

5377
高等學校教學用書 5377

無線電波傳播

上 冊

М. П. ДОЛУХАНОВ 著
林 爲 幹 等 譯

高等教育出版社

第五五號

圖書集成電學部 5233

無線電波傳播

上 冊

英. 美. 蘇聯科學院

電 訊 學 部



科學出版社

中央人民政府高等教育部介紹
華南工學院推薦
高等學校教學用書

無線電波傳播

上 冊

M. II. 多路哈諾夫著
林爲幹 徐秉鐸 張世箕譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



無線電波傳播

下 冊

M. II. 多路哈諾夫著
林爲幹 徐秉鐸譯

高等教育出版社



本書係根據蘇聯國立電訊書籍出版社 (Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио) 出版的多路哈諾夫 (М. П. Додуханов) 著“無線電波傳播” (Распространение радиоволн) 1952年版譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為通訊專業用教科書。

全書計八章，中譯本分上下兩冊出版。上冊包括原書第一章至第三章，下冊包括原書第四章至第八章。

本書由華南工學院林爲幹、徐秉鐸、張世箕合譯。

無 線 電 波 傳 播

上 冊

書號18 (課11)

多 路 哈 諾 夫 著
林 爲 幹 等 譯
高 等 教 育 出 版 社 出 版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新華書店華東總分店總經售

商務印書館印刷廠印刷

上海天通庵路一九〇號

開本787×1092 1/25 印張9^{11.5}/_{12.5} 字數 194,000

一九五四年六月上海第一版 印數 1—4,000

一九五四年六月上海第一次印刷 定價 ¥ 14,000

本書係根據蘇聯國立通訊和無線電書籍出版社 (Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио) 出版的多路哈諾夫 (М. П. Долуханов) 著“無線電波傳播” (Распространение радиоволн) 1952 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等通訊學校教科書。

本書中譯本分上下兩冊出版。

本書由華南工學院林爲幹和徐秉鈞合譯。

無 線 電 波 傳 播

下 冊

第 123 (課 124)

多 路 哈 諾 夫 著

林 爲 幹 等 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 城 區 鐵 一 七 〇 號

北京市書刊出版業營業登記證出字第 154 號

新 華 書 店 上 海 發 行 所 總 經 售

商 務 印 書 館 印 刷 廠 印 刷

上 海 天 通 水 路 一 九 〇 號

開本 787×1092 1/25 印張 10 2/12.5 字數 207,000

一九五四年十一月上海第一版

印數 1—2,500

一九五四年十一月上海第一印

定價 洋 11.000

序

應當認為無線電波傳播這一門課程所包含的問題的廣大範圍是這門課程的特點。

這門課程的大部份是建立在理論電工學(在場論部份)和理論無線電工學課程中所闡明的一些原理的基礎上。除此以外,還必須吸收在物理學(在游離過程部份)課程中所研究的材料,而且在闡述講課材料的整個進程中涉及一些地球物理和天文的問題。

第一本有系統的無線電波傳播的教程是在 1923 年由 M. B. 蘇略依金創立的。這一本教程不但曾反映了我們的知識水平,而且在有關無線電波的研究的許多部份中曾提供了新的解答,並指出了今後發展的道路。

在 1934 年,出版了 M. A. 邦奇-布魯耶維奇關於無線電波傳播問題的獨創的論文集,這論文集在多年內都用作為研究這問題的課程的教材。

1940 年, A. H. 舒金所寫的無線電波傳播讀本的問世,打開了無線電波傳播學說發展史上的新的一頁。A. H. 舒金的讀本特別可貴之處是在於除了這一門課程的一切重要問題的非常深刻的闡明之外,它還包括了作者在無線電波傳播研究中許多不同的領域內多年工作的結果。這本讀本成為全蘇聯無線電專家的一本必讀書。

主要地歸功於蘇聯學者的研究工作的近十年來無線電波傳播研究範疇中的一些新的成就迫切地要求以一些新材料來補充教材。

著者多年來在以 M. A. 邦奇-布魯耶維奇命名的列寧格勒電工通訊學院中講授無線電波傳播課程時所講述的材料是作為我們提供給讀者的這本書的根據。

本書的範圍,在許多情況中,不能充分完滿地闡明課程中一些個別

的問題。讀者們將會在許多蘇聯學者的工作和著作中找到這些問題的更詳盡而嚴謹的說明。這許多著作的索引在課文中適當的地方作出。

著者嘗以闡明無線電波傳播過程的物理現象，給予一些進行着的現象以定量的估計以及使研究這課程的人們熟悉無線電通訊電路的實際計算方法爲己任。正由於這個目的，在本書中引入了 40 個說明一些個別計算方法的數字例題。

爲了說明一些個別計算而列舉的圖表和列線圖並不自以爲是極度的完整，而在這個意義上來說它們不能代替進行多式多樣的工程計算所必需的一些參考資料。但著者希望列入書中的計算方法的研究將使我們能容易地運用更完整的參考材料，這些材料無疑地將逐年被補充以一些新的、更準確的數據。

最後作者認爲應對 A. H. 舒金在閱讀初稿時所提出的寶貴的意見以及對 C. H. 納見連柯所領導的莫斯科電工通訊學院的講座同人在討論手稿時所作的寶貴的批評深表感謝。

應該指出這本書的校閱者 A. A. 謝孟諾夫對本書的出版的特別的關懷，作者廣泛地採用了他的寶貴的意見。

所有的批評意見請寄莫斯科中心區清池(奇斯托普魯特納依)大街 2 號通訊出版社，著者將以感謝的心情接受這一切意見。

M. 多路哈諾夫

一九五一年四月廿二日

緒 論

卓越的俄羅斯學者，無線電的發明人，阿力山大·斯切潘諾維奇·波波夫早在他的最初幾次無線電報拍發實驗的時候，就已經非常注意無線電波傳播的問題。他這種注意首先表現於對進行無線通訊所在的環境的慎密的紀錄中。A. C. 波波夫詳細地記載了通訊台的相互位置，它們之間的距離，視野的條件，無線電波在其上傳播的大地表面的特徵等等。早在 1897 年在波羅的海上作夏季實驗的時候，他就已注意到當第三艘戰艦橫截過聯接着兩艘通訊艦的直線的情況下，所觀察到的接收訊號強度的減弱。A. C. 波波夫把這個現象解釋為創立補助發光航標（燈塔）的特殊無線電航標的可能性。A. C. 波波夫所發明的探測戰艦的無線電技術方法，成為現世無線電定位技術的基礎。這樣，A. C. 波波夫不僅是無線電的發明者，而且也是雷達的發明者。

25 年以後，美國人泰勒和楊格發現了接收強度減弱的類似的現象。根據這一點，美國的報章就妄圖將雷達的發明者加諸他們身上，而對他們的發現祇是 A. C. 波波夫的實驗的一個簡單的重複一事隱秘不提。

如果說 A. C. 波波夫在他的無線電報的工作的初期有過這樣的觀點，即被他利用作通訊用的電磁波，具有可見光的特性，應該在均勻媒質中沿直線軌道而傳播，這就把通訊的距離局限於直視的距離；那麼，在以後 A. C. 波波夫對無線電波傳播過程的見解有了重大的改變。

在 1900 年發表的論文中，A. C. 波波夫已經肯定地着重指出了大地在無線電波傳播過程中所起的作用，斷定了與具有垂直軸的赫芝（Герц）振盪子所產生的擾動“相聯系着的還有沿大地表面進行的擾動，也可以說是在大地靜電位水平面上的波”。特別的，正如 A. C. 波波夫指出了，“在振盪途中遇到的較低的障礙物，例如，樹林和具有金屬的裝備的小船的削弱作用”證實了這一點。

A. C. 波波夫對建立大大超越直視距離的無線電通訊的可能性的更明晰的見解，表達於 1903 年三月對郵電管理總局所寫的關於“建立聯接俄羅斯與保加利亞的無線電報台的可能性”問題的報告書中。在這報告書裏，講到建立約 500 公里距離的無線電通訊的可能性時，A. C. 波波夫指出：“在今日的無線電報儀器的狀態下，對利用它們於這樣的距離的可能性中存有完全的信念，這樣的距離，在這建議中的建設中是應該要注意到的”。A. C. 波波夫進一步指出能夠增大電台作用距離的具體辦法，就是“增大電磁波能源的功率，和使用複雜的架空導線網來代替迄今在單桅上使用的最簡單的裝置”

A. C. 波波夫所實現的最初幾條無線電通訊道的長度，照例是不超過直視距離。但是，在 1899 年 12 月，在哥格蘭特-可特卡島的 45 公里路線上，他已經實現了超越直視距離的電磁波的發送。從這時開始，無線電通訊電路的長度逐年急劇地增加着。

爲了解釋無線電波繞過地球的凸面，兩種假說曾經被提出過。

其中的第一種——繞射假說——是 A. C. 波波夫提出的關於地面引導作用的觀念的發展。根據這個假說，無線電波所遭遇到的繞射，也就是一切形式的波繞過在途中所遇的障礙物的特性，是無線電波繞過地球的原因。在無線電波傳播的情況中，地球的凸形扮演着這種障礙物的角色。

繞射對無線電波傳播的影響的定量估計因爲下面的原因是困難的，即已經很好地被研究出來的解決繞射問題的光學方法不能應用於無線電波，而無線電波繞地球的繞射的研究提出了獨立的、而且在數學關係上十分複雜的電動力學的問題。

另一個假說用無線電波從地球大氣上面的電離層的反射來解釋無線電波繞地球的傳播。早在上一世紀末，許多研究者已指出在大氣中的游離區域的存在是使我們可能很自然地解釋地磁場變化所必要的假定。隨着無線電台數目的增加和工作人員對於這些電台的工作經驗的

累積都一致地表明了接收強度對於晝夜時間的依從性，這種依從性表現在接收強度隨黑夜的降臨而增大和表現在日出日落時接收強度的急劇振盪，這一個事實說明了這個假說是有用處的。繞射理論，不待說，並不能解釋晝夜的振盪。既然太陽輻射的游離作用通常被認為是游離層形成的直接原因，這從游離層反射的假說也就自然地解釋了這種接收強度的振盪。

繞射在無線電波傳播的過程中所起的作用，在一個長時期中都未能估計出。許多研究者甚至懷疑繞射對無線電波傳播的影響的一個事實本身，特別是在 1919 年英國數學家瓦特生 (Watson) 得出了無線電波繞射問題的近似解答之後。原來，我們發現在約 5000 公里的距離上，在長波段內，在接收點被觀察到的電波的電磁場，超過了根據繞射公式計算出來的數值幾千倍。

祇是在偉大的十月社會主義革命以後，由於布爾什維克黨以及 B. И. 列寧和 И. В. 斯大林親自對無線電技術在我國的發展的深切關懷，蘇維埃的學者們在無線電波傳播的領域中進行了最有價值的研究，並解決了一系列的複雜的理論上的問題，其中也包括了關於無線電波繞地球而繞射的問題。

在 1923 年，主要是由於天才的蘇聯學者 M. B. 蘇略依金院士的工作，這兩個假說在無線電波傳播過程中所起的作用是最終地被確定了。繞射決定在地面直接鄰近中傳播的表面波的傳播條件是被斷定了。相反的，大氣的游離區域決定空間波，也就是由於從大氣的游離層一次或多次的反射結果而環繞地球傳播的波的傳播條件。

M. B. 蘇略依金發展了桑默費爾德 (Зоммерфельд) 早在 1909 年所發表的無線電波在平面半導體地面上傳播的理論，在 1923 年建立了計算表面波電磁場強度的公式。祇是在八年以後，類似的公式才被荷蘭的學者萬·戴·波爾 (ван дер-Пооль) 發表出來。在 1920 年，無線電波在游離層折射的現代理論的基礎由 M. B. 蘇略依金研究出來。他最先的，

在相類似的拉爾摩爾 (Лармор) 理論擬定之前 4 年, 指出了自由電子在無線電波在大氣中折射的過程中所起的特殊作用。

他的用作計算在長波波段內遠離發射機處的電磁場強度的公式的推證也屬於同一個時期。以後, M. B. 蘇略依金致力於短波傳播的問題, 積極地參加於擬定保證可靠的和不間斷的短波無線通訊的措施。

卓越的蘇維埃研究家, 蘇聯科學院通訊院士 M. A. 邦奇-布魯耶維奇對無線電波傳播也予以很大的注意。這位天才的學者和不倦的研究家在無線電技術範疇中優越的突出的科學活動, 是研究一些問題, 這些問題在當時是最迫切的, 它們的解答是最有效地促進以後無線電技術的發展的。

在 1924 年, 這樣的急待解決的問題, 就是短波的傳播的問題。短波技術的掌握和這個波段在業務上的運用, 由於對短波傳播的規律和特性的無知而被阻礙着。

領導着由 B. H. 列寧的創議而建立的尼斯城無線電實驗室, M. A. 邦奇-布魯耶維奇組織了廣泛的短波傳播特性的實驗性的研究。在無線電實驗室裏建立了實驗的短波發射機, 而在蘇聯各個城市接收它的訊號。同時, 無線電實驗室的接收台對不同的短波發射機的接收進行系統的觀察。研究並整理了觀察的材料後, M. A. 邦奇-布魯耶維奇創立了短波傳播的基本定律。

在 1932 年, 在 M. A. 邦奇-布魯耶維奇的領導下, 在蘇聯進行了最初幾次的游離層量測。M. A. 邦奇-布魯耶維奇是對北極圈進行游離層的實驗研究的先鋒。他所提出的利用特殊構造的小功率管來獲得脈衝中的大功率的原理後來得到了普遍的應用, 不僅是在所有的游離層觀測台中, 而且也在無線電定位發射機中。

從 1925 年起, Д. А. 羅然斯基和 А. Н. 舒金就開始從事於短波傳播的研究。蘇聯科學院通訊院士 А. Н. 舒金的科學研究活動在這方面特別大有成效地和向目的銳進地進行。А. Н. 舒金從藉助於一個簡單的接

收設備來觀察短波傳播的特性開始後，後來製造了獨創的短波無線電分色儀，利用它來進行在短波波段內的首批的電磁場強度定量的測量。他應用光錄設備，研究短波衰落的特性並評定各種對衰落作鬥爭的方法的有效性。

以B. H. 西佛羅夫(他指出了用或然率理論的方法來作衰落的定量研究的可能性)在1930年完成的理論工作和以B. A. 柯且爾尼柯夫和H. H. 蘇姆斯卡雅的研究工作為根據，A. H. 舒金作出了在短波波段中對衰落作定量估計的嚴整理論。把大量的電磁場強度的測量和短波運行的業務上的數據加以整理之後，A. H. 舒金在1932年發表了最初幾個計算短波波段的電磁強場度的方法。把根據A. H. 舒金的方法計算磁場的結果和短波運行的實際情況屢次地相比較，都指出了舒金的方法反映短波傳播的實際情況比後來發表的外國作者的一些方法更準確得多。

A. H. 舒金對無線電波在游離層傳播的問題和超短波傳播的問題曾付予很大的注意。這些工作的總結，載於在1940年出版的並成為全蘇聯無線電專家的必讀書的“無線電波在游離層中傳播的物理基礎”和“無線電波傳播”中。

在游離層的實驗的和理論的研究中，B. H. 凱謝尼赫教授和他的同事們的功績是特別鉅大的，他們完全了具有重大的科學和實踐意義的一系列工作。在1933年進行的預試實驗以後，在1936年，在蘇聯在托姆斯克大學內，第一個經常工作的游離層觀測站開始了正規的工作，B. H. 凱謝尼赫在多年內曾勝利地領導其中的工作。在B. H. 凱謝尼赫領導下研究出來的游離層狀態的分類法被廣泛地利用着。B. H. 凱謝尼赫研究出了決定在垂直反射時從游離層的反射係數的獨創的方法。所謂游離層中的“大陸效應”的發現也是屬於他的，所謂大陸效應就是水和陸地面的地理分佈對游離層狀態的影響的建立。

蘇聯學者A. H. 卡散切夫和K. M. 柯西柯夫關於保證不間斷的和

可靠的無線電通訊幹線上的通訊的工作，具有重大的實踐意義，這些工作是由於將運用上的數據加以綜合並和許多短波無線電發射機的電磁場強度測量結果相比較的結果而完成的。R. M. 柯西柯夫曾創造了決定最高工作頻率的獨創的方法。

A. H. 卡散切夫曾研究出計算短波電磁場強度的現代方法，估計到無線電波在射線軌道上的、在其中消耗實際發生的那些地段上的消耗是這方法與其他方法不同的特點。在所有以前被提出來的一些方法中，消耗曾被假定是多多少少地沿着地面計算的途徑均勻地分佈的。編製游離圖的優先權也屬於 A. H. 卡散切夫。

傑出的蘇聯學者 B. A. 維建斯基院士曾獻身於無線電波傳播的領域內的科學活動，主要地是獻身於超短波傳播的問題。早在 1922 年，B. A. 維建斯基就進行了超短波通訊的首批實驗。1928 年，在得到的實驗材料的基礎上，B. A. 維建斯基建立計算在直視範圍內超短波電磁場強度的所謂“反射法”的幾個公式。維建斯基公式（現在通常這樣稱呼這些公式）被廣泛地應用於超短波波段內電磁場的計算中。類似的公式只是在 1933 年才在美國的文獻中被發表出來。

研究了英國數學家瓦特生所從事的問題（瓦特生提出靠繞射來計算電磁場強度的公式並假定大地具有無限大的電導），B. A. 維建斯基在 1933 年建立了計及大地的半導電特性的繞射公式。在 1936 年 B. A. 維建斯基把他所得出的繞射公式推廣到高懸的天線的情況中，而在 1937 年推廣到超短波的波段，在這波段中土壤具有介質的特性。在 1942 年，B. A. 維建斯基通過編製一連串的輔助曲線圖和列線圖而賦予繞射公式以便於工程計算的形式。

在以後和 M. H. 波諾馬略夫共同完成的工作中，B. A. 維建斯基研究大氣折射對超短波傳播過程的影響，指出了當通過將地球的實際半徑代以某一等效值而利用反射法公式時，折射影響的計算僅祇對於相當傾斜的射線才是可能的。

在 1949 年，B. A. 維建斯基院士由於在無線電技術領域中的富有成果的工作而榮膺以 A. C. 波波夫命名的獎章。

在 Л. И. 曼捷爾斯坦姆和 Н. Л. 帕帕列克西領導下的一批蘇聯學者在表面波傳播的範疇中所完成的工作具有鉅大的實用的意義。研究無線電波傳播過程的新穎的干涉方法是奠基於這些研究上的。

在完成的的研究中，應該舉出 И. А. 里雅幸，Л. Л. 阿爾佩爾特，B. B. 米古林和 Е. Л. 帥各列夫所完成的關於無線電波在海面和地面上的傳播速度的理論與實驗的研究工作。這問題的迫切性由於下列的事實而增加着，即懂得表面波傳播速度的準確值，無論對曼捷爾斯坦姆和帕帕列克西所研究出的測度距離的新穎的無線電工方法，或對用無線電定位方法來研究沿地面的距離，都是必不可少的。當時，基於德國學者淺涅克 (Ценнер) 早在 1907 年發表的著述的一個見解在一些無線電專家中曾佔優勢，這著述是關於表面波傳播速度的似乎存在的，對於電波在其上傳播的土地的形式的依從性。И. А. 里雅幸從理論上考慮過這個問題，在 1940 年證明了淺涅克的理論的錯誤性，並指出了表面波的傳播速度實際上不依賴於電波在其上傳播着的土地的形式，而是可以被認為等於自由空間的光速。這個數值上的某些偏差祇是發生於發射天線的直接近鄰之處。用精密地配備的實驗證明這理論的假定的正確性是完全成功了。

在 Л. Л. 阿爾佩爾特和 B. B. 米古林的工作中，表面波電磁場的相位結構曾被詳細地研究過。

在後來的著述之一中，Н. Л. 帕帕列克西根據理論上的分析指出，在工程上今日所具有的發射機的功率之下獲得無線電訊號從月球反射的可能性。Н. Л. 帕帕列克西的預想，如所週知的，完全被證實了：在 1946 年無線電訊號從月球的首幾次反射被得到了。

表面無線電波傳播的研究在 М. А. 列翁托維奇，Г. А. 格林貝爾格，B. A. 福克和 Е. Л. 費英貝爾格的研究工作中繼續進行。

這裏應該首先提出 M. A. 列翁托維奇的功績，他成功了建立和論證，在具有很大的複數介電係數絕對值的物體表面上的近似的邊界條件。利用這近似的條件，成功了研究並得出在無線電波傳播的一些情況下的工程上的解答，在這些情況下，傳播的直接研究是由非常的數學上的困難伴隨着，而且在某些情況中根本是不可能的。

1945 年，E. J. 費英貝爾格得出了在不均勻土地上傳播時，決定電磁場強度的問題的相當嚴格的解答，也就是說當電波在途徑的某一部份中，是在具有某些電特性的土地上傳播，而在這途徑的另一部份中，在具有另外的電特性的土地上傳播時的解答，這一個問題很早就已引起無線電工程師們的注意，正因為在實際中，最常見的是不得不處理這樣的電波傳播情形。

在 1930 年，英國人愛開斯萊(П. П. Эккерслея)曾提出了在簡易方面十分誘人的計算在不均勻土地上傳播時的電磁場強度的方法。不久之後，就發現了愛開斯萊的方法並不滿足互易原理，也就是說，無線電波傳播方向的改變（當電波開始在“第二”土地上傳播，然後開始在“第一”土地上傳播時），是由電磁場強度的改變伴隨着，這點在事實上是不能發生的。E. J. 費英貝爾格在 1945 年，根據這問題的電動力學的研究，提出了計算在不均勻土地上的電磁場強度的方法，這方法指出電磁場強度的絕對值基本上是決定於無線電波在發射和接收天線直接近隣所遭受到的吸收。

不管 E. J. 費英貝爾格所得到的問題的嚴格的解答，在外國的文獻中，在 1949 年藉相應地“調節”П. П. 愛開斯萊公式來決定電磁場強度的各種方法還被討論着。

以“海岸曲射”現象之名見知於無線電技術中的一個的問題和上面被研究的問題緊密地相連着。我們把海岸曲射了解為當電波橫過海岸線時，也就是從大陸過渡到海岸上或相反時，表面波所受到的折射。基於淺涅克的有缺陷的概念上，解決這問題的企圖，事實上終究是不能奏

效的。用這方法來決定的偏轉角，甚至是不能指示出正確的偏轉方向。

海岸折射問題，在蘇維埃學者 Г. А. 格林貝爾格，B. A. 福克和 E. J. 費英貝爾格的工作中找到了最終的解答。他們所得到的折射角的表示式指出：折射角是決定於海岸線離開無線電通訊道兩端點的程度。海岸折射將在當海岸線位於接收機或發射機的近旁時一些情況下表現得最強烈。反之，假如海岸線位於遠離無線電通訊道的兩端點，則折射角的值通常是微不足道的。

B. A. 福克院士在超高頻無線電波傳播的範疇中所完成的研究的實用意義是十分重大的。問題在於 B. A. 維建斯基所建立的繞射公式使我們祇能夠決定在陰影區域內的電磁場強度，也就是說在超過直視距離的地方。在半影區域內，也就是說，在直接銜接於直視邊界的區域內，電磁場的計算是由非常的數學上的困難伴隨着，而且直到最近仍為一個不可解的問題。與此同時懂得計算半影區中的電磁場的實際必要性是非常大的。這一點將會更加明顯，假如我們考慮到隨着直視邊界的接近，反射法公式也就失去其效用的話。

利用獨創的和十分精緻的數學方法，B. A. 福克開始（在 1945 年）解決了當天線之一處於地平面上時半影區內繞射的問題，其後（在 1948 年）解決了當兩天線都是懸掛起來時半影區內繞射的問題。由於這卓越的工作，B. A. 福克院士榮膺了斯大林獎金。

B. A. 福克所得到的公式，在照明區內轉而為“反射法”公式，而在暗影區內又轉而為普通的繞射公式，隨着發表了的 B. A. 福克的公式，就可能計算離開發射機任意距離上超高頻波段內的電磁場。後來 B. A. 福克把他得到的繞射公式推廣到同時計及繞射和大氣折射的情況中。就是在這時期中，B. A. 福克在他和 M. A. 列翁托維奇的共同工作中，利用後者所建立的近似邊界條件，B. A. 福克利用大為簡單的數學工具，推證出了半影區的繞射公式。

在致力於游離層中的過程的理論研究的工作中，應該提出不幸早