

高等学校教学用书



天 綫

A. A. 畢斯多里哥斯著

高等教育出版社

高等学校教学用书



天 綫

A. A. 畢斯多里哥斯著
周 銳 佟文安 賈惠卿譯
吳鴻鈞 刘 懋 恆 校
蕭 篤 墀 張世璜復校

高等教育出版社

本書系根据 1947 年苏联国立电訊書籍出版社 (Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио) 出版的畢斯多里哥斯 (А. А. Пистолькорс) 著“天綫” (Антенны) 一書 1947 年版譯出的。原書經苏联前人民委員會議高等教育委員會審定為通信高等工業學校用教科書。

書中首先介紹了高頻傳輸系統及無線電波輻射的理論，然後系統地講述長波、中波、短波和超短波天綫的理論和實際，最後再介紹一些實用上維護的知識。本書可作為高等工業學校無線電工程系的教科書，並可供無線電工程師、技術員參考之用。

本書系由周銳、佟文安、賈惠卿翻譯，吳鴻鈞、劉懋恒校。

本書復校工作由本社聘請蕭萬燁、張世璠兩位同志擔任。

天 綫

А. А. 畢斯多里哥斯著

周 銳 佟文安 賈惠卿譯

高等教育出版社出版 北京琉璃廠 170 號

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 051 號)

京華印書局印刷 新華書店總經售

統一書號 15010·643 開本 850×1168¹/₃₂ 印張 16 插頁 4 字數 386,000 印數 0001—1,700
1953 年 4 月第 1 版 1953 年 4 月北京第 1 次印刷 定價 (10) ¥ 2.80

序 言

本書系为通信学院而編写的天綫这門課的教科書。根据这一基本任务,决定了本書的篇幅、选材及闡述的方法。本書以較大的篇幅研究天綫理論的一般問題。作者編写时,向自己提出了这样的一个任务:首先使讀者和学生对天綫工作的物理現象有一明确的概念,了解問題的严格提法与在技术發展現阶段对工程实用足够准确的近似解之間的区别。同时,作者力圖把純数学部分縮減到最小,对中間的計算,凡可以省略的地方,尽量省略。

在闡述天綫理論的一般原理后,較詳細地研究按波段分类的各种天綫設備,并以較小的篇幅研究邮电部系統內固定無線电台所用的天綫設備。但对飞机用天綫、船用天綫、雷达天綫以及沿高压綫通信用的天綫,本書不予討論。天綫杆的計算及使用問題也不屬本書研究范围①。

本書沒有把發射天綫和接收天綫分开来研究,而是把两种天綫合并在一起討論。并且在每一章(討論一定波段的天綫)的开始,都指出發射天綫和接收天綫在通信波道方面的共同特点。这种闡述办法从数学方面来看具有許多优点;能精簡叙述部分,使讀者能更好地掌握作为这种和那种天綫基础的基本定律的共同原則。

本書在闡述中考虑到学生已學習过下列課程:电磁場理論、理論無線电工程、無線电波傳播。这种情形使我們能縮減对各篇所引用的材料的叙述,而只須簡單重复一下研究上述課程时所得出

① Г. А. 薩維茨基(Савицкий);所編写的“天綫架設”(Антенные сооружения)中有專篇討論這問題。

的基本概念。

本書的特点是采用合理化实用單位制 mks (米-仟克-秒)。這一單位制为苏联科学院推荐采用; 近年来在美国無線电技术書籍中也广泛应用。

作者尽力向讀者介紹目前天綫設備的理論和技术水平, 反映天綫設備进一步發展的趋势。

本書在很短時間內倉促写成, 錯誤在所难免, 如蒙惠賜指教, 当不胜感激。

对提出許多宝贵指示的审閱者 В. Н. 凱先尼赫 (Кессених) 博士和 Г. З. 爱金堡 (Айзенберг) 博士, 致深切的感謝。这些指示在最后定稿时均被采纳。作者特別要对为保証本書在短期内写成創造条件的以副部長 С. И. 阿留新 (Алюшин) 为首的邮电部表示感謝。

А. 畢斯多里哥斯

于列宁格勒通信工程学院

符号和縮写字表

拉丁字母

A — 矢(量)位	l — 对称振子一个臂的长度。
b — Γ 型天綫水平部分的长度或 T 型天綫水平部分长度的一半。	l_{ce} — 帶水平部分的天綫的等效长度。
b_{ce} — Γ 型天綫或 T 型天綫水平部分的等效伸長部分。	m — 空間頻率(波数): $m = \frac{2\pi}{\lambda}$, 式中 λ 是波長(以米表示)。
C — 傳輸綫的單位长度电容。	P — 电位系数。
c — 光速(电磁波的速度), 在真空中 $= 3 \times 10^8$ 米/秒。	P_{π} — 損耗功率。
D — 方向系数。	P_{Σ} — 輻射功率。
d — 振子間的距離。	p — 反射系数。
E — 电場强度(伏/米)。	ρ — 同相水平調諧天綫在同一層內的振子数。
g — 天綫的增益系数。	Q — 振蕩电路或它的元件的質量因数。
g — 媒質的导电率(姆/米)。	Q — 單位长度的电荷。
$F(\varphi)$ — 法化方向性函数(最大值为 1)。	q — 同相水平調諧天綫的層数。
$f(\varphi)$ — 方向性函数(非法化的)。	R — 傳輸綫的單位长度电阻。
$f_o(\varphi)$ — 單个輻射器的方向性函数。	R_A — 天綫的輸入电阻。
$f_n(\varphi)$ — 由几个輻射器所構成的系統的方向性函数。	R_{Σ} — 輻射电阻。
G — 傳輸綫的單位长度电导(电漏)。	$R(d, h)$ — 二半波振子的互电阻。
H — 磁場强度(安/米)。	r — 傳輸綫的負載电阻。
h — 天綫的高度(几何尺寸)。	r — 从天綫到观察点的距离。
h_d — 天綫的有效高度。	S — 波印廷矢量。
I_A — 天綫輸入端的电流。	v — 傳播速度(米/秒)。
I_n — 波腹电流。	u — 电压或电位差(伏)。
k — 行波系数。	$x(d, h)$ — 二半波振子的互电抗。
L — 自感系数或傳輸綫的單位长度自感系数。	x_A — 天綫电抗。
	Z_c — 特性阻抗。

希臘字母

α — 相移常数。	γ — 傳播常数。
β — 衰減常数。	μ — 導磁率(亨/米)。

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米——真空的导磁率。

λ ——波长(米)。

ρ ——波阻抗(欧)。

η_A ——天线效率。

ϵ ——介电常数(法/米)。

$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$ (法/米)——真空的介电常数。

φ ——标(量)位。

ψ ——振子间的相移。

杂志的缩写符号

ИЭСТ——弱电气工业通报。

ИатВп——无线电报与电话。

ЖТФ——技术物理杂志。

IEE Journal——Journal of the Institution of Electrical

Engineers.

Proc. IRE——Proceedings of the Institute of Radio Engineers.

目 录

序言	v
符号及縮写字表	vii
第一章 天綫設備概論	1
第一节 在發射和接收上天綫的功用	1
第二节 天綫設備的基本單元	4
第三节 發射和接收天綫的主要技术指标	11
第二章 高頻电能饋送設備原理	19
第一节 饋電設備原理	19
第二节 無損耗綫、电抗性負載	22
第三节 無損耗綫接以电阻性負載	36
第四节 有損耗綫	45
第五节 与地面或其他傳輸綫有电耦合的傳輸綫	54
第六节 平面波沿导体的傳播	63
第七节 导管内电磁波的傳播	74
第八节 饋電設備的附帶应用	82
第三章 無綫电波輻射理論	89
第一节 关于輻射導綫問題的提出	89
第二节 对称振子上电流与电荷的分布·振子的輸入电抗	95
第三节 振子在远距离处所产生的电磁場	107
第四节 振子輸入电阻和輻射电阻	116
第五节 对称振子的严格理論	123
第六节 天綫上的过压現象	130
第七节 磁輻射器·环形天綫	134
第八节 輻射器系統的方向性	141
第九节 輻射器系統的复阻抗	166
第十节 地面对天綫方向性的影响	180
第十一节 方向性系数和增益系数	194
第四章 接收天綫理論	200
第一节 接收天綫理論的基本問題	200
第二节 应用互易定理研究接收天綫的特性	201
第三节 方向性及干扰	206
第四节 对接收天綫傳送給接收机的功率的要求	214
第五节 对称接收導綫上电流的分布	216
第五章 長波天綫	222

第一节	长波通信波段的简略特点	222
第二节	关于长波天线的一般概念	225
第三节	长波发射天线的基本因素的計算	233
第四节	长波接收天线	256
第六章	無線电广播波段天线	270
第一节	从無線电广播波段的特性来看天线设备的要求	270
第二节	綫式無線电广播发射天线	276
第三节	抗衰落天线	286
第四节	底部接地的桅杆式天线	299
第五节	大功率無線电广播台的天线	302
第六节	接收天线	309
第七章	短波天线	320
第一节	短波通訊的特点和对天线的要求	320
第二节	短波天线的一般概念	326
第三节	調諧发射天线	328
第四节	某些寬波帶天线	353
第五节	菱形天线	360
第六节	專用接收天线·行波天线	374
第七节	方向性圖可变的的天线	387
第八节	無線电收听者用的天线	391
第九节	低級無線电通訊用天线	397
第十节	发射天线的饋綫系	400
第十一节	接收天线的饋綫系	412
第八章	超短波天线	421
第一节	前言	421
第二节	电视天线	427
第三节	其他通信用的不定向天线	437
第四节	定向天线	443
第九章	天线设备的使用問題	457
第一节	天线设备电参数的測量	457
第二节	天线的初步調整	463
第三节	天线设备工作的日常控制和定期控制	465
第四节	輔助设备与安全措施	472
附录		482
1.	复宗数的双曲綫函数計算	482
2.	e^{-x} 值表	485
3.	半波振子互电阻表	485

第一章 天綫設備概論

第一节 在發射和接收上天綫的功用

無線電發射台和接收台間的联系是利用电磁波来完成的，电磁波被發射机所輻射而为接收机所接收。發射台的电能通常取之于交流电網。为了把它变成無線电波的輻射能，必須預先把交流电能变为高频电能；这种高频电流須加以調制，也就是說它的振幅、相位或頻率在所要發送的訊号的作用下按照一定的方式变化。已調高频电流流到天綫上去(圖 I. 1. 1)，天綫便把电能能量变为对于一定方向或者一定区域服务而輻射的适当波長的电磁波的能量。很明显，这种能量变换过程中的损失应使之最小：即应使所建立的天綫能把絕大部分的高频电能变为电磁波能。并

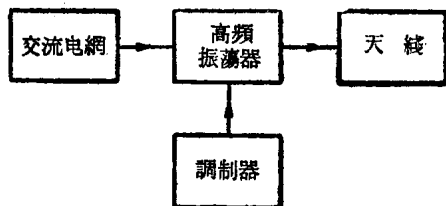


圖 I. 1. 1. 無線電發射台的基本單元。

箭头代表电能的輸送方向。

应采取最有效的办法，利用电磁波的能量对預定的某一个或数个接收台服务。不应將無線电波輻射到四面八方，而应集中輻射到一定的方向或一定的区域(在無線电广播的情况下)；这也是属于天綫的任务。因此，發射天綫可給以这样的定义：發射台的發射天綫，是一种將高频已調电流的能量变为电磁波的能量并將电磁波輻射到預定方向的裝置。

無線电接收台(圖 I. 1. 2)的任务是使發射台所發送的电报、电话或电视等訊号复原，这訊号就是用来調制發射台所輻射的电磁

波的，复原所需要的能量是取之于当地的电源：交流电网、蓄电池或原电池等。由無線电波所取得的能量，只是用来控制当地的电能使它变成使發送訊号复原成所必需的形态。而要达到这一要求，就先应把电磁波的能量变为接收机輸入端所需的高頻电流的能量。

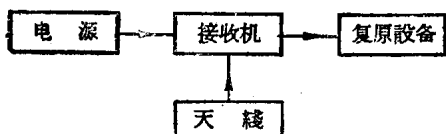


圖 1.1.2. 無線电接收台的基本單元。

我們知道，接收台的工作之所以复杂，是由于接收天線不只是处于一个我們所需要的电磁波的作用之下，而是处于很多干扰电磁波的作用之下的，这些干扰电磁波是由其他的無線电台、大气的放电、电动机、振荡器和其他的电器设备而产生的。不需要的电磁波的干扰作用，可用原則上不同的二种方法来消除：1)利用頻率选择性，即接收机足以分辨出我們所要接收的电台的那个狹窄的頻譜；2)利用方向选择性，就是使接收天線仅有可能最有效地分辨出由所要接收的电台方向傳来的电磁波。

后一任务是接收天線应有的任务而不該予以忽視。

因此对接收天線可以下这样的定义：接收台的接收天線是一个將無線电波的能量变为高頻电流能量同时并能分辨出由預定方向傳来的电磁波的机构。

在第一和第二定义中談到高頻电流的能量时，須着重指出的是在接收机和發射机本身的各元件中，这种电能利用或傳送的时候，必須經過載高頻电流的导体。与此相反，由天線輻射的电磁波的能量傳送就不一定需要有导体和傳导电流。

天線既然是这两种能量形态的变换器，那么天線本身上存在电流就不应使讀者發生困惑。关于这一点，举例來說，天線与一高

頻振蕩器有其相同之處，在振蕩器中，不僅有高頻電路，同時也有作為變換電能的先決條件的直流電路。

給發射天綫和接收天綫下了定義後，我們就來解釋天綫設備的基本元件，讓我們借通過熟悉幾個最典型的的天綫來說明。

但首先要說明兩點。這在以後對於我們是很有用的。將能量由一種形態變為另一種形態的發射天綫和接收天綫是屬於各種技術領域中所用的能量變換器或發生器的這一廣泛的范疇的。這種見解從兩個觀點來看是很重要的：第一，它能使我們對發射和接收天綫所提出的技術要求作出正確的理解；第二，它使我們可以利用所有各種能量發生器的一般定律來研究天綫。其中例如本質上就是一個電能發生器的接收天綫，在計算輸出端的電流和輸出功率等方面，依從直流發電機和交流發電機同樣依從的基本定律。以後我們會相信這種見解的正確性，而現在我們僅指出：在完成電能的轉化方面，發射天綫和接收天綫之間所存在的關係。舉例來說，有如直流或交流電動機對於直流發電機或交流發電機之間所存在的關係那樣，即電動機把電能轉化為機械能，而發電機則反是，同樣地發射天綫把高頻電能轉化為電磁波的能，而接收天綫則反是。

如眾周知，電動機和發電機具有可逆性，這就可以把同一個聯動機用於這兩種用途，同時聯動機作為電動機的性質就完全決定了用它作為發電機時的性質，反之亦然。我們以後就可知道，發射天綫和接收天綫也具有可逆性，這就使我們得以根據天綫用作發射時的數據，來確定它用作接收時的性質，反之亦然。這種情況是毫無疑義的，因為發射天綫和接收天綫是屬於可逆的能量轉換器。

第二點要說明能量的無線傳輸和無線電通訊本身所面臨的任務之間的差別。看來，既然發射天綫和接收天綫的任務是控制空間的輻射，那麼天綫技術發展的最終目的應當是把所有由發射機所輻射的能量傳輸到接收機。但這並不完全正確。正如同其他所

有的通訊方式一樣，無線電通訊的任務也是要把所欲接收的訊號從各種的干擾訊號背景中分辨出來。干擾電平決定了在接收地點有用訊號所應有的最小電場強度。要得到這樣的電場強度，可以由在非定向輻射的情況下將發射機的功率增大到某一數值，或不變發射機的功率，而將能量集中輻射到一定的方向上。後一途徑無疑地是我們所願採取的。但是顯然提高天線的方向性就不免使它的構造複雜化，因而造價較高，因此也只能達到經濟條件所允許的限度而止。

在另一方面，很明顯地，能量的無線傳輸在原則上只有當採用最大的定向天線時才有可能，這些天線把能量集中為窄的射束，並保證接收天線取得發射機所輻射的全部能量的大部分。顯然，雖然在個別的特殊情況下天線可以相當地接近這種情況，但用在無線電通訊中的天線，則不擔負這種任務。

應該記住，我們對接收天線所饋給接收機的功率的絕對值，並不像對它從干擾背景中分辨訊號的能力那樣地感到興趣。這完全與對能量傳輸上的要求不同，在傳輸能量時，首先應當考慮接收天線由在發射機所產生的場中所能吸取的功率。

第二節 天線設備的基本單元

為了熟悉天線設備的單元，我們將依次討論一些最典型的天線。考慮到歷史發展的過程，我們將先從較長波開始。

我們來研究一下用於輻射無線廣播波段內較長波的無線電廣播發射天線以作為第一個例子。

這種天線(圖 1.2.1)是由水平部分 1，引下綫 2 和地綫 3 所組成。水平部分由 4—6 根導綫合成，每根相距約 2 米，長度約 100 米，導綫本身是直徑為 6—10 毫米的多股青銅天線絞綫。其兩端

固定在橫桁 4 上，由絕緣子 5 將橫桁与悬挂天線的繩索 6 隔开。

引下線 2 通常由同样的天線絞綫組成辮条的形状，它是由水平部分的中心下引到無線电台机房的天線引入端 7。

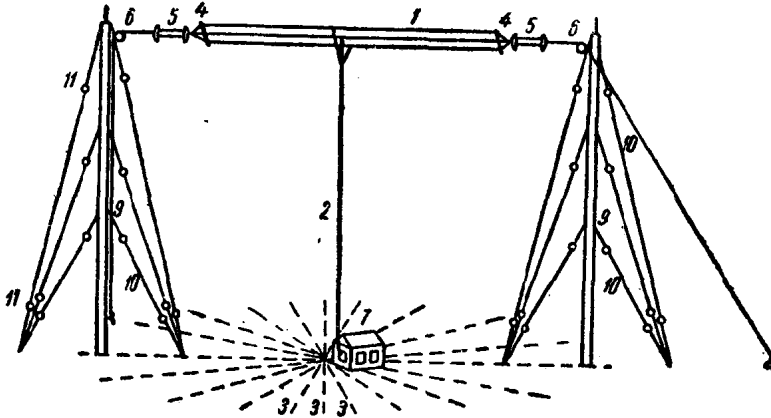


圖 1.2.1 無線電广播天線。

地綫 3 是一幅射狀的導綫系，埋在地下的深度約為 0.5 米。所有这些導綫都連接到作为地綫輸入端的总導綫上。

天綫系是悬挂在兩根天綫杆 9 上，通常是高約 150 米的木杆，彼此間的距离为 200—250 米。木杆上裝有几層由鋼索制成的拉綫 10。在天綫工作时为了不使拉綫中感应强大的电流而使天綫的輻射場發生畸变起見，所以用絕緣子 11 把拉綫分成几个短的綫段。

在这里引下綫實質上是輻射部分。我們由理論無線電工程这門課程中得知，天綫的輻射能力与它的長度有关。天綫所輻射的功率可用天綫底部电流 I_A 的平方和輻射电阻 R_z 的乘积来表示。当天綫的尺寸与波長相比不大时，輻射电阻的增大与天綫長度的平方成正比。所以工作波長在 1000 米左右时，天綫杆的高度应取 150 米，如果其高度过低，天綫的輻射电阻就很小，这对于我們是很不利的，其原因有二：第一，既然輻射功率 P_z 等于

$$P_z = I_A^2 R_z,$$

那么在給定的功率 P_z 之下，减小輻射电阻一定要增大天線上的电流。随着电流的增加，天線上的电压也要随之增加，当电压增高到某一数值时，就要击穿絕緣子而在导線的終端形成發光的電暈，这就危及天線机械構造的完好。

天線的水平部分 1 有降低产生于天線上的电压作用，此部分的尺寸越大，其对地的电容量也越大，因之由沿引下線的电流充电所产生的电压也較小。但是当天線阻抗太小而引起的引下線上的电流过大时，水平部分也不能使天線免于过压。

第二，輻射电阻过小对地線 3 的工作也是不利的。当激励天線时，其中的傳导电流(圖 1.2.2)在天線周圍的空間轉变成成为位移

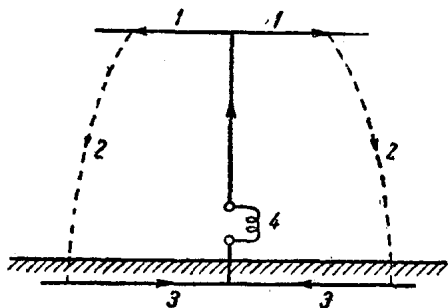


圖 1.2.2. 天線區域內的傳导电流(1, 3)和位移电流(2)。

电流 2, 位移电流在地中主要轉变成成为由地線 3 所匯集的傳导电流經过与發射机耦合的綫圈 4 天線电路就成为通路。在电流通路的三个部分“天線—空气—大地”，大地的損失最大，这种損失唯有采用比較完

善和复杂的地線系統方得减小。所以除了有用功率 $P_z = I_A^2 R_z$ 之外，在地線中又消耗了額外的功率。

$$P_n = I_A^2 R_n,$$

式中 R_n 是等效的損耗电阻。显然， R_z 越小，輻射能量也越小，而損耗的百分比也越大。

除了上述的情形之外，从天線电路諧振曲綫的觀點来看，輻射

电阻过低也是不适宜的;为了使無線电广播發射的頻譜得以通过,这个曲綫應該相当平緩。

以上的討論提供設計無線广播天綫时所發生的的問題特性的一般概念。最后我們指出,上面討論的天綫是屬於非对称天綫設備一类,其特点为与發射机相接的兩接綫端之一是处于地的电位。

与非对称天綫相对的是对称天綫系,其輸入端对地具有数值相等符号相反的电位。我們用短波上采用的所謂对称振子(圖 1.2.3)作为对称天綫的例子,它本身是水平导綫 1,由絕緣子 2 分成兩個相等的部分。每半边的長度从 $1/4$ 到 $5/8$ 波長。水平导綫終端有絕緣子 3,絕緣子的另一端連有繩索 5,以便利用在杆 6 上部的滑輪 4 把振子悬挂起来。用所謂二綫式饋綫 7 將振子与發射机連接,饋綫的导綫与振子的輸入端 aa 相連接。向發射机方面,饋綫由固定在柱 9 上的絕緣体 8 支住。当天綫工作时,發射机的接头 AA 对地应有大小相等符号相反的电位。

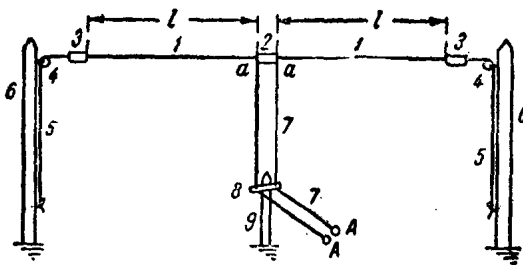


圖 1.2.3. 对称振子。

由于在短波的情况下,不难得到上述的振子尺寸,因之对称振子的辐射电阻是相当大的,所以以前所有考虑到有关 R_r 值的問題,这里都已不存在。但是又产生了一些新的問題,这首先是調节辐射方向性的問題,我們以后会知道,在上述振子范圍内改变波長

时,最大輻射發生于垂直于振子軸的平面內,即所謂赤道面內,能量在上述平面內的集中,是隨振子相對長度的增加而增加,但只能達到某一限度。當振子長度的一半大於 $5/8$ 波長時,能量在赤道面內的集中就開始減小,而在其他方向則增加。

振子的方向性尚因地面的影響而複雜化,地面能反射入射波的能量的大部分,这样就改變了輻射場的結構。如何正確地選擇懸挂高度、怎樣取振子的長度,如何選定其與通訊對方的相對方位——所有這些問題都是設計和維護短波電台天綫設備的工程師所應回答的。

另一組問題是關於饋綫在某一波段工作時其對天綫與發射機匹配的影響。與饋綫長度有關,波長改變時在發射機端的天綫輸入阻抗,可以在很大的範圍內變化。

設計具有這樣天綫的電台的工程師的任務,是要預知調諧發射機輸出級必需的全部電容量、電感量及轉換和調節等知識;以及採取限制天綫輸入阻抗變化範圍的方法等。

對於方向性較對稱振子大的短波天綫,上述問題表現得更為突出。這種天綫之一如圖 I. 2.4 所示。天綫是由兩個用導綫作成的

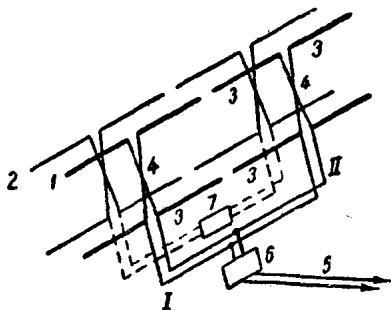


圖 I. 2.4. 同相水平定向天綫圖。

垂直懸挂的面組成: 正對通訊對方的天綫本身 1 和置於其後面的反射器 2。基本單元是由兩根導綫 3 (每根的長度是半波長) 所組成的許多對稱振子。天綫的饋綫系分為兩支: 左支 I 和右支 II。每一分支

饋給上下兩層振子, 每層之間的垂直距離是半波長。在綫段 4 上饋綫必須交叉, 以便對所有振子的饋電都能得到其應有的相位。