

无线电中继通信

苏联 C. B. 包罗吉奇 B. П. 明納申 A. B. 索戈洛夫著

樊昌信等译

钟建安校

人民邮电出版社

无綫电中繼通信

苏联 C. B. 包罗吉奇 B. П. 明納申 A. B. 索戈洛夫 著

樊昌信 吳 宏 馬觉先 譯
钟 建 安 校

人民邮电出版社

РАДИОРЕЛЕЙНАЯ СВЯЗЬ

С. В. Бородин, В. П. Минашин, А. В. Соколов

связьиздат—1960

内 容 提 要

本书介绍了无线电接力通信的基本原理、线路的构成方案、线路的计算原理以及各通路的主要电气特性和其测量方法。

本书重点放在频率划分调制制无线电接力通信制式上，至于时间划分脉冲制也作了简要的讨论。

这本书适合我国有关中等专业学校及大专师生教学参考用，也可供从事微波通信的技术人员阅读。

无 线 电 中 继 通 信

著 者：苏联 С. В. 包罗吉奇 В. П. 明纳申 А. В. 索戈洛夫

译 者：樊 昌 信 吴 宏 马 觉 先

校 者：钟 建 安

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北 京 东 四 条 13 号

(北京市书刊出版业营业许可出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

印张 13 12/32 页数 214

印刷字数 355,000 字

1963 年 10 月北京第一版

1963 年 10 月北京第一次印刷

印数 1—3,000 册

统一书号：15045·总1353—无367

定价：(9) 1.80 元

序

这本教本是按照苏联邮电部教育司批准的邮电技术学校“无线电接力通信”课程教学大纲编写的。

“无线电接力通信”是一门新的课程，最近才开始在各邮电技术学校中开设，而这本书又是这门课程的第一本教本。著者们在编写本书时利用了自己设计国产无线电接力通信设备的经验，以及在电信职工进修班讲课中所得到的教学经验。

在本书中叙述了无线电接力通信的基本原理、无线电接力线路全套设备组成问题、无线电接力线路的计算基础以及通信通路的电气特性和测量方法。

本书重点放在频率复用调制制无线电接力通信制式上，因为此制式最有前途并且已得到了广泛的实际应用。对时间复用脉冲调制制只作简要的讨论，其内容仅限于使学生熟悉本制式的工作原理和设备组成主要特点所需要的范围。

著者们在本书中尽量吸收了苏联和外国作者的许多文章中所包含的有关无线电接力通信理论和技术的丰富材料，以扼要而易懂的方式叙述出来，而不用复杂的数学分析方法。因此，某些理论问题在书中仅作定性研究，好些计算公式只引用而不加推导。

具有足够数学基础并希望更详细地了解所研究的问题的读者，可以参考书末开列的参考文献。

各著者间的分工如下：

引言和第1、2、7、8章由C. B. 包罗吉奇编写；第3章的3.1、3.2、3.8、3.9、3.10、3.11各节和第4章由B. II. 明纳申编写；第5章由C. B. 包罗吉奇和B. II. 明纳申编写；第3章的3.3、3.4、3.5、3.6、3.7、3.12节、第6章、第9章和附录由A. B. 索科洛夫编写；全书由C. B. 包罗吉奇总校阅。

著者

引 言

超短波无綫电接力通信还是电信技术中的一个非常年青的部門。在本世紀二十年代，由于許多国家在建立超短波通信和研究超短波传播方面积累起来的經驗，超短波波段才开始使用。

在研究超短波传播方面，苏联学者 B. A. 維金斯基、A. Г. 阿連貝尔格等人取得了巨大的成就。他們从实验上确立了并且从理論上論証了超短波传播理論的第一批定量关系。

在三十年代，許多国家开始在通信上实际应用超短波，并且創建了第一批試驗綫路。

苏联在 1932—1934 年試制出了使用米波的超短波收发信設備，并創建了莫斯科—卡希拉和莫斯科—諾金斯克試驗通信綫路。

英国在 1932 年建立了卡尔吉夫和凡斯頓两地之間(21 公里)的通信綫路，使用 5 米左右的波长，能保証一条話路的通信。

在 1934 年出現了第一批多路超短波通信綫路：在英国——跨越北海峡的綫路(62.5 公里)，有 6 个話路，使用 4—5 米波长；在意大利——米蓝至康波傑里非欧里的綫路(50 公里)，有 7 个話路，使用 85 厘米左右的波长。

日本在 1936 年建立了跨越津輕海峽的类似綫路(61 公里)，有 6 个話路；英国在 1937 年在爱尔兰和苏格兰之間（培尔法斯特—斯特伦腊尔，56 公里）建立了有 9 个話路的类似綫路。

所有这些綫路还都不是无綫电接力通信綫路，因为它们仅进行两点之間的直接通信，中間不經過轉接。

第一条无綫电接力通信綫路于 1935 年建立在紐約和費城（美国）之間。它有 146 公里长，由两个終端站和两个中继站組成，使用 3 米左右的波长。它能进行 5 条报路和 2 条传真报路的通信。

第一批超短波多路通信綫路的代表性特点是采用頻率复用調幅制。

在三十年代末开始研究建立用来传输电视信号的宽频带线路。为此目的的第一条试验线路于1939年末在美国的霍巴日和利维尔海德之间（50公里）建成，它有一次转接。这条线路使用70厘米左右的波长，能容纳一条带宽约为3.5兆赫的视频通路。在此设备中已采用调频制。

在第二次世界大战时代，德国军队和美国军队都采用了无线电接力通信。德国制成了几种型式的频率复用调频制移动式无线电接力通信设备，使用分米波工作。这种设备可以保证9条话路的军用通信。

在第二次世界大战期间，由于雷达的广泛运用，超高频技术开始有了迅速发展，这就为无线电接力通信技术的改进和发展创造了必要条件。如果说在此以前无线电接力通信线路只用在敷设有有线通信线路不经济的地方，如果说无线电接力通信线路本身还在技术上不完善并且不能在各种指标上与有线通信线路相比，那末，大约从1945年起，先是在美国，稍后在法国和英国，就陆续试制出了种种更完善的无线电接力通信设备，以后又逐步建立了一些能与架空通信线路相媲美的多路无线电接力通信线路。

人们掌握了分米波和厘米波波段，还掌握了各种新的宽频带调制法。

在雷达脉冲技术发展的基础上，制定了无线电接力通信线路的种种脉冲调制新方法和时间复用方法。那时候无线电接力通信采用脉冲调制象是显示出许多优点，所以有一段时间无线电接力通信是循着这条道路发展的。

但是不久就发现了采用时间复用只能得到较少的路数，因此时间复用无线电接力通信线路在通信容量上较频率复用电缆线路大为逊色。

同时，由于超高频技术的种种成就，由于各种新型电子管和定向性天线的诞生，又由于调频技术的改进，成功地创建了频率复用调频制的无线电接力通信线路，它在一切指标上甚至不亚于最完

善的同軸電纜線路。

第一條這樣的線路就是所謂橫越大陸的 TD-2 無線電接力通信線路，它位於紐約和舊金山之間，長約 4,700 公里，已於 1951 年底開放使用。在這條線路上建立了 6 個高頻波道（即使用公共天線的 6 條平行線路），每個波道可以傳輸電視信號或幾百路電話。大多數中繼站是自動化的，不用維護人員而自動工作。

稍晚一些，法國、英國和日本也制成了類似的甚至更完善的無線電接力通信設備。

由於無線電接力通信線路具有比電纜線路更多的優點，它的应用範圍已很廣泛。現在無線電接力通信線路已应用在長途電話通信、電視節目交換、各種生產和業務通信，以及鐵路運輸、煤氣管、石油管等的自動遙控方面。

近幾年來已開始研究利用超短波對流層遠距離傳播的新型無線電接力通信。

在蘇聯無線電接力通信的应用始於偉大的衛國戰爭結束之後。現已創制了幾種型式的國產無線電接力通信設備，並且正為各條大容量干線設計更完善的無線電接力通信設備。一些新建的多路和電視用無線電接力通信線路正在施工。按照蘇聯共產黨第二十一次代表大會所通過的蘇聯發展國民經濟的控制數字，這些線路的總長度在 1959—1965 年內應增至大約 8.4 倍。

顯然，由於無線電接力通信線路比其他各種通信具有重大優點，可以預期，在最近幾年內，無線電接力通信在我國還會更廣泛地發展。這種發展迫使我們不能不培養無線電接力通信方面的專家。“無線電接力通信”課程也應為這一目的服務。

本課程的主要任務在於研究無線電接力通信的原理、無線電接力通信線路的設備構造、計算基礎、設計和技術維護方法。

與其他專業課程不同，“無線電接力通信”課程的內容是較多樣化的，這是由於無線電接力通信線路包括很多種不同的設備：發信機、接收機、天線和饋線、复用設備、自動設備、電源、勤務通

信、監測設備。本課程內容還包括超短波傳播問題和作為无綫電接力通信綫路計算和設計基礎的許多理論問題。此外，在本課程中還研究无綫電接力通信綫路通路的主要電氣特性、其現有標準及這些特性和設備主要參數的測量方法。課程的敘述以一般技術課目（數學）和專業課目（无綫電技術、接收設備、發信設備、電真空器件）的知識作為基礎。

本書的內容編排次序如下：

第一章概述无綫電接力通信的原理、无綫電接力通信綫路的組成、优缺点和应用範圍。這一章將讀者引入本書所敘述的各問題的領域中。

在第二章中討論无綫電接力通信綫路的复用方法和复用設備的構造。雖然复用設備可以不算是无綫電接力通信綫路本身的設備，但是复用方法決定了无綫電設備的構造，而且為了正確理解綫路的工作和對无綫電設備的種種要求，有必要知道复用方法和复用設備的組成原理。

第三章和第四章闡述无綫電接力通信綫路的高頻設備，即无綫電收發設備和天綫饋綫設備。

第五章研究超短波傳播的特點、无綫電接力通信綫路的計算和路綫選擇。

在第六章中敘述勤務通信系統、電源和自動化備用設備，即无綫電接力通信綫路的全部輔助設備。

第七章敘述關於通路各主要電氣特性的概念並介紹國際上對這些特性的建議。關於這些特性和標準的知識是正確設計和維護綫路所必需的。

第八章讲解頻率复用无綫電接力通信綫路的某些理論問題。其中給出了通路中所有各種噪聲的計算基礎及設備主要參數的選擇方法。

第九章說明通路特性和設備主要參數的預防測量及維護測量方法。

目 录

序

引言

第一章 无线电接力通信的一般概念	1
§ 1.1 无线电接力通信的原理	1
§ 1.2 无线电接力通信线路的构成	3
§ 1.3 无线电接力通信的应用范围和主要特点	11
§ 1.4 利用超短波对流层远距离传播的无线电接力通信线路	15
第二章 无线电接力通信线路的复用	17
§ 2.1 线路频率复用法的概念	17
§ 2.2 频率复用设备的构成	21
§ 2.3 K-12型和K-24型复用设备	24
§ 2.4 路数很多的复用设备的构成原理	29
§ 2.5 简化复用设备结构的新原理	31
§ 2.6 无线电接力通信线路的频率复用	34
§ 2.7 时间复用法的概念	37
§ 2.8 脉冲调制的种类	39
§ 2.9 时间复用终端设备的构成	45
§ 2.10 无线电接力通信线路的时间复用	53
§ 2.11 无线电接力通信线路的频率复用法和时间复用法的 应用范围	55
§ 2.12 话路的二次复用	56
§ 2.13 用无线电接力通信线路传输电视节目	58
第三章 无线电接力通信线路的收发信设备	62
§ 3.1 收发信设备的方框图	62
§ 3.2 超高频振荡回路	73
§ 3.3 接收机的输入电路和晶体混频器	86
§ 3.4 接收机的固有噪声	94
§ 3.5 中频放大器	107

§ 3.6 限幅器、鑑頻器和脉冲检波器	118
§ 3.7 終端放大器	127
§ 3.8 超高频振荡器和放大器	134
§ 3.9 超高频振荡器的頻率稳定	156
§ 3.10 中頻功率放大器	165
§ 3.11 調制器	170
§ 3.12 无綫电接力通信綫路的工作頻率分配制度	177
第四章 天綫和饋綫	187
§ 4.1 天綫的參數	187
§ 4.2 同相天綫	190
§ 4.3 拋物面天綫	192
§ 4.4 喇叭-透鏡天綫	196
§ 4.5 喇叭-拋物面天綫	200
§ 4.6 潛望鏡式天綫	201
§ 4.7 同軸饋綫	204
§ 4.8 波导	211
§ 4.9 分向滤波器	219
§ 4.10 鉄氧体波导閘	225
第五章 超短波的传播	229
§ 5.1 无綫电波在自由空間中的传播	229
§ 5.2 考虑地面影响的超短波传播、路綫类型	233
§ 5.3 气象条件的影响	242
§ 5.4 无綫电接力通信綫路的路綫选择和衰减因子的計算	247
§ 5.5 超短波的对流层远距离传播	256
第六章 无綫电接力通信綫路的輔助設備	259
§ 6.1 勤务通信	259
§ 6.2 备份自动轉換裝置	264
§ 6.3 无人維護站。遙示和遙控	267
§ 6.4 检查設備	269
§ 6.5 电源	271
第七章 无綫电接力通信綫路的通路电气特性	276

§ 7.1 传输电平、衰减和增益	276
§ 7.2 话路的主要电气特性	280
§ 7.3 话路和广播通路主要电气特性的标准和建議	288
§ 7.4 多路无线电接力通信线路群路的主要电气特性	294
§ 7.5 无线电接力通信线路中电视通路的主要电气特性的 标准和建議	295
第八章 频率复用无线电接力通信线路的计算基础	303
§ 8.1 无线电接力通信线路各通路中的热噪声	303
§ 8.2 热噪声的积累	311
§ 8.3 多路消息的主要特性	315
§ 8.4 非线性串话噪声概述	318
§ 8.5 群路部件中的非线性串话噪声	319
§ 8.6 高频系统各部件中的非线性串话噪声	328
§ 8.7 天线馈线系统各部分中的非线性串话噪声	334
§ 8.8 限幅器的影响	339
§ 8.9 非线性串话噪声的叠加	343
§ 8.10 线性失真	347
§ 8.11 多路无线电接力通信线路各设备主要参数的 确定方法	352
§ 8.12 无线电接力通信线路的计算	363
第九章 主要的维护测量和预防测量	374
§ 9.1 测量的性质和目的	374
§ 9.2 话路主要特性的测量方法	375
§ 9.3 线路群路主要特性的测量方法	379
§ 9.4 电视通路主要特性的测量方法	383
§ 9.5 高频设备特性的测量和检查方法	384
附录 苏联«P-600»型及«P-60/120»型无线电接力通信 系统的主要规格	406
参考文献	414

第一章 无綫电接力通信的一般概念

§ 1.1 无綫电接力通信的原理

无綫电接力通信是一种多次中继的超短波无綫电通信的特殊形式。

超短波包括波长短于 10 米（相当于频率高于 30 兆赫）的无綫电波。和超短波波段相当的频带是非常寬闊的。例如，自 10 米至 1 厘米的波段（不包括毫米波波段）的频帶寬度是 29,970 兆赫，而长波、中波、中短波和短波波段（自 30,000 米至 10 米）的总频帶寬度仅有 29.99 兆赫，即几乎为超短波波段的千分之一。由此可見，与較长波波段相比，超短波波段可以容納数量多得多的无綫电台工作而不致互相干扰。

但是采用超短波来通信并不仅是由于这一个原因。更重要的是，使用超短波的无綫电发射设备和接收设备的通頻带容易做得很寬。如所周知，单振盪回路通頻帶寬度与其諧振頻率之比 $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q}$ ，其中 Q 是回路的质量因数。通常，各种无綫电設備中所用的回路，这个比值不超过百分之几（1—3%）。因此，在回路的质量因数相同的情况下，如果使用 1000 米的波长，回路帶寬能达 3—9 千赫，那末在使用 10 厘米的波长时，回路帶寬就能达到 30—90 兆赫。因此，使用超短波就能够傳輸頻帶很寬的信号，例如电视信号或多路电话信号。

应当注意，就算能制成通頻带足够寬的无綫电发信設備和接收設備，要使用更长的波长来傳輸这种信号也是不可能的。例如，假設要求使用长于 20 米的波长来傳輸頻帶寬度 10 兆赫的信号。这个帶寬相当于波长自 150 米至 25 米，即包括了中短波和短波波段。这些电波的傳播条件完全不同，所以，就算能够实现这种信号的传

輸，它也将伴随有不能容許的失真。

超短波波段的另一个重要特点是，在这个波段上几乎沒有外界干扰（天电干扰和工业干扰）。超短波波段中唯一存在的一种干扰是无綫电接收机中电子管和电阻的固有噪声。

超短波天綫方向性强而尺寸不大，因为在天綫面积不变的情况下，方向系数与波长的平方成反比。实际采用的厘米波天綫的增益系数达到 40 分貝，或功率增益 10,000 倍。这就是說，使用这种天綫工作的、功率为一瓦的发信机在接收点产生的場强，与使用无方向性天綫的、功率为 10 千瓦的发信机产生的場强相同。

这样看来，采用超短波通信可以获得下列优点：

1. 傳輸頻带很寬的信号（多路电话信号、电视信号）；
2. 沒有外界干扰；
3. 由于采用定向天綫，能够以小功率发射机实现稳定的通信。

但是超短波通信也有它的缺点，就是距离有限。超短波特别是分米波和厘米波，不能自电离层反射并且很难繞过障碍物，所以使用这些波长的无綫电通信距离是有限的。当发射机的功率較小时，使用分米波和厘米波，只有在視距范围内，即在联接两通信电台的天綫的理想直綫上沒有任何障碍物（例如地面凸起、森林、各种建筑物等）时，才可能有稳定的通信。在視距范围以外，場强随站間距离的增大而很快地下降，通信就变得不可靠了。米波（波长长于 3—4 米）通信在有利条件下，依靠大气电离层的反射，距离可能較大些。

由于电波传播的这种特点，超短波远距离通信只有借助于信号的多次中继，即利用无綫电中继綫路（或叫无綫电接力綫路），才有可能。

无綫电接力通信綫路是一系列无綫电收发信台，它們互相間的分布距离使每两个相邻电台之間有稳定的通信（例如相邻电台的天綫之間为直視距离）。自第一站发出的信号由第二站接收，經过放大再发送到第三站，这样直到它为綫路另一端的最后一站接收为

止。

“无綫电接力”綫路这个名称来源于英語的 relay 一詞，它是替換的意思（例如驛馬的替換，接力賽跑中運動員的替換等等）。由此顧名思義，可知无綫电接力通信綫路中每个中繼站的再發信號，就象是这个站把收到的弱信號換下，而代以一个新的強信號發送到下一站去。

§ 1.2 无綫电接力通信綫路的構成

图 1.1 是无綫电接力通信綫路的方框图。在綫路的第一个終端站 $OC-A$ 上裝設接有天綫的發射机 $пер$ 和接收机 $пр$ 。發射机所產生的信號自發射天綫發射，為下一中繼站 $ПC-1$ 的接收天綫所接收。在這裡，收到的信號進入接收机，在接收机中被放大，再加到同一站的發射机上。然後信號送到下一站 $ПC-2$ ，……直到最後的終端站 $OC-B$ ，在這裡信號為接收机所接收。自 $OC-B$ 至 $OC-A$ 的反向信號傳輸也以同樣的方式進行。

兩個終端站的發射机所產生的振盪，各受加在第一站 $a-a'$ 點和最後一站 $B-B'$ 點上的要傳遞的消息所調制。在終端站的接收机中信號被解調，然後被傳遞的消息的電流分別進入 $б-б'$ 點和 $з-з'$ 點。

這樣，上述在 $a-a'$ 點和 $б-б'$ 點之間以及 $б-б'$ 點和 $з-з'$ 點之間的无綫电接力通信綫路，就等效於联接 $OC-A$ 站和 $OC-B$ 站的四綫綫路。

由於通頻帶很寬，无綫电接力通信綫路能夠用以同時進行若干路通信，例如同時傳輸若干路電話。這種綫路利用法稱為綫路复用。為了无綫电接力通信綫路的复用，在其終端設有所謂复用設備 (AY)^①。它與終端站的發射机和接收机相联接。在复用設備的發送部分中，自長途交換机來的各路話音電流結合為总的合成信號，

① 一般就是我們通常所說的載波机——譯者

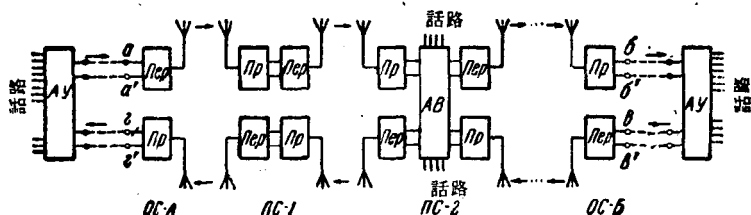


图 1.1 无綫电接力通信綫路的方框图

加到終端站的发射机上，去調制发射机所产生的高频振盪。

在綫路的另一端，收到的高频振盪在接收机中解調，由接收机輸出端輸出合成信号，送到复用設備接收部分，在那里分解为各路話音电流。綫路的复用就实现了所謂多路通信。此时每一个被傳輸的消息（例如电话）沿它自己的通信电路傳輸。保証将这个消息自一終端傳輸至另一終端的所有設備的总和称为通信电路（简称通路）。

利用复用設備，在一条无綫电接力通信綫路上能够构成大量的（几十个甚至几百个）通路。每个通路能用以傳輸电话、电报或作其他什么用途。

在无綫电接力通信綫路的各个中继站上，也可以分出一部分話路来。为此，在有此需要的中继站（例如图1.1中的中继站ПЧ—2）中設有專門的分路設備（AB），接在接收机和发射机之間。利用这种設備把自終端站 OC—A 来的話路分出一部分，并且另行插入一些新話路通向 OC—B 站。

复用綫路的寬頻带支路，即自 $a-a'$ 点至 $б-б'$ 点或自 $в-в'$ 点至 $z-z'$ 点（图 1.1）的支路，称为綫路的群路，因为在这一段里以复用方法构成了許多（一群）通信电路。

当傳輸頻带很寬（达 6 兆赫）的电视信号时，无綫电接力通信綫路通常就只包括一个通信电路。这时电视的視頻信号自信号源（例如电视台机房）直接加至終端站 OC—A 的发射机調制器上，

(加在 $a-a'$ 点上)。在线路的另一端，电视信号自 $OC-B$ 站的接收机输出端 ($b-b'$ 点) 送达用户 (例如本地的电视发射机)。在线路的各中继站上，电视信号可以自接收机解调器的输出端分出，用以调制本地的电视转播发射机。

有时用一条复用线路同时传输电视图像信号和伴音信号。这时线路就包括两个通路。

无线电接力通信线路的复用方法和复用设备的构造将在第二章里叙述。

为了增大线路的通信容量，往往在电路上组织几个所谓高频波道。每个高频波道由一系列收发信设备构成。实际上每个高频波道就是一条独立的无线电接力通信线路。每一站上安置着与高频波道数目相当的几套无线电收发信设备。所有这些套设备使用不同的波长，但天线却是公用的。图 1.2 表示由三个波道组成的无线电接力通信线路的方框图。利用专门的分向滤波器 Φ ，就能把工作频率不同的几部发射机或接收机联接到一付公共天线上去。

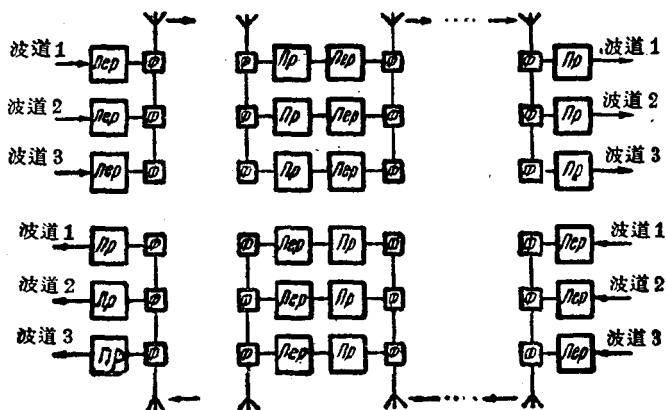


图 1.2 由三个波道组成的无线电接力通信线路的方框图

当设计和建造无线电接力通信线路（特别是使用分米波和厘米波的线路）时，通常力求使每两个相邻站的天线在视距范围内。因

此，为了增加站間距离，就把天綫安装在高的杆子或塔上。通常在中等起伏地或平原上，中继站之間的距离为 40—60 公里，而塔高 70—80 米。在山区安装天綫往往根本不需要天綫塔，而站間距离在有利条件下能增至 100—150 公里。

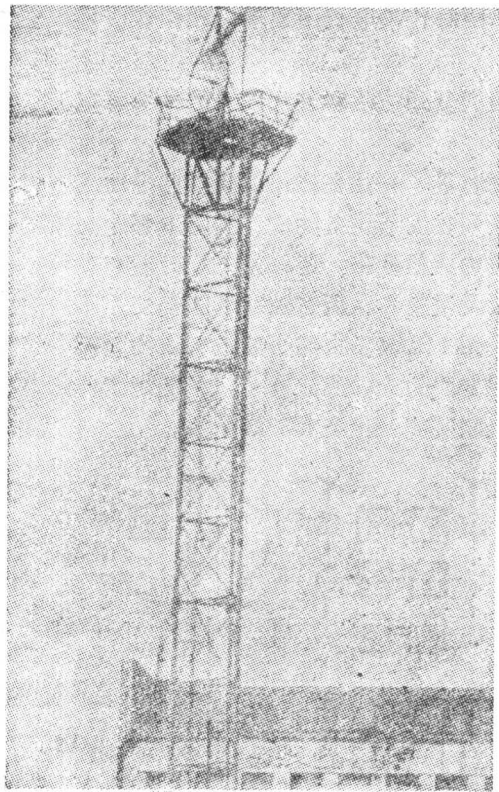


图 1.3 使用抛物面天綫的无綫电接力通信綫路終端站的全貌。天綫和机房間用同軸饋綫联接

无綫电接力站的设备安置在不大的专门建筑中。建筑物近旁架設着金属杆或塔，頂部装着天綫(图 1.3 和 1.4)。天綫与无綫电设备的联接使用专门的高頻饋綫、同軸電纜或波导。有时为了縮短高頻饋綫，在每个站上建設一个专门的混凝土塔，把收发信设备安装在塔的上层，把天綫安装在塔頂(图 1.5 和 1.6)。塔的下层用以安装輔助设备(电源设备等)(图 1.7)和作为维护人員的住室。

在无綫电接力通信綫路上主要采用四种定向天綫：抛物面天綫、喇叭透鏡天綫、喇叭抛物面天綫和潜望鏡式天綫。每一个終端站需要两个天綫（接收天綫和发射天綫），而中继站需要四个（图 1.5 和 1.6）。常有把一个天綫既作发射用也作接收用的，在这种情况下每个站的天綫数目