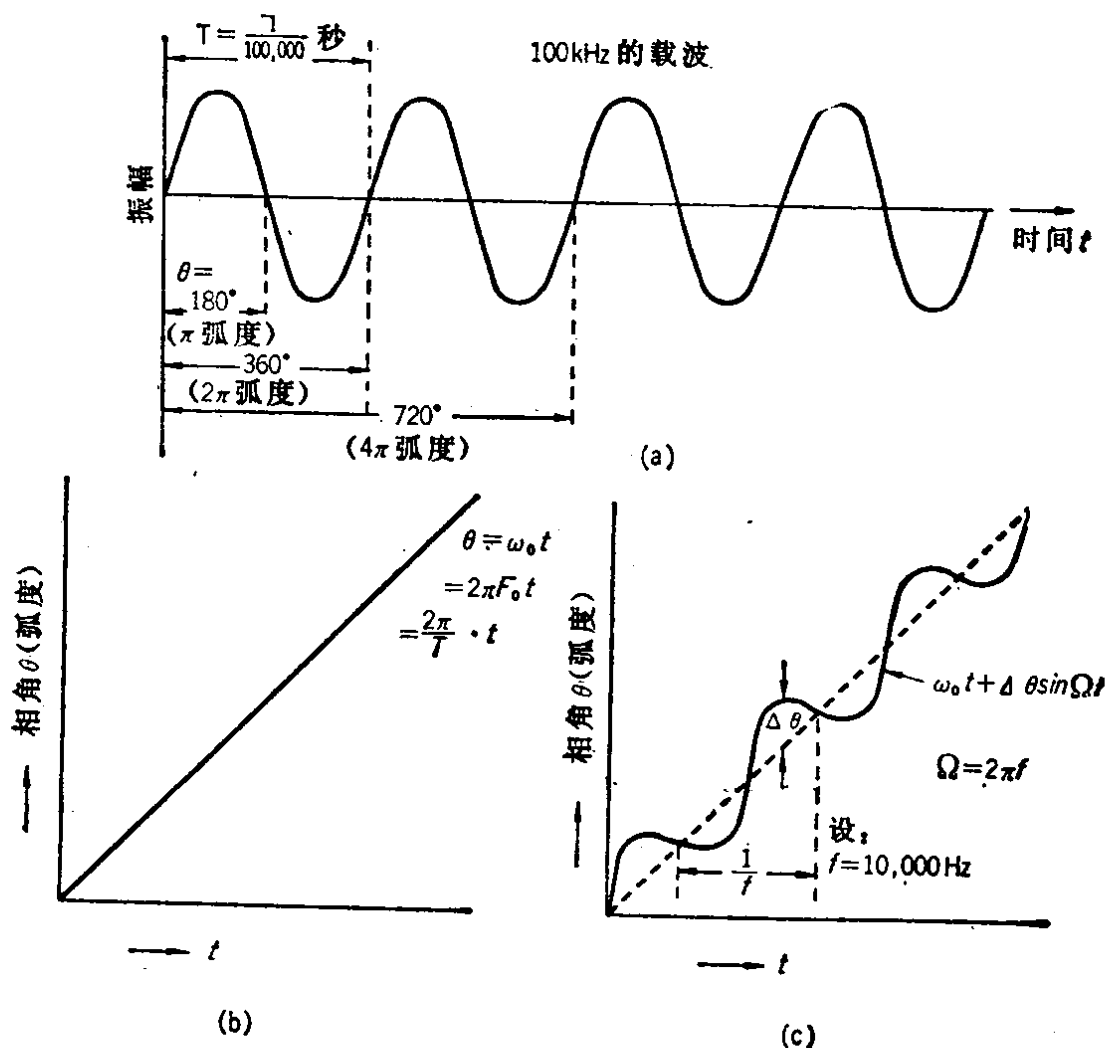


图2-4 调相的说明