

无线电中继通信概说

苏联 H. M. 依久莫夫著

朱庆璋 刘国雄译

人民邮电出版社



无线电
技术知识
丛书



無線電中繼通信概說

(苏联) H. M. 依久莫夫 著

朱 庆 璋 刘 国 雄 译

人 民 邮 电 出 版 社

Н. М. ИЗЮМОВ
РАДИОРЕЛЕЙНАЯ СВЯЗЬ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1962

内 容 提 要

本书介绍近代无线电中继通信的运用范围、设备的组成和无线电中继站的工作原理，叙述了实现大站距无线电中继通信的可能性。

本书适于有一定基础知识无线电爱好者阅读。

无 线 电 中 继 通 信 概 說

著 者：（苏联）Н. М. 依久莫夫

譯 者：朱 庆 璋 刘 国 雄

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 048 号）

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1965 年 2 月北京第一版

印张 3 20/32 页数 58

1965 年 2 月北京第一次印刷

印刷字数 81,000 字

印数 1 6,650 册

统一书号：15045·总1450—无414

定价：（科 4）0.40 元

DT97/10

序 言

目前无綫电中继通信已經在各种通信方式中占据着相当重要的地位。六十年代以前，对它的性能已进行了大量的理論研究和广泛的实验；拟訂出了无綫电中继綫路的技术設計方法，研究了它的建設和維護的經濟問題，提出了根据綫路的不同用途和对于不同地区选择最合适的設備和建筑物的許多建議。

无綫电中继通信技术目前正在繼續发展。同其他許多技術部門比較起来，它的发展速度比較高，跃进比較大。这只要看看下面的事实就足以說明，为了滿足无綫电中继通信的技术要求，已經研究出了将信号分层（量化）的方法，这些方法同时也为其他通信方式开辟了新的远景。此外，也恰恰是在无綫电中继系統的基础上提供的經驗，为利用超短波在对流层和电离层中的散射現象的远程通信創造前提。在极限距离上，提高通信可靠性的欲望，促进了各种低固有噪声放大器——行波管放大器和参量放大器的研制。最后，已經實現了的人造地球卫星发射，为建立利用卫星轉发器的超远程无綫电中继綫路提供了可能性。

由于上述情况，特出版《无綫电中继通信》一书的第二版（本书的第一版于1954年出版，是大众无綫电丛书之一）。本书經過了彻底的修訂，刪去了或大大压縮了对近年来无綫电綫路沒有代表性的問題，而增加了一些現代的和有发展前途的設備的資料。

著者

目 录

序言

第一章 无綫电中继通信的原理和波段	1
第二章 站間距离·超高频远程通信	11
«直視»站	11
对流层通信	14
电离层通信和流星余迹通信	23
利用人造地球卫星和人造反射层的通信	28
第三章 无綫电中继綫路的頻率复用	36
复用的任务和方法	36
頻率复用的原理	37
无綫电綫路頻率复用的特点	44
第四章 无綫电中继綫路的时间复用	48
时间复用的原理	48
时间复用设备	56
第五章 脉冲調制的方式	68
脉冲相位調制	68
脉冲編碼調制	73
关于脉冲差調制的概念	81
第六章 射頻设备主要部分	84
天綫设备	84
无綫电发射机	87
无綫电接收机	92
第七章 中继方式	96
頻率复用綫路的中間站	96
时间复用綫路的中間站	101
第八章 无綫电中继綫路的应用范围和可靠性問題	103

苏联的无线电中继线路	103
无线电中继线路的长度及其作用的可靠性。小型化問題	106
結束語	110
参考文献	111

第一章 无綫电中继通信的原理和波段

《无綫电中继通信》这个概念是同《无綫电直接通信》的概念相对而言的。采用无綫电直接通信时，通信一方的无綫电信号直接为通信的另一方所接收。而采用无綫电中继通信时，通信一方的无綫电信号順次为設置在兩方之間綫路上的一些中間站（或称輔助站）所接收、放大、并自动轉发到通信的另一方。两个終端站与一个或几个中間站組成一个完整的无綫电中继綫路。中继这个名詞来自英文的《relay》，即替換的意思（就好像在铁路綫各段上火車头的替換一样）。信号的接收、放大和再輻射过程叫做中继，因此，中間站也叫中继站。图1是无綫电中继綫路的示意图。

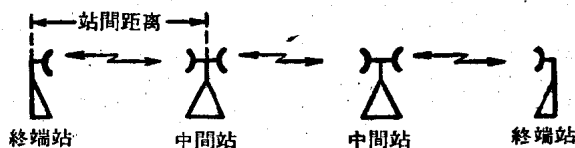


图 1 无綫电中继綫路的示意图

按理說，地球上任意兩点之間都是可以實現无綫电直接通信的，那么为什么又要設中間站呢？事情是这样的，因为无綫电中继綫路只适于采用超高频，即超短波（厘米波、分米波和米波——后者很少采用）。这种波的基本能流是直綫传播的，它几乎不能繞过地球面和障碍，也不能在电离层中折射（《长的》米波除外）。这就是說，小功率的超高频无綫电台只能在双方天綫之間具有直綫（几何的）視界的情况下，即在連接两天綫的直綫上沒有障碍的情况下，才能保持通信。从这里可以了

解，要想在超过直線視界的距离上实现超高频无线电通信，就必須在路綫上設置中間站（中繼站）。

这样虽然使无线电綫路复杂一些，但却是值得的，因为超短波无线电通信同短波或长波无线电通信比較起来有許多重大的优点。

超短波无线电通信的第一个优点是能够沿綫路传送大量的消息（例如可以开通許多路電話）。这很明显，因为通路数目与通帶宽度成正比，而通帶宽度本身則几乎与无线电綫路的載頻成正比，即与波长成反比。

超短波的第二个优点是它的天綫在通信方向上具有較高的方向性。天綫的方向性取决于天綫設備的尺寸与波长之比。这就是說，分米波和厘米波容許在天綫設備的尺寸比較小的情况下将信号集中成很窄的一束电磁波輻射出去和接收下来。因此，无线电中繼綫路发射机的功率比較小（几瓦），而外界干扰对接收机的作用被大大削弱，唯一的干扰源几乎就是接收机的内部噪声。

最后，在保持視綫范围的情况下，超短波无线电通信还有一个优点，就是它的稳定性，即收信机信号电平恒定，同昼夜時間、季节和其他外界条件无关。

由于有上述优点，无线电中繼綫路在技术經濟指标上可以与有线通信的电纜綫路相比拟。厘米波无线电中繼綫路能达到的通过能力不比同軸电纜干綫电路的通过能力差；这两种綫路都可以《复用》几百路，甚至几千路電話，或传送一个电视節目。无线电中繼綫路的電話通路在质量方面（即沒有失真和干扰，信号电平稳定），可以滿足同优质电纜綫路一样高的要求。

无线电中繼通信的中間站設備比电纜綫路的增音站設備复杂得多。但是，在同軸电纜綫路中，每 6 公里就要設一个增音

站，而无线电中继站间的距离（在天线支柱足够高，设置位置适当时），平均可达 50—60 公里。这就是说，在一条相当长的路线上，无线电中继站的数目大约是电缆增音站数目的十分之一。无线电中继线路的电源功率比电缆线路大。

无线电中继通信的一个很大优点是节省有色金属——铜和铅，因为这两种金属是制造电缆中消耗量最大的材料。

最后，无线电中继线路的建设比电缆线路的工期短、费用低。当通过沼泽地带、山岩地区或通过江河湖泊阻隔的地带建设通信线路时，这个优点就表现的尤为明显，因为在这些地区敷设电缆的费用很大。

图 2 表示具有一次中继（即有两段线路）的无线电中继线路的结构图。这线路的每一个终端站都是由连续工作的一部发信机和一部收信机组成，能够同时发送和接收。很明显多路线

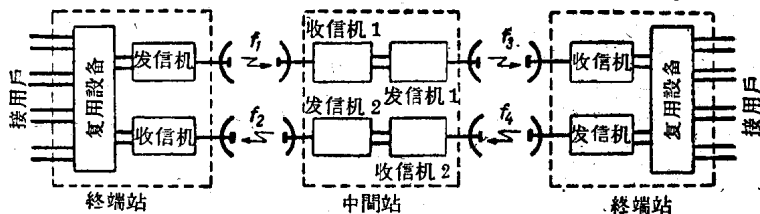


图 2 具有一次中继的无线电中继线路

路需要这种「双工」通信，只要考虑一下，终端站的用戶中一些在发话，同时另一些在收听，就可以理解这一点。发送和接收分别采用不同的频率（不同的波长），因此，该站的发信机不会干扰收信机的工作。虽然图 2 所表示的发送天线和接收天线是分开的，但是在实际结构上有时共用一个反射器。

在终端站中还有复用设备，用户电话机电路通过交换机接至复用设备上。用户的通话电流由复用设备变为合成信号，调

制发信机的振蕩。收信机收下来的振蕩經過检波后也变为合成信号，再由复用設備还原为通話电流，并按相应的用戶电路将通話电流分开。

中間站有两部发信机和两部收信机（以便双向中繼）。收信机 1 調諧于传来的信号頻率 f_1 。收下的信号經過放大后直接控制发信机 1，然后用頻率 f_3 将同一信号向另一終端站的方向发射出去。收信机 2 調諧于从右边传来的信号頻率 f_4 ，控制发信机 2，后者用頻率 f_2 将同一信号轉发出去。

无綫电中繼綫路的发信机和收信机所調諧的頻率，从該种型号設備的总頻段中选择，选择时应使每站的收信和发信頻率之差足够大，以便使收信机的滤波器足以抑制来自本站发信机的干扰。至于无綫电中繼站所采用的頻段，根据欧洲国际協議規定，在分米波波段中为 460—470、1300—1600 和 1700—2300 兆赫，而在厘米波波段中为 3500—4200、4400—5000、5925—8500 和 9800—10000 兆赫。較长的（米）波，只能在通信路数較少而又是“被挡住”的路綫上，即相邻两站天綫之間沒有直綫視界的路綫上采用，因为这种波能够繞过不大的障碍。短于 3 厘米（高于 10000 兆赫）的无綫电波則不宜用于长距离的地面通信，因为这种无綫电波的能量很容易被雨滴所吸收（而更短的无綫电波則会被气体分子所吸收）。

从上面列举的頻段中选用工作頻段时，要保証滿足給定路数所需要的通帶。但是，这还远不是选择无綫电中繼設備頻段的唯一根据。

此外，还应考虑电真空器件的选择是否可能，設備制造是否方便以及其他技术經濟因素。

必須指出，从分米波过渡到厘米波时，要預先解决許多复杂的問題。例如，分米波振蕩級和放大級中采用的是三极管

(金属陶瓷管或灯塔管)。这些电子管不宜用于厘米波。只有采用速調管和行波管，才能解决厘米波无綫电中继綫的电真空器件問題。

天綫设备的增益系数取决于它的方向性，采用厘米波比采用分米波时容易获得較高的天綫设备的增益系数；当給定了天綫设备的增益系数数值时，厘米波天綫的尺寸可以做得小一些，这对抗风是有利的。举例來說，假定天綫輻射的「主束」需要集中在 1° — 2° 的立体角內，很明显，就必须使天綫准确地对准对方，在这情况下天綫的风摆动角应当更小一些，这只有在天綫设备的尺寸很小时才比較容易实现。

厘米波波段尽管有这些优点，但是在天綫系統与收、发信设备的耦合方面却有許多困难。大家知道，在采用米波和分米波时，天綫装在高处，收、发信设备装在地面，天綫与收发信设备一般用同軸电纜相連。有时还可以用更简单的連接方法——用单导綫的「表面波傳輸綫」連接。

图3表示从同軸电纜到单导綫傳輸綫的过渡设备以及从这过渡设备引出的导綫。过渡设备是一个与电纜外

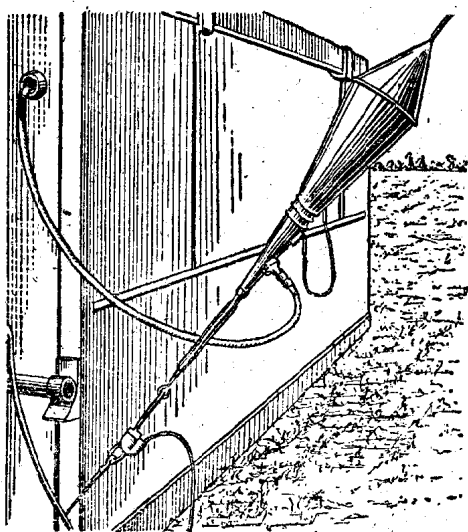


图3 从同軸电纜到单导綫傳輸綫的过渡设备

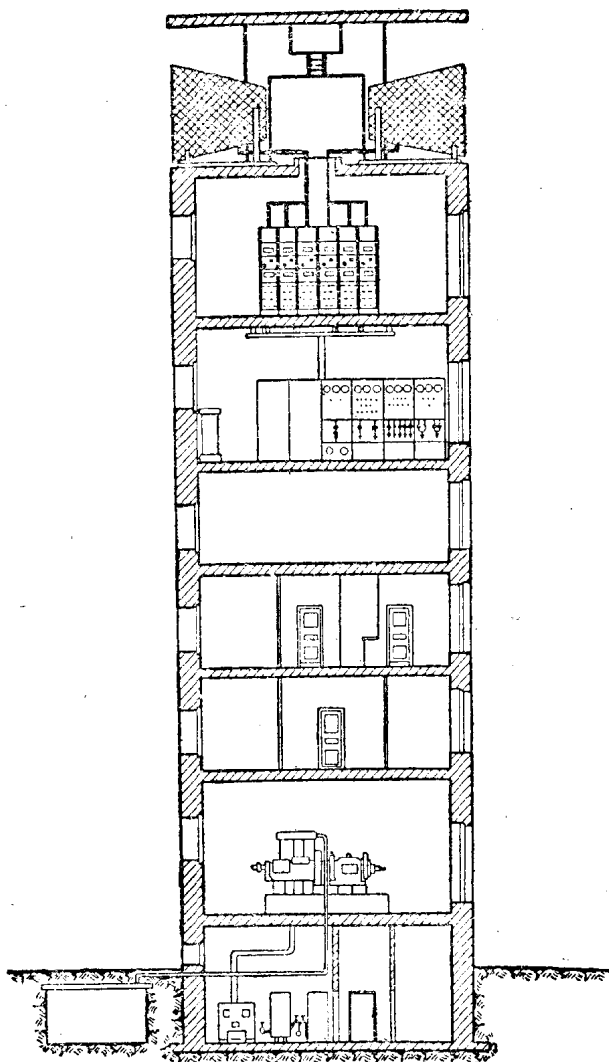


图 4 在混凝土塔中的无线电中继站

皮相連的金属喇叭，上部用介质錐体封閉，以防灰尘。而单导綫傳輸綫則与电纜心綫相連。

但是，采用厘米波时，在同軸电纜和单导綫傳輸綫中能量損耗都相当大，所以采用这种饋綫就非常不利。厘米波天綫与收、发信设备的連接可以采用波导。由于在固定的无綫电中继綫路中各站都設有专门的高塔（金属的或混凝土的），高达100米，塔頂有机房和天綫平台，所以采用波导饋綫是比較容易的。

图4是这种塔的剖面图：地下室是油料燃料的貯藏室；第一层是柴油发电机房（通常作为备用电源）；第五层安装整流器和配电设备；最頂上一层安装收、发信设备；天綫设备則装在这个塔頂的平台上。所以从最頂层到天綫的波导就很短。

如果天綫支柱是金属塔，而收、发信设备装在地面，則采用所謂潜望鏡天綫系統，以避免采用长饋綫。图5表示B. Д. 庫茲聶佐夫为苏联无綫电中继綫路所提出的潜望鏡天綫系統的組成和工作原理。喇叭天綫装在机房內，与收、发信设备靠近，用很短的饋綫与这个收、发信设备相連。发信时这喇叭天綫将无綫电波輻射到一个凹度不大的金属下鏡的表面上。这个金属反射鏡装在塔的下面，与地平面成 45° 角。下鏡将无綫电波向上反射，并将其能量集中在塔頂的另一个金属平面鏡的表面上，这平面鏡也与地平面成 45° 角。无綫电波經再次反射后，經地面上空向通信对方发射。因此这种饋綫系統的作用原理同光学潜望鏡的作用原理相类似。收信时在这种天綫设备中无綫电波的路程与发信时方向相反：即首先从通信方向到上鏡，然后經下鏡再到喇叭口。

上面是选择无綫电綫路波段的最主要的根据。但是人們还在繼續探索是否能开拓短于3厘米的波段供通信用。例如，貝

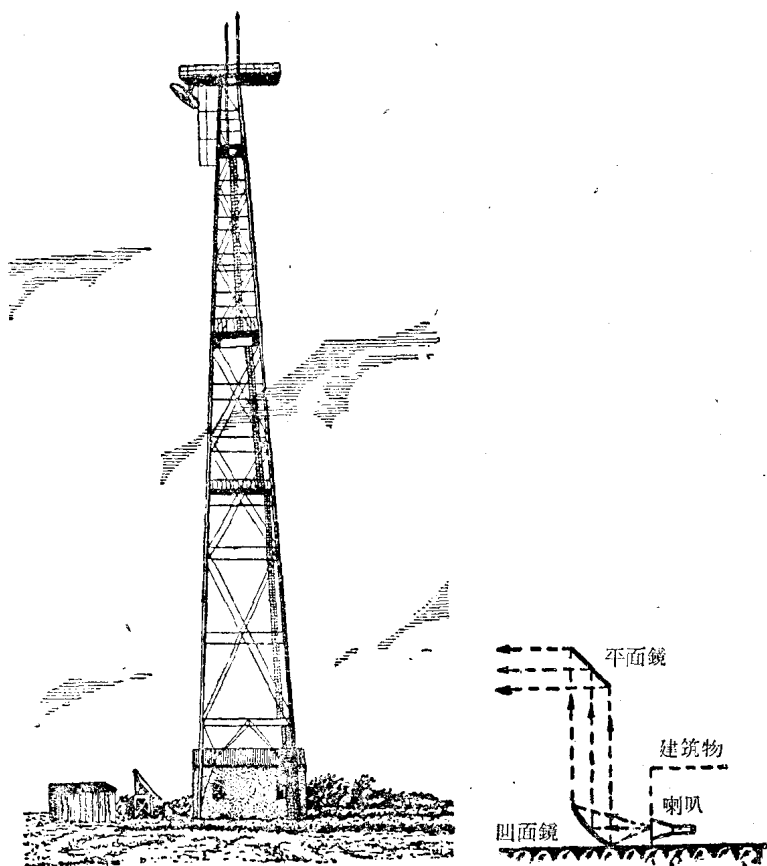


图 5 潜望镜天线系统和它的工作原理

尔公司（美国）建造了频率为11000兆赫的($\lambda < 3$ 厘米)无线电中继线路。但是这种线路只能当作超载市内电缆线路的附加线路，供短距离传送多路电话和电视信号用。这种线路的缺点是，当路线长度为36公里时，在下雨天信号杂音比就显著变坏。

多年以来，人们就已经在研究是否能用更短的波进行通信，

不过这种波并不是能在露天的空間內传播，而是在圓截面的波導內传播。近几年来，国外刊物上曾报导了关于用鋁綫繞制軟波導樣品的研究。在制造这种波導时，首先将鋁綫繞成螺旋狀，然后包上密封鎧裝，以便埋設在土壤中。这种波導綫路适用于毫米波。毫米波在波導中形成的电磁場結構，使电磁場传播时在波導內壁的表面上产生比較弱的电流，即引起比較小的損耗。这种綫路的通帶寬度达 80,000 兆赫，因此能传送 400 个电视节目或几十万路电话。由于信号在波導中有衰减現象，故沿綫路每隔 32 公里应設一个中間放大器（轉发器）。波導通信綫路一方面可以看成是電纜綫路的微波化形式，另一方面也可以看成是一种管道能流式的、通帶最寬的无线電中继綫路。波導通信綫路的經濟和技术远景还没有全面了解。

最近人們在研究是否能用紅外綫波段和可見光波段实现多路通信。这些研究同不久前发明的量子振蕩器和放大器有关。

这里用最簡短的几句话向讀者介紹一种量子放大器的工作原理（图 6）。放大器內的工作物质是掺有鉻离子的人造紅宝石

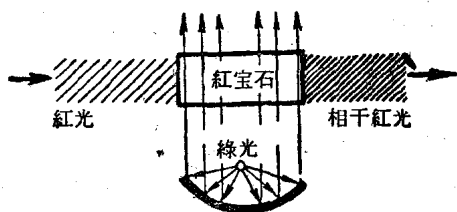


图 6 光量子放大器的工作原理

晶体（刚玉）。鉻离子可以有三个能級，在正常条件下，大部分离子处于低能級。在外界能源的作用下（普通的綠色光可作为这种外界能源），这些离子可从低能級跃迁到高能級上去。但处在这种状态下的鉻离子是不稳定的，它又会自动地从高能級回到中間能級。当它再继续从中能級回到低能級时，则会辐射出紅色光来。不过后面这一跃迁是困难的，只有在外力冲击作

用下才能实现。

当红宝石晶体中的铬离子处于中间能级时，如果以微弱的红色光线照射这个红宝石，那么当红光通过晶体时，就会使离子从中间能级回到低能级。这时由于离子固有能量的发射，红光光波的能量将会增加。这就是说，红宝石棒利用绿光的能量起了红光放大器的作用。

振荡频率约为 4×10^8 兆赫的已放大红色光具有一种卓越的性能，叫做相干性，即在光束的整个截面内，各振荡的相位是相同的，也就是说，各光线是相互平行的。产生这种现象的原因，是因为每一个铬离子均以一定的振荡的形式辐射能量，这些振荡的相位与被放大的光波的相位的关系是固定不变的。

实际上，要想使各光线完全平行是不可能的，不过这种辐射的方向性毕竟比厘米波天线的方向性高得多。例如，一束从量子放大器辐射的光线在距离 40 公里的地方只有 70 米的直径！换句话说，方向图的立体角已不是用几度，而是用几十秒计量了。

目前人们正在研究如何用多路电信号调制相干光以及在接收端将光线解调的方法。由于光波的载频很高，因此可以传送大量信息（例如可传送几千个电视节目）。但这种线路主要还是在宇宙通信方面（大气层范围以外的通信），因为在大气层中由于水分和灰尘的存在，光的吸收非常严重。

第二章 站間距离 · 超高頻远程通信

《直 視》 站

为了节约无线电中继线路的建设費用和维护費用，关于站間距离的大小問題自然具有最重要的意义。如上所述，正常的要求是在相邻两站的天綫之間需要有直綫視界。随着距离的增大，地球的凸起就不可避免地成为直綫視界的障碍（地球的半径約为6000公里）。十分清楚，天綫架設得越高，站間距离就越大。假設地球表面是个理想球面，两端天綫的高度均为 h （以米計），那么两天綫之間的直綫視界距离不超过值 $d \approx 7.2\sqrt{h}$ （以公里計）。

例如，两天綫塔的高度为 49 米时，对塔上所装的天綫來說在距离 $d \approx 7.2\sqrt{49} = 51$ 公里的范围内能保持直綫視界。如果高度 h 增加一倍，站間距离只增加到 1.4 倍，但建筑物的造价却增加很多。实用上天綫塔的高度一般不超过 100 米，直綫視界距离在现实条件下平均为 40—60 公里。

当相邻两站間有山岭、小丘、高地，以及森林、堤坝、建筑物等等时，无线电傳輸条件发生很大的变化。如果这种障碍物遮住了直視綫，即《堵塞了》路綫，就会破坏通信或削弱信号。如果将天綫安装在高地上，那末站間距离即可增大。例如，有些无线电中继线路的中继站設置在海峡两边的陡峭岩岸上，彼此相距110—150公里，就可以保持直綫視界，采用小功率发射机就可以在分米波段实现正常的通信。此外，将天綫架設在高地上，可以降低天綫塔的高度，从而縮短建設期限和降低造价。

从这里可以看出，仔細地进行无线电綫路的地形研究，具