

公寸波与公分波的
傳 播

A. Γ. 阿林貝爾格著
尙志祥譯



書中研究了公分波與公分波在各種條件下的傳播問題，並引用了一些計算公式和實際特性知識。書中尽可能地以最近在這方面所獲得的資料來說明。敘述中沒有採用繁瑣的數學方式。

本書主要地供給實際工作在公分波與公分波技術領域內的讀者們之用。但是可以預料，它對相應學校的大學生們和教員們亦是有益的。

蘇聯 A. Г. Арсберг 著

“Распространение дециметровых и сантиметровых волн” (Советское радио 1957年第一版)

*

國際科學出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第074號
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092¹/₁₆ 印張16²/₈ 397千字

1959年5月第一版

1959年5月第一次印刷

印數：0,001—5,600冊 定價：(11)2.50元

NO. 2885

目 录

前言	5
序言	7
第一章 公分波与公分波在自由空间的传播	13
§1 电磁波	13
1 公分波与公分波	13
2 场强、相位与无线电波的传播速度	14
3 无线电波的能量与极化	16
4 无线电波的相加	17
§2 关于天线的一些知识	19
1 发射天线与接收天线的方向性和互易性	19
2 公分波与公分波天线的方向图和方向作用系数	20
3 进入接收机的功率	22
4 无线电波传播时的衰减	23
§3 不同目标的无线电回波	25
1 无线电波的绕射	25
2 公分波与公分波被各种物体的散射	26
3 各种目标的有效散射面	28
4 半波振子、球与平面	29
5 角形反射体	30
§4 对于无线电通信和雷达的主要相互关系	31
1 符合于自由空间的条件	31
2 无线电通信和雷达	31
3 关于最大作用距离	33
4 关于无源转播站	33
第二章 光滑地面的影响	36
§5 前言与术语	36
1 地及对流层的影响因子	36
2 几何地平线	36
3 照亮区、半阴影区与阴影区	37
4 开圆的与遮断的线路。抛物线坐标格子	38
§6 公分波与公分波被地面的反射与吸收	40
1 镜式与散射式(漫射)的反射	40
2 反射系数(镜式)	43

3 一些实验数据	45
4 吸收	45
5 地面的电性质	50
§7 平直地面的影响	52
1 反射(干涉的)公式	52
2 地面影响因子与天线高度、距离和波长的关系	55
3 有效反射系数的影响	56
4 关于天线垂直面方向性的影响	60
5 平方公式	60
§8 地球曲率的影响	61
1 反射点位置	61
2 折合高度和行程差	63
3 关于球形地球的反射和反射公式的适用性	66
4 距离、高度和仰角的影响	69
5 通信范围和探测范围	74
第三章 地形的影响	77
§9 交叉复杂地	77
1 关于地面断面图的制作	77
2 具有若干反射点的线路	78
3 复杂断面的线路上行程差和透过高度的决定	81
§10 反射点和夫果涅耳区	83
1 无线电波反射之射线(几何的)和波动的解释	83
2 自由空间中带有圆孔屏蔽时的夫果涅耳区	83
3 公分波与公分波从地面反射时的夫果涅耳区	85
§11 山脊和山岗的影响	87
1 有阴影区的线路	87
2 无线电波对不透明楔形屏的绕射	88
3 关于公分波与公分波在山脊和山岗上的绕射	90
4 干涉现象的计算。楔形屏蔽的“放大”	91
§12 关于地物的影响	95
1 树林的影响	95
2 建筑物的影响	97

3 甲板上的建筑物和船艙的影响	93
4 高崗和地物的回波	99
第四章 与气象学有关的问题	101
§13 关于气象学的一些知識	101
1 无线电气象学	101
2 空气的組成, 大气压力及湿度	102
3 空气湿度和水汽物	103
4 气象要素与高度的关系	104
5 关于空气运动, 空气团及锋	106
§14 空气的折射特性	109
1 介电常数及折射系数	109
2 关于介电常数和折射系数与高度的关系	110
3 介电常数及折射系数的垂直梯度	112
4 介电常数及折射系数的起伏	113
§15 水汽物和空气中水汽对公分波与公分波傳播的影响	118
1 概述	118
2 一些数据	119
3 雨、烏云和云的回波	123
4 关于水滴的有效散射面	128
第五章 公分波与公分波在对流层中的傳播	130
§16 公分波与公分波的折射	130
1 軌道的弯曲	130
2 等效地球半徑	133
3 折射的各种型式	134
4 折合折射系数	136
§17 折射的影响	140
1 折射角与到达角的变化	140
2 行程差与折射的关系	145
3 地面影响因子与折射的关系	145
4 符合于所选择的場强变化范围内的距离和高度	147
§18 波导傳播	149
1 一般特点介紹	149
2 现象的質的方面	150
3 場强与距离和高度的关系	153
4 探测区域和反常的光学现象	155
§19 逆增層的反射和多射綫的傳播	157
1 概述	157

2 逆增層的反射系数	159
3 公分波与公分波从逆增層反射和多射綫傳播的一些实验数据	163
第六章 訊号电平与時間和气象条件的关系	169
§20 訊号电平	169
1 概述	169
2 訊号电平的记录特性	173
3 訊号电平记录的分析	176
4 主要气象过程的影响	183
§21 訊号电平的穩定	191
1 衰落的深度	192
2 訊号电平的穩定特性	196
3 关于通信破坏和穩定的几率	203
§22 訊号电平穩定度的提高方法	207
1 与选择綫路有关的考虑	207
2 关于分集天綫的接收	211
3 关于分集频率的接收	215
第七章 远距离对流層傳播	217
§23 一些实验数据	217
1 概述	217
2 平均訊号电平与距离、波長、天綫高度和極化的关系	218
3 訊号电平的晝夜和季度变化、衰落和分集接收	225
4 气象和气候条件的影响	231
§24 一般特性問題	231
1 对流層中无线电波被湍流源的不均匀性所散射	234
2 接收功率	236
3 天綫增益的降低、方向圖的变寬	239
4 关于頻带的寬度和相位的起伏	241
5 关于理論範圍內的工作	243
附录 研究公分波与公分波傳播用的設備	246
1 概述	246
2 測量訊号电平的固定式設備	247
3 測量訊号电平的移动式設備	254
4 研究失真的多射綫傳播(远距离对流層傳播时)和相位起伏用的特殊設備	256

公寸波与公分波的
傳 播

A. Γ. 阿林貝爾格著
尙志祥譯



書中研究了公分波與公分波在各種條件下的傳播問題，並引用了一些計算公式和實際特性知識。書中尽可能地以最近在這方面所獲得的資料來說明。敘述中沒有採用繁瑣的數學方式。

本書主要地供給實際工作在公分波與公分波技術領域內的讀者們之用。但是可以預料，它對相應學校的大學生們和教員們亦是有益的。

蘇聯 A. Г. Арсберг 著

“Распространение дециметровых и сантиметровых волн” (Советское радио 1957年第一版)

*

國際科學出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第074號
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092¹/₁₆ 印張16²/₈ 397千字

1959年5月第一版

1959年5月第一次印刷

印數：0,001—5,600冊 定價：(11)2.50元

NO. 2885

目 录

前言	5	3 一些实验数据	45
序言	7	4 吸收	45
第一章 公分波与公分波在自由空间的传播	13	5 地面的电性	56
§1 电磁波	13	§7 平直地面的影响	52
1 公分波与公分波	13	1 反射(干涉的)公式	52
2 场强、相位与无线电波的传播速度	14	2 地面影响因子与天线高度、距离和波长的关系	55
3 无线电波的能量与极化	16	3 有效反射系数的影响	56
4 无线电波的相加	17	4 关于天线垂直面方向性的影响	60
§2 关于天线的一些知识	19	5 平方公式	60
1 发射天线与接收天线的方向性和互易性	19	§8 地球曲率的影响	61
2 公分波与公分波天线的方向圆和方向作用系数	20	1 反射点位置	61
3 进入接收机的功率	22	2 折合高度和行程差	63
4 无线电波传播时的衰减	23	3 关于球形地球的反射和反射公式的适用性	66
§3 不同目标的无线电回波	25	4 距离、高度和仰角的影响	69
1 无线电波的绕射	25	5 通信范围和探测范围	74
2 公分波与公分波被各种物体的散射	26	第三章 地形的影响	77
3 各种目标的有效散射线	28	§9 交叉复杂地	77
4 半波振子、球与平面	29	1 关于地面断面图的制作	77
5 角形反射体	30	2 具有若干反射点的线路	78
§4 对于无线电通信和雷达的主要相互关系	31	3 复杂断面的线路上行程差和透过高度的决定	81
1 符合于自由空间的条件	31	§10 反射点和夫果涅耳区	83
2 无线电通信和雷达	31	1 无线电波反射之射线(几何的)和波动的解释	83
3 关于最大作用距离	33	2 自由空间中带有圆孔屏蔽时的夫果涅耳区	83
4 关于无源转播站	33	3 公分波与公分波从地面反射时的夫果涅耳区	85
第二章 光滑地面的影响	36	§11 山脊和山岗的影响	87
§5 前言与术语	36	1 有阴影区的线路	87
1 地及对流层的影响因子	36	2 无线电波对不透明楔形屏的绕射	88
2 几何地平线	36	3 关于公分波与公分波在山脊和山岗上的绕射	90
3 照亮区、半阴影区与阴影区	37	4 干涉现象的计算。楔形屏蔽的“放大”	91
4 开圆的与遮断的线路。抛物线坐标格子	38	§12 关于地物的影响	95
§6 公分波与公分波被地面的反射与吸收	40	1 树林的影响	95
1 镜式与散射式(漫射)的反射	40	2 建筑物的影响	97
2 反射系数(镜式)	43		

3 甲板上的建筑物和船艙的影响	93
4 高崗和地物的回波	99
第四章 与气象学有关的问题	101
§13 关于气象学的一些知識	101
1 无线电气象学	101
2 空气的組成, 大气压力及湿度	102
3 空气湿度和水汽物	103
4 气象要素与高度的关系	104
5 关于空气运动, 空气团及锋	106
§14 空气的折射特性	109
1 介电常数和折射系数	109
2 关于介电常数和折射系数与高度的关系	110
3 介电常数及折射系数的垂直梯度	112
4 介电常数及折射系数的起伏	113
§15 水汽物和空气中水汽对公分波与公分波傳播的影响	118
1 概述	118
2 一些数据	119
3 雨、烏云和云的回波	123
4 关于水滴的有效散射面	128
第五章 公分波与公分波在对流层中的傳播	130
§16 公分波与公分波的折射	130
1 軌道的弯曲	130
2 等效地球半徑	133
3 折射的各种型式	134
4 折合折射系数	136
§17 折射的影响	140
1 折射角与到达角的变化	140
2 行程差与折射的关系	145
3 地面影响因子与折射的关系	145
4 符合于所选择的場强变化范围内的距离和高度	147
§18 波导傳播	149
1 一般特点介紹	149
2 现象的質的方面	150
3 場强与距离和高度的关系	153
4 探测区域和反常的光学现象	155
§19 逆增層的反射和多射线傳播	157
1 概述	157

2 逆增層的反射系数	159
3 公分波与公分波从逆增層反射和多射线傳播的一些实验数据	163
第六章 訊号电平与时间和气象条件的关系	169
§20 訊号电平	169
1 概述	169
2 訊号电平的记录特性	173
3 訊号电平记录的分析	173
4 主要气象过程的影响	183
§21 訊号电平的穩定	191
1 衰落的深度	192
2 訊号电平的穩定特性	196
3 关于通信破坏和穩定的几率	203
§22 訊号电平穩定度的提高方法	207
1 与选择线路有关的考虑	207
2 关于分集天綫的接收	211
3 关于分集频率的接收	215
第七章 远距离对流层傳播	217
§23 一些实验数据	217
1 概述	217
2 平均訊号电平与距离、波長、天綫高度和極化的关系	218
3 訊号电平的晝夜和季度变化、衰落和分集接收	225
4 气象和气候条件的影响	231
§24 一般特性問題	231
1 对流层中无线电波被湍流源的不均匀性所散射	234
2 接收功率	236
3 天綫增益的降低、方向圖的变寬	239
4 关于頻帶的寬度和相位的起伏	241
5 关于理論范围内的工作	243
附录 研究公分波与公分波傳播用的設備	246
1 概述	246
2 測量訊号电平的固定式設備	247
3 測量訊号电平的移动式設備	254
4 研究失真的多射线傳播(远距离对流层傳播时)和相位起伏用的特殊設備	256

前 言

超短波，特别是公寸波与公分波的实际意义近年来是大大地提高了，需要通晓这些电波传播问题的人们范围是大大地扩大了。因此，作者试图用十分易懂的形式来阐明公寸波与公分波传播的主要问题。同时，作者主要地是以实际工作在公寸波与公分波技术领域内的读者们为对象。但是可以预料，本书对于相应学校的大学生和教员们亦是有益的。

关于所述的问题，作者力图详细地谈到现象的物理方面，而不诉诸于繁复的数学演算，并尽可能地用图表以及有时用数量上的例子来说明。同时，料想读者已熟悉有关电磁波方面的基本概念和有了关于天线的一般概念。不过作者仍认为简短地温习一下与所述材料有直接关系的一些问题仍是有益的。此外，加入不大部分的关于地形断面图的绘制、气象学的必要知识和关于仪表和测量方法的某些补充知识看来是合适的。这就使得许多主要问题的阐述容易了，并使其更具体了。这些补充的主要部分放在附录中，有的则用小号字体印于正文中。初学的读者如只希望获得公寸波与公分波传播的一般概念，可以把这些部分略过不看。

书中感到了目前还比较不充分的关于公厘波传播的材料以及利用了一些关于公尺波传播的实验资料。这些材料的编入可以用更全面的观点来分析公寸波和公分波直接有关的主要问题。

Б. А. 符凡琴斯基 (Б. А. Введенский) 表现了对本工作的很大关怀，他读了本书的手稿并提出了许多宝贵的意见。各种科学讨论和同事们友谊的批评亦是非常有益的。在本书某些章节的准备中，И. Ц. 比克 (И. Ц. Пик), А. В. 索可洛夫 (А. В. Соколов) 和 Д. М. 维索可夫斯基 (Д. М. Високовский) 帮助了作者。作者也顾及了 К. Н. 脱罗罗夫 (К. Н. Трофимов) 和 В. И. 夏姆休耳 (В. И. Шамшур) 所发表的许多见解。所有上述人们作者都给以深厚的感谢。

А. Г. 阿林贝尔格于苏联科学院无线电与
电子学研究所，莫斯科，1956年8月。



序 言

我們的國家——無線電的祖國，是近十年來在無線電方面最有偉大成就的國家之一。無線電的發明者亞歷山大·史契潘諾維奇·波波夫早在1889年就獲得了重要的關於利用電磁波對遠距離發送訊號的可能性的結論。在他面前提出了這個任務後，經過了六年，於1895年5月7日他成功地實現了。這一天便是無線電的發明日。再經過二年後A. C. 波波夫就得到了關於無線電波在實際條件下傳播的第一個實驗資料，發現了無線電波被船艦所屏蔽並指出了研究地面、大氣層及地物影響的必要性。

A. C. 波波夫的功績只有在偉大的十月社會主義革命之後，當祖國的科學與技術開始了從未有過的興隆時期後才得到真正的認識。早在蘇維埃共和國的初創時期，B. И. 列寧就預言了無線電的未來發展。在共產黨的領導下蘇聯人民成功地實現了這一點。在蘇聯已經建立了現代的強大的無線電工業，建立了廣闊的無線電廣播網。在偉大的衛國戰爭年代裡，蘇聯軍隊和前线裝備了優質量的最新的無線電設備。現在擺在蘇聯專家面前的是繼續發展無線電這一重要而光榮的任務。

在完成五年計劃的基礎上，我們的國家達到了經濟建設與文化建設領域內的巨大進步。由於這些，大大地提高了廣泛地應用遠距離通訊體系的要求，使得能夠同時進行成百路電話的通訊，交換電視的節目以及對發電站、水力樞紐、輸油管等等自動化設備發送遙控的訊號。因此根據1955~1960年的發展蘇聯的第六個五年計劃，蘇共第二十次黨代表大會提出了關於建設不少於上萬公里的無線電中繼通信線路的指示。

如我們所知道的，無線電中繼線是由兩個終端站和許多中間的接收-發送站組成，站與站間的距離通常約為几十公里。個別情況下這個距離還更遠（200~300公里）。這些中間站轉播（也就是接收及自動發送）了全部線路上的對話。一般中繼線的長度可以達到幾千公里。

中繼線多半工作在公分波與公分波波段。這些波的应用保證了無線電中繼通信的方向性，能夠在許多情況下應用極小功率的無線電台，減小了相互干擾的可能性以及避免了电离層的影響。由於這些以及其他幾種原因，如由於對各種目標（飛機、船艦、烏雲、雨等等）有強的無線電回波和由於有精確地決定它們的位置的可能性，這些電波也通常应用在雷達中。所以所有這些無線電設備的設計與使用都緊緊地關聯到深入地研究公分波與公分波在不同條件下傳播特點的必要性。近年來這些研究擴展到毫米波方面。這一方面的工作密切地關聯到關於無線電波傳播理論的总的發展。

如所周知，這個科學課題緊緊地與物理學（電動力學、光學、統計物理學及部分的物質結構）、地球物理學（电离層物理、地面的電性質）、氣象學（高空氣象學、氣候學及天氣學）、天文學及測地學有關。無線電波傳播範圍內的實驗研究借助於無線電技術設備（接收-發射與無線設備、無線電測量儀表、電子射線管顯示器等等）來進行。

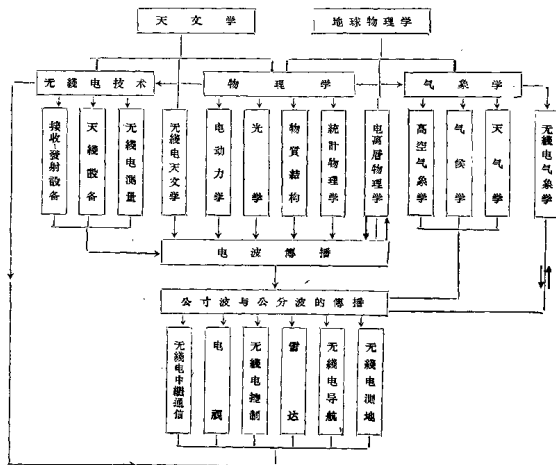
在研究無線電波傳播時，主要的注意力集中於發射與接收間所發生的過程，在接近於地球表面以及不同的大氣層內^①。在其目前的狀況下，無線電波傳播的理論解析了所研究現象的物理

① 因此無線電波沿各種金屬導體及波導的傳播不列在這一定義所包括的問題範圍內。

性質，指出了繼續研究的道路，給出了計算的關係式及推导出為設計及使用各種無線電設備所必須的結論。

公尺波與公分波的研究結果利用在無線電中繼通信、電視、無線電控制、雷達、無線電導航及無線電測地中。同時公尺波與公分波傳播的研究能够促進新的科學課題的出現與發展，如無線電氣象學、無線電天文學及部分的無線電光譜學。

關於無線電波傳播理論與其他科學和技術領域間的上述相互關係可以用圖表表示如下：



說明電波傳播理論與其他科學技術領域的相互關係的概略圖。

公尺波傳播的詳細研究是在公尺波與公分波的研究工作之前，在蘇聯由B. A. 符凡琴斯基 (B. A. Введенский) 及A. И. 达尼立夫斯基 (А. И. Данилевский) 开始于1922年。于1928年B. A. 符凡琴斯基已经获得了第一个关于这些电波在平地上传播的计算公式。在1928~1930年这个公式曾被A. B. 阿斯达弗耶夫 (А. В. Астафьев), A. Г. 阿林贝尔格及Ю. Н. 舒因 (Ю. Н. Швин) 等人地面上以及在飞机与气球上当飞行时作过各方面的校验。

这时候已经知道了公尺波的无线电接收有时候可能达到远远超过地平线视界的距离。同时接收讯号电平照例地极大，并且作极不经常的变化，其持久时间在很宽的范围内变化——从几秒、几小时到几分钟。此外，那时也已经知道公尺波从高空电离层的反射较弱，然而我们知道电离层对短波的传播起着重要的作用。所以伴随着公尺波的传播而指明的现象，能够完全令人

信服地代替以另外一种發生在大气中低的一層——对流層中的过程。但是由于地平綫範圍內的無線电接收更穩定，許多研究者的注意力那时候主要集中在考虑与天綫高度、距离、波长及極化等影响有关的問題上。

鑒于地形的影响使場强与距离的关系难以确定，A. Г. 阿林貝爾格，B. A. 庫索夫欽 (B. A. Кузовкин)，B. И. 班西可夫 (B. И. Пейсиков)，M. Л. 斯利奧士貝爾格 (M. Л. Слюзберг)，Ю. Н. 舒因等人于1932年在黑海进行了一系列的實驗。實驗表明了由于繞射与折射的緣故，公尺波接收能够超出地平綫之外。大概也是在那个时候，M. Т. 格立珂娃 (M. Т. Грехова) 及 B. М. 雪凡羅夫 (B. М. Бошневров) 在莫斯科与刘貝尔察 (Люберц) 間进行了公尺波的斜方向性通信。1933年在 B. A. 符凡琴斯基领导下由 M. Л. 斯利奧士貝爾格，E. H. 麦貝日尔斯 (E. H. Майзельс)，B. И. 班西可夫，E. A. 賽林 (E. A. Селин) 等人組成的科学考察团在黑海进行了工作。那时确定了，在良好的气象条件下公尺波的接收也有可能超出地平綫距离3~4倍。根据这些工作，不久就制造了当时实际应用的苏联的公尺波设备 (在作者的参与下)。

研究繞射理論發展的 B. A. 符凡琴斯基于1935年發表了第一个超短波繞射公式，这是在一一定的誤差下获得的， L 及为地平綫之外运用的 (按現代的术语說，称为阴影区域)。不久 (1936~1937年) 他把这个公式概括入升高的發射天綫与接收天綫的情况內，并且于1942年編制了通用的圖表，大大地簡化了全部的計算。1946年他与 M. И. 包諾馬烈夫 (M. И. Пономарев) 一同研究了关于用等效地球半徑計算折射的問題。后来 B. A. 福克 (B. A. Фок) 做了重大的进展，他开始于1944年發表了一系列的工作，包括繞射問題的一般解答以及后来的無線电波的折射問題。也同样应当注意 П. Е. 克拉斯努奇金 (П. Е. Краснушкин) 的工作 (1947年)，他在理論上研究了关于大气波導的問題以及特别是 B. A. 福克后来的工作 (1950~1956年)，給出了非均匀大气層中电波傳播的一般解答，以及 C. Я. 勃拉烏其 (C. Я. Брауде)，B. Н. 脫羅以察基 (B. Н. Троицкий) 及 A. Н. 卡利宁 (A. Н. Калинин) 等关于其他一系列重要問題的論文。

关于超短波傳播的国外研究方面，可以举出下列許多人的工作：斯脫烈脫 (Стрет)，埃克卡爾脫 (Эккарт)，帕林特立 (Плендль)，帕費斯捷尔 (Пфистер) 及克林干尔 (Клинкер) (德国)；如屋 (Жуо)，伏日 (Вож)，屋尔多士 (Оргуз)，夏文斯 (Шаванс)，普阿其 (Буать) 及勃拉斯賽利 (Блассель) (法国)；斯米脫-洛士 (Смит-Роз)，麥克-班脫利 (Мак-Петрь)，曼谷烏 (Мегоу)，山克斯頓 (Секстон) 及拉也达 (Райд) (英国)；諾尔頓 (Нортон)，貝洛烏士 (Берроуз)，普監耳 (Букер)，普林格頓 (Буллингтон)，脫羅列士 (Тролез)，高尔登 (Гордон)，監罗尔 (Керрол) 及巴尔西斯 (Барнс) (美国)；諾尔索凡尔 (Норсвер) (加拿大)；貝克門 (Бекмав) (捷克)；麥察屋 (Мацуо) (日本) 等等。

随着过渡到公尺波与公分波的应用，对流層的影响开始观察到很多，并且开始应用在較短的距离。同时由于天綫方向性的增加，关于地面影响的問題在許多情况下成为不怎么迫切的了，譬如当公尺波与公分波在“自由空間”中傳播时 (見第11頁中的表)。因此关于对流層对公尺波与公分波傳播的影响的問題看来是注意的中心了。

此外，还确定了許多在公尺波与公分波傳播时所出現的新的独特的因素，这是較長的波傳播时所沒有的 (或者在所有情况下是較少的)。这里应当举出的，譬如公尺波与公分波被各种目标散射 (二次輻射) 的問題，关于被雨霧所衰减的問題 (在公分波中还被水汽及水气所衰减)

以及其他种种問題。大約从40年代开始公寸波与公分波傳播的研究工作特別紧张，那时候拟制了产生与接收这些电波足够的现代化方法，能够制造现代的无线电中繼綫和雷达站。从公寸波与公分波傳播的观点看来，这些无线电技术部分有很大的共同点，并能够互相补充。

这里首先需要說明接收点場强与所用设备的电气数据、地形、發射点与接收点的相互位置（在雷达的情况下为所观察的目标）及气象条件的关系。

现在已经很清楚地知道：伴随着公寸波和公分波在对流层中傳播的气象现象是接收訊号电平昼夜、季度及短時間变化的原因。它們有时候引起了被观察的无线电通信及雷达作用距离的巨大增加，从对流层获得回波以及其他許多现象。这些問題的总和組成了与电波傳播理論、气象学有关的无线电气象学的主要内容，这里的气象学是指發生在大气层内部的过程及其预测的研究。

近5~8年来得到了关于公尺波、公寸波及公分波超越地平綫距离几百公里傳播的新資料。这种情况往往称为超短波的对流层远距离傳播。看来它具备着某些特点，要解析它应当轉到高空气象方面的研究。所得結論指出：由于空气介电常数的起伏所引起的无线电波散射起着重要的作用，而介电常数的起伏则是因空气的湍流运动而形成^①。当这种散射现象得十分明显时，这种超短波傳播可以称为，譬如說，漫射（Диффузный）。这証实了接收訊号的起伏特性，天綫定向及其方向性的相互影响以及某些其他的现象。同一时候訊号电平平均值与空气介电常数垂直梯度間的关系还不允許放弃繞射—折射概念的繼續發展。

这个問題的总的見解，能够普及到全部现象并能估計每一个的作用，到現在还不曾有。必須繼續进行理論及实验上的研究。其中必須要研究气候条件的影响，它到現在还很不清楚。但是已有的实验資料已經有足够的根据用来实际利用远到200~300公里的对流层超短波傳播。在这方面有完全具体的关于多路广播及电视的成就。

目前公寸波与公分波在各种条件下傳播的理論与实验研究已經有如此大的进展，同时所积累的資料也是如此丰富与多种多样，所以合理分类的本身是有不少的困难。現在这种分类应当根据地面及对流层影响的綜合估計（見表）。除了一定的显明性外，这种分类的主要便利是可以比較容易地对任何一种傳播条件下的实验資料与理論資料。但是不言而喻，这些分类也同其他类似的問題一样，在各种范围間是完全不会有任何尖銳的与明显的界限。所以很自然，与当地的条件有关，这些界限可以向任一方面偏移，而且可以互相超越。

包含在这个表里的自然条件（地形、气象条件、地物的位置等等）是如此多种多样，同时有着如此复杂的相互联系；要对每个个别情况作准确的定量的估价是極其困难。这是因为在实际条件下，在決定接收点場强中起作用的不仅仅是主要的现象，而且还有附带的及次要的现象。它們的表现形式是訊号电平的随机变化（其中如衰落），这些能够發生，但也能够消失，或成为另一种样子。这些随机现象的影响是多种多样的与矛盾的，但各別結果經過許多次的統計分析能够得出一定的平均数据，它是公寸波与公分波在这些条件下傳播的主要特点。这意思就是說，离开了建立在各种簡單假定之上的公寸波与公分波傳播理論，这里所要求得到的仅仅是实际所必須的平均值。除这些以外还必须同样假定实际上可能的偏离平均值的数值，并知道这种偏离的原因。

① 有时候公尺波的接收甚至可以达到1500~2000公里，但这是属于超短波的电离層傳播問題。除了某些共同的理論外，这些問題还有自己很大的特点，我們这里不去研究它。

現在公分波与公分波傳播理論被苏联学者成功地朝着两个互相弥补的方向發展。一个是对研究問題的“工程上”的提法，其基础是尽可能地接近于实际的簡單办法。在許多情况下这可以推导出比較簡單而明显的公式与圖表，用起来不需要很長的时间和特別熟練的程度。事实上說明这种解决办法通常是完全有效的。另一个是較为严格的理論上的論述，并应用了复杂的数学工具。这样所得到的公式常常能够很好地注意到各个因素的影响以及觀察出其中的微妙之处，这可以加速在不严格求解时對問題的解决。但是这种公式通常極为复杂，計算它們需要有足够的熟練程度、大量的時間以及应用各种計算裝置。实际上这种計算的价值主要是在于帮助决定前面所講的簡單公式的应用范围。同时，实验的研究以及我們感兴趣的波段内的各种无线电设备的使用具有重大的意义。这种研究在苏联进行，也在国外进行（美国、英国、法国、日本及部分的其他国家），并且普及到不同的地理区域。关于这些工作我們将在下面介紹。

*

*

*

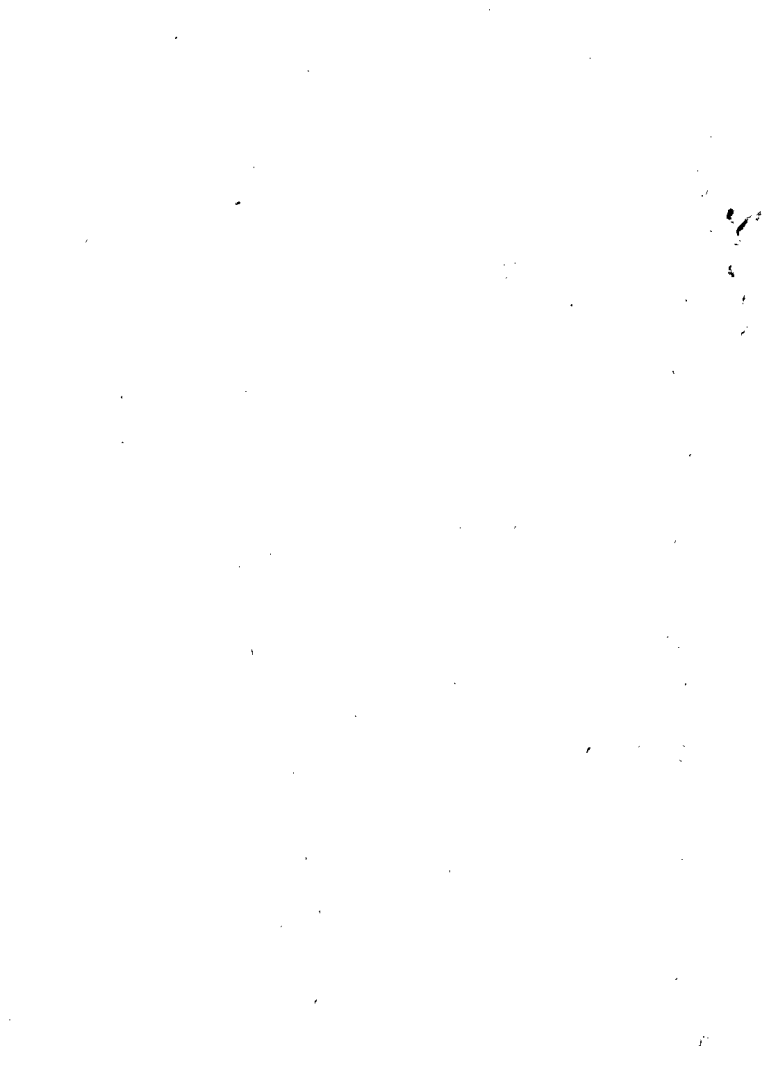
我們簡短的序言說明了虽然成績是有的，但是公分波与公分波的傳播还需要繼續进行科学研究工作。必須扩大到不同的地理区域中去，要有良好的进行工作的技术装备以及很快地把所得結果用于实际中。同时不应当忘記，国外的实验虽然有时候是有价值的，但是离不开落在其身上的經濟上的烙印、公司的竞争等等，这些在很大程度上决定了研究的方向。所以第六个五年计划的工作綱領要求我們有自己的發展道路。

我們确信，苏联專家們在数量上不断地从有良好培养的青年中得到补充的条件下将能成功地担负起这一任务，同时为了各种目的，公分波与公分波的实际应用范围在最近时期必將大大地扩展。

超短波傳播主要現象的概略分类

区域种类和相应的线路	傳播种类和主要現象的一般特性	主 要 情 况
自由空間区	自由傳播 地面的影响实际上没有。对远距离由于折射的緣故，无线电波的軌迹在某些方面，由于反射，似乎有某些起伏。由于水汽物、冰塊及水汽的緣故，公分波，特别是公分波的接收可能有某些衰减。	a) 无线电波傳播發生在离开地面很远的地方 b) 无线电波从地面的反射明显地表现为漫射的特性 B) 所采用的方向性保证了离开地面而發射
照亮区开闢线路	干涉傳播 直接波与从地面反射的波干涉。折射与部分的散射形成季度的波痕的和短暂的訊号电平的变化及无线电波到达角的变化。	a) 平地（大陆上） b) 海面 B) 无遮蔽的縱橫交錯地
阴影区和半阴影区 較短距离的遮断线路和半遮断线路	繞射傳播 接收是由于无线电波围绕遮蔽障碍物而发生的繞射。在公尺波和在个别情况下可以使訊号电平有某些增加。折射与反射使訊号电平变化并使其稳定性变坏。	遮蔽是由于： a) 地球曲率 b) 山脊和山崗 B) 障碍物
深阴影区 較远距离的遮断线路	远距离傳播 由于对流层的非均匀性而产生了无线电波的反射、折射和散射，可以在远远超过地面的距离上接收。在公分波，特别是公分波应为計算水汽物、冰塊和水汽所引起的衰减。	a) 波导傳播 b) 層的非均匀性的反射 B) 波導傳播

① 水汽凝結物（雨、霧、云、雪等等）。



第一章 公分波与公分波在自由空間的傳播

§1 电 磁 波

1 公分波与公分波

从物理教科書中知道，由于电磁力而产生的电荷振动将伴随着交变电場的出現。也就是由于电磁通量而产生的磁場变化将导致交变电場的产生。每一种場都用其强度的大小与方向来表征，强度則决定于电流与电荷、观察点的位置及時間。

交变电場的存在是由于位移电流的出現，它正比于电場对時間的变化速度；变化發生得愈快，位移电流也愈大。在真空中，位移电流等于电場强度的变化速度（在單位的选择适当时）。在其他介質中这里还要加上由于該介質中的电荷位移而产生的电流。位移电流的出現，如同傳导电流一样，将伴随着磁場的产生，也就是說磁場是由电場而产生。因此电場的变化将不可避免地产生磁場的变化，以及相反，磁場的变化引起电場的产生等等。同时电場与磁場的方向在空間每一点是互相正交的。这种在全部時間内因果交替的复杂过程证实了整个現象内部紧密的相互联系。这种电場与磁場相互联系的总和称为电磁場。

在發生这些全部現象的时间过程內，全部時間在消逝着。傳播的交变电場便是电磁波。这些波的最簡單形式便是它們的电場强度（ E ）与磁場强度（ H ）（或者可以說——場）按照簡單的正弦振蕩規律作变化^①。物理上称这种波为單色的（монохроматический）。

描述这些电磁現象的基本数学关系是于1865年由英国理論物理学家麦克斯韋制定的。关于位移电流的假說也是屬於他的。电磁場方程（麦克斯韋方程）确定了电場强度与磁場强度在時間上与空間上变化間的关系。这些方程有可能完全地描述全部宏观^②电磁現象的总和，是从事于电磁場理論問題及光的电磁理論的电动力学的基礎。在研究电磁波傳播时，电磁現象与光的有机联系是經常出現的。所以，在这範圍內許多問題的解决办法是借用于光学的。

1888年德国物理学家伽利哈·赫·茲首先用实验方法获得电磁波。他本人进行了一连串关于反射、折射、極化以及干涉的古典实验，測量了傳播的速度及研究了簡單的輻射理論（赫茲振子）。这些工作带来了理論上与实验研究上的特性。无线电發明者A. C. 波波夫于1896年首先应用电磁波作为远距离傳遞訊号之用。老实說是从那个时候起才开始进行电磁波在现实条件下傳播的研究（見序言）。

目前对物理学者及技术工作者感兴趣的整个頻譜上，从应用于电工中的低頻开始一直到放射性元素所放射的 γ 射綫止，已經沒有留下未被研究过的范围了。具有特別重要意义的是在电波与紅外光波銜接点上的弥补“空白”工作，这里有我們著名的物理学者П. Н. 列別杰夫（П. Н.

① 为了簡單起見，我們將不采用黑体字，线条或箭头来表示向量。

② 宏观現象——进行在比較大的規模內的現象（来源于希腊字母“makros”——大的意思及“skopein”——观察的意思）。