

电离层研究五十年

电离层研究五十年

J. A. 拉特克利夫 主编

科学出版社

4216
18

科学出版社

56.4216

318

电离层研究五十年

J. A. 拉特克利夫 主编

武汉大学空间物理系 译



科学出版社

1983

1111004

内 容 简 介

本书为《大气和大地物理学杂志》的一期专刊，由16篇文章组成。作者都是从事电离层研究多年、世界知名的专家。他们各就所长回顾并评述了电离层研究实验和理论方面的发展，内容精简扼要、深入浅出，既是一本简介，也是一部小史。文章后面大都附有参考书目，便利读者作进一步研究。

本书适于从事电波传播、空间物理，特别是电离层物理方面的科研人员、教师、学生和爱好者阅读参考。

Journal of
ATMOSPHERIC AND TERRESTRIAL PHYSICS
Volume 36 Number 12
December, 1974

电离层研究五十年

J. A. 拉特克利夫 主编

武汉大学空间物理系 译

责任编辑 侯建勤

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年10月第一版 开本：787×1092 1/16
1983年10月第一次印刷 印张：12 1/2
印数：0001-2,350 字数：290,000

统一书号：13031·2166

本社书号：2969·13-15

定价：2.00元

前 言

1924年12月, Appleton 和 Barnett, 以及 Breit 和 Tuve 首先对陡入射到电离层中而被反射的无线电波进行了观测。《大气及地球物理学报》特编辑本专刊, 用以纪念这类实验的五十周年。直到1950年前后, 所有早期实验都是在地面(或低空飞行器上)进行的, 而近年许多极有意义的实验却是在空间飞行器上进行的。近年的实验结果提高并推广了由地面实验所得出的理论。因此, 本专刊所载文献归为早期贡献和近年贡献两类。

前此见于其它刊物的两篇文献对本专刊极有价值。在征得原刊物同意之后, 本专刊在此重予发表(其中一篇只重新发表一部分), 现谨代表全体读者对版权所有者的慨允此事表示感谢。

J. A. 拉特克利夫 主编

(王 桑译, 梁百先校)

目 录

前言

电离层的早期研究·····	M. A. F. 巴尼特 (1)
卡内基研究院的早期脉冲无线电技术·····	M. A. 杜福 (7)
德国的早期电离层研究·····	W. 迪明格尔 (14)
1925—1955年期间电离层研究的实验方法·····	J. A. 拉特克利夫 (21)
电离层研究五十年: 早期实验方面·····	A. H. 韦尼克 (29)
电离层研究五十年: 早期电磁理论·····	H. G. 布克 (35)
电离层早期理论·····	E. O. 赫尔伯特 (52)
1930—1955年期间的电离层理论·····	H. S. W. 梅西 (55)
电离层的早期历史·····	A. L. 格林 (69)
有关电离层形成的早期 (1925—1955年) 概念·····	J. A. 拉特克利夫 (74)
战后电离层无线电探测的进展·····	J. V. 埃文斯 (85)
用空间技术研究电离层·····	S. A. 鲍希尔 (123)
太阳电离辐射·····	H. 弗里德曼 (131)
卫星探测电离层·····	A. P. 威尔莫尔 (142)
电离层中的辐射和碰撞过程·····	D. R. 贝茨 (165)
电离层动力学·····	H. 里什贝思 (182)
译后记 ·····	(191)

电离层的早期研究

巴尼特 (M. A. F. Barnett)*

在经过了五十年后的今天，回忆有关电离层早期实验的许多细节，这是不容易的。

我在无线电传播方面特有的兴趣，是在新西兰大学期间开始的。二十年代初期，无线电广播还处于幼年时代，在 R. Jack 教授的指导下，奥塔哥大学物理系建立了一个实验性无线电话发射机（波长 400 米），我的硕士论文，叙述了对该机调制系统的分析。这个工作以及我与业余爱好者们一起操作短波发射机的事实，奠定了我在无线电方面兴趣的基础。

在那个时候，一般认为，大气高层的电离层，即 Heaviside 层，使无线电波能发射到远距离，而观察到的无线电广播发射的衰落一定与这个层有关。在无线电广播频段内（波长为 300—500 米），信号强度随其与发射机的距离而变化的一般模型业已知道得相当清楚。在距发射机 30—50 公里的范围内，地面波的衰落比较小，接收信号在 24 小时内表现恒定。与此相反，在比如 250 公里或更远的距离上，白天接收到的信号很弱，晚上的变化幅度很大，平均强度为白天数值的许多倍。在发射机附近，地面波（直接波）一直是主要的，而在远距离的情况，从 Heaviside 层回来的间接波却占优势。在中距离上，接收信号则是两个波的合成。

众所周知，在无线电广播波段里，在离发射机大约 80 公里的距离上，晚上可以探测到衰落（意味着有间接波存在）。但是，尚未确切知道在比这个距离短得多的距离上，是否有从 Heaviside 层回来的间接波。某种类似于在短波发射中观察到的‘跳距效应’似乎可能发生。

去 Cavendish 实验室时，虽然我怀疑可能必须从事放射性方面的工作，但是，我却希望能做无线电传播方面的研究。1924 年 4 月，在我第一次同 Ernest Rutherford 爵士会见时，我高兴地知道了，我将和我的导师 E. V. Appleton 一起做关于无线电传播的工作。事实上，这次会见时，Appleton 也在场。以后同意我首先在剑桥从事对英国无线电广播公司在伦敦的 2LO 电台发射波的衰落效应的研究。

在 Cavendish 实验室建立了一个与晶体检波器耦合的二管射频放大器。有一个灵敏的（也是昂贵的）镜检流计，再用一个晶体检波器来克服电子管检波器平衡系统不免失效的危险。光线从检流计直接反射到等速运动（通常 6 秒一格）的图表纸上，光点的位置被记录下来。用这种方法把衰落曲线直接地描绘在纸上。

由于电火花线圈等件以及晚上在附近的一栋大楼中工作的水银电弧整流器的本地干扰，Cavendish 实验室的接收条件是不利的。然而，2LO 信号在剑桥的强度高得足够给出合理的结果。

* 新西兰瓦伊卡内 (Waikanae)。

从所有在剑桥获得的记录中发现，在白天，2LO 的信号强度一直相当恒定。直到几乎日落的时候，才开始有微小变化，此变化一直持续到整个晚上。平均信号强度仍然为常数，这一点支持了这样的假定，即衰落是由于相位和振幅都在变化的下行波产生干涉的结果。衰落的周期在晚上是变化的，并且各晚上都不同。但是，有一个趋势，在日落后30—40分钟，变化较规则。在这个时间内，每分钟通常有一、二个起伏，此后，衰落的变化趋于不规则，一般也不那么快。

下述想法是很吸引人的，即认为当复合发生和电离层的有效高度增加时，至少有某些变化是由于直接射线和间接射线的路程差稳定增长而引起的干涉条纹所产生的。

衰落的哪部分是由于程差的变化引起，哪部分是由于下行射线振幅的变化引起，这是无法区别的。某种想法想到可以比较两个接收机的衰落，这两个接收机在传播方向上相距略大于半波长，在此情况下，由于程差变化所引起的衰落变化在两接收机上应当反相。然而，可以看出，如果发射台在短时间间隔内（比如说10秒）可以在小范围内均匀地改变它的波长，就可用更为直接而明显的方法了。分析研究所产生的干涉条纹数，就可以算出二条不同路径射线的程差，从而推算出反射层的有效高度。在假定反射高度约为100公里时，计算表明，在最宽的波段中，波长变化5—10米将产生几个干涉条纹。

波长变化实验

1924年10月初，Appleton 向无线电研究部提出了这项建议，且在英国广播公司合作做此实验的问题上，得到了支持。

研究部也安排了和 J. Hollingworth 及 R. L. Smith-Rose 的合作，结果在10月30号和11月7号的傍晚进行了从国立物理实验室发射机（500瓦）发射的两次传输实验。平均波长大约是800米，在半分钟的间隔期内，使波长连续变化25米。不幸的是剑桥的接收条件很不理想，没有得到有用的结果。

英国广播公司不能对2LO 发射台安排合适的改变，但却愿从他们的伯恩默思台提供波长改变。从剑桥到伯恩默思的距离太大，不能得到满意的结果（信号太弱，而且，间接波的强度在晚上往往比直接波信号强度大）。牛津恰在合适的距离上，不过我个人倒希望接收机距伯恩默思更近些（比如说80—90公里，而不是125公里），以便有较大的信噪比。

在牛津大学电学实验室，J. S. Townsend 教授和 E. W. B. Gill 为我们接收台提供了极好的设备，A. G. D. West 上尉主管伯恩默思台，并将发射机安排到在15—30秒内能均匀产生7—10米可知的波长变化。将一个钝调的四级高频放大器当做接收机使用，信号电流同时用一个动圈型和一个小的爱因多芬型（Einthoven type）电流计加以测量。实验在午夜后片刻就开始，此时，从伯恩默思和其它英国广播公司台站发射的正常无线电广播业已结束。地面有线通信用作控制，在实验过程中，没有进行调制。第一次实验在1924年12月11日进行。

在牛津的实验中，两个电流计上信号的变化都必须由眼睛来观察，因而包含很快地接踵而来干涉条纹的快速变化不能利用。稳定信号（当波长不变时）受到快的衰落，但是，幸运的是，它是一个相当均匀的衰落，每分钟衰落11—12次。采取的方法是，一分钟有一

半的时间稳定发射，此时数出自然衰落的次数；在后半分钟期间，波长就均匀地在7或10米的范围内变化，再把自然衰落加上干涉条纹的数目代算出来。这种方法显然不是很满意的，但是利用一种快的波长变化和在爱因多芬电流计上计数干涉条纹（于是自然衰落的数目减低）的尝试失败了，这是因为来自火花式电台及天电干扰相当大，而它们产生的起伏不能与干涉条纹的变化区别开来。对于这种瞬时效应，惯性更大的动圈电流计不那么容易起反应，因而如果干涉条纹发生不太快的话就能显出一连串的条纹。

第一次实验后，我感到满意的是我们已经证实了一个下行波的存在（获得了反射层的近似高度），下一步是安排更合意的接收条件和把照像记录同爱因多芬电流计一起使用的实验。Appleton 决定在发表结果或向无线电研究部接洽进一步的资助以前，先作出证实性的实验可能是上策。

第二次牛津实验于1925年2月17日进行，这次实验的条件与第一次实验几乎完全相同，对稳定波长而言，甚至每分钟11—12次相当均匀的衰落周期也几乎是完全相同的。当波长在385—392米的范围内变化时，产生附加干涉条纹的平均数为 $4\frac{1}{2}$ 。变化为385—395米时，附加干涉条纹的平均数变为7。这两个结果表示，直接射线和间接射线的程差大约为100公里。这样的程差是会由大约在90公里高度的反射层引起的。

牛津实验的情况以致编者信的方式发表在1925年3月7日出版的“*Nature*（自然）”上（Vol. 115, p. 333）。

〔信中程差和高度的数字略低于上述数字，上述数字系摘自 Royal Society（皇家学会会刊）的一篇文章并见于我的学位论文。由于没有原来的数字和分析，对这个差异，我现在也不能加以说明，或许在为各个实验结果求平均值时对不同的读数给予了不同的权重〕。

理论上的考虑

当实验工作继续进行的时候，人们对有关高层大气电离作用的各种想法作了大量的考虑。我想起了 Balfour Stewart, Schuster, Kennelly, Heaviside, Stormer, Chapman 和 Milne 这些人。我们也想过无线电波在电离层中被偏移的可能机制。Eccles 1912年在皇家学会会刊上的文章是一个著名的贡献。毫无疑问，我们的想法是受到 Lorentz 关于光通过透明晶体，特别是当磁场存在时的传输情况分析的强大影响。

我十分清楚地回忆到1924年10月29日 Joseph Larmor 爵士在 Cavendish 实验室的讲演，他讲了他下列文章的要点，该文题为《为什么无线电波能绕地球弯曲》，后来发表在 *Philosophical Magazine*（哲学杂志）的12月号上面（Vol. xviii）。他的分析完全遵循不同的路线，但是，我记得，他完全没有提到 Lorentz 早期对光波类似问题的处理而使我非常吃惊。Larmor 显然完全忽视了地磁场对于电波的影响，在 Ernest Rutherford 爵士邀请讨论的时候，我感到无法加以评论。总之，我大概是太胆怯的缘故。

我们有一段时间一直在考虑 Lorentz 分析的含意。Appleton 已经计算出，在英国临界波长大约是350米（假定磁场为0.3高斯），如果涉及的是具有电子质量的离子的话。据我回忆，Appleton 一次公开提到这些概念是在1924年11月28日由物理学会组织的“无线电波传输所受的地球物理影响讨论会”（*Proc. Phys. Soc. Lond.* 37, 16d）期间。

Appleton 对可能的磁效应发生实际兴趣从下述事实可以看出, 刚做完第一次牛津实验, 他立即写信给他在格林威治观象台的朋友 W. M. H. Greaves, 询问 12 月 11 日的记录是否显示了任何磁的异常情况。答复指出, 在实验期间, 那里曾有一个小到中等的扰动。

下射角的测量

第二个基本实验是为测定下行射线到达角而设计的, 于 1925 年夏季进行的。这一工作是和 J. A. Ratcliffe 合作的, 这标志着一个非常愉快的合作开始。

如果假设在广播频段上地面对电波来说是一个好的反射面 (这已被证明), 容易证明, 位于传播面内环形天线上干涉衰落的振幅大于垂直天线上的衰落振幅, 二值的比为 $\sec \phi$, 这里 ϕ 是下行射线的入射角。导致这种结果的分析以及有关实验结果和结论的比较, 完整的描述载于皇家学会会报《关于电射线向下反射的某些直接证据》一文中 (*Proc. Roy. Soc. A109*, 621)。

实验在剑桥大学靶场上进行, 采用了一个 T 型天线和一个大的单环天线。T 型天线面垂直平分环形天线面, 以保证相互作用最小。使用了两个相同的接收系统, 并将高频放大器加以调整使其在白天给出同样的电流计读数。在衰落开始的时候, 可以观察到信号变量与昼间平均值的比。

第一批实验是用伦敦 2LO 信号进行的。当两个天线靠得非常近的时候 (10 米以内), 两套接收系统上的变化是同步的, 单个衰落偏离的比能够测出, 且可定出其平均值。随着它们之间的距离增大 (100 米), 它们之间就极少相关性了, 但在此情况下, 两天线在一段时间里的平均偏离是可以比较的。天线间隔很短时, 平均比值为 2.85, 给出 ϕ 的值为 69° 。在另一情况下, 平均为 2.2, 相当于一个 63° 的角。

也用伯明翰的 5IT 信号进行了测量。接收机到发射机的距离是 140 公里, 而距伦敦则为 80 公里。在这种情况下, 比值的平均值表明对下行射线的入射角平均值为 48° 。

经 Ratcliffe 建议, 打算在拉文斯托尔 (Rawenstall) 接收曼彻斯特的 2ZY 信号, 并测出它的下射角。在这种情况下, 由于两地间山丘的屏蔽作用, 地波相对强度大为减小。在白天, 信号强度不断有小量变化, 以后表明, 这些变化归因于发射机。在晚上, 圆环天线上的变量比垂直天线上的大得多, 由此表明, 离发射机的距离小到 30 公里时, 下行射线仍然可以探测到。不幸地是, 传输信号中持续的小量变化使我们不可能对下射角进行合理的精确测量。

在彼得博罗的进展

1925 年 2 月 28 日, 刚做完牛津实验, 我和 Appleton 在无线电研究部办公室参加了一次会议。对我们希望将来工作所遵循的路线进行了说明。我非常感谢科学和工业研究部的鼓励和事后提供的财政的支援。

在彼得博罗以北几英里的多格梭普 (Dogsthorpe) 得到了一个很好的接收场地。这个场地曾是邮电局的实验站, 已经有了天线和合适的房舍。还找到一位科技管理员

W. C. Brown.

工作于1925年9月开始,而且重复做了来自伯恩默思站和特丁顿的国立物理实验室发射机的两条发射线路的牛津型实验。用了具有照相记录的爱因多芬电流计,而波长的改变一般只持续5秒钟,因而自然衰落的影响大大缩小。为了避免广播电台的干扰,这个实验必须限制在午夜到日出或稍后的一段期间,在此之后间接射线已不能被探测到。这样取得了数百份记录。

晚上干涉条纹的性质通常是复杂的,但是从日出前一小时起就逐渐变得很稳定。这些记录表明,在这期间,反射层的等效高度从115公里降到95公里。

在彼得博罗最初几年观察到的一些结果,发表在皇家学会会报,题为《关于地波和被高层大气偏折的波之间的无线电干涉现象》(*Proc. Roy. Soc. A113*, 450)。

在彼得博罗做实验对用垂直天线和环形天线交替接收人为的干涉条纹的振幅加以比较,按照剑桥早先的测量方法,可以确定下射角,而且具有较高的精确度。在接收到适当平滑的条纹的一段时期,这种方法能够测量任何瞬刻的下射角 ϕ ,而干涉条纹的数目又可给出相应的程差。发现甚至在程差保持恒定时, ϕ 角在它的平均值附近仍常有一个小的、比较快的变化。这一现象解释是假定这一层中的离子分布是不规则的,这样就类似于光从被波纹所扰动的水面反射而引起的效果。

如上所述,半夜接收到的干涉条纹性质上往往是复杂的。可以看出下列三种类型的不规则性。

(a) 有时干涉条纹振幅的涨落是慢的和有节奏的,可以认为是两个程差大致相同的射线的差拍。这有利于这样的想法,即有时可以收到两个(或更多的)强度近似相同的射线从不规则面反射回来。

(b) 有小的次级干涉条纹叠加在正常的干涉条纹上。往往约有 $2\frac{1}{2}$ 倍的次级条纹,这表明这个弱的干涉射线大概是受到电离层的两次反射,并受到在发射机和接收机距离的中间处的地面反射的一束射线。所增加的程差相应于干涉条纹频率增加 $2\frac{1}{2}$ 倍。

(c) 有相当大的振幅的次干涉条纹叠加在正常条纹上。在这种情况下,频率关系不那么稳定,但通常大约是2:1。这里似乎是有第二条射线更深地进入到电离层中。有时发生这样的情况,正常射线引起的初级干涉条纹消失,只剩下一串平滑,振幅相当大,且数目为通常2或3倍的干涉条纹。在这些情况下,测量出的下射角表明,这种射线的到达角比正常射线的更陡,说明是从高得多的地方反射来的。

波长变化的实验给出了直接波和间接波量值的相对大小,同时也给出了间接波的偏离角。从这些数据计算了层的等效反射系数。发现这系数变化幅度很大,当反射高度增大时有所增加,与离子折射理论所意料的一样。例如,发现当波长每变化10米,干涉条纹数为6时,反射系数为8%。在深穿透的情况下,当干涉条纹的数值为30时,反射系数是50%,而且没有发现比这个更高的值。有趣的是,按照磁离子理论,对于象这种由北到南的传输,可期望接收一种振幅为总振幅一半的椭圆或圆偏振的波(沿另外方向旋转的一半被吸收)。

我的博士论文对这些后来的实验及其计算结果有详细的描述。

地面衰减的测定

虽然和电离层研究的直接联系较少，但是对于我同 Jack Ratcliffe 在下述方面的合作仍有愉快的回忆。他的工作是测量来自达文特里 (Daventry) 和伦敦广播电台的信号的地面衰减。

我记得曾用铁饼干盒作为仪器的屏蔽罩，也曾租用洗衣车作为运输工具。这个工作既产生了一些有用的科学数据，也有它轻松愉快的时刻。在 *Proc. Cam. Phil. Soc.* **25**, Part 3.288 中有这方面的描述。

E. V. Appleton

在剑桥曾与 Appleton 一同工作，使我感到非常幸运。

当他在伦敦国王学院担任教授的时候，虽然承担了许多其它工作，但他的关心和鼓励却从来未间断过。他是一名书信大师，我们大量的意见交换都是用通信的方式。我非常惋惜，所有的这些信件都没能保存下来。

他争取各种权势人物赞助的本领，使我们的实验得以在极其顺利的条件下进行。

Appleton 感人的热情并不局限在他的科学工作方面，而且还表现在他所做的每一件事中。当他在彼得博罗台熬夜帮做实验而喝着我们的助手不时为他提供的浓茶时，他好像把这当作一次奇遇。他总是和青少年一样朝气蓬勃。当他在玻特巴 (Potters Bar) 玩高尔夫球或引我到伦敦进行土耳其式沐浴时，这种朝气简直是引人注目的。

没有一个学生能希望得到一位比 Appleton 更富有启发性的导师和朋友了，对于他给予我的帮助和鼓励，我是非常铭感的。

回 顾

在过去的五十年中，技术发展已使实验设备完美程度远远超出了我们在二十年代初期的想象。我喜欢这样想：1924 和 1925 年的波长变化和下射角实验，丝毫没有改变 Carendish 实验室早期的“细绳和火漆”的传统，那儿，举足轻重的实验却是用简单的设备完成的。

(刘家栋译，虞哲芳、王 桑校)

卡内基研究院的早期脉冲无线电技术

杜福 (M. A. Tuve)*

摘 要

对 1923—1926 年期间无线电学科活动和研究的回忆,再一次地强调了 de Forest 和 Fuller 在 1913—1914 年期间对“无线电波反射层”所进行的早期研究。轶事记叙了早期从飞机反射的“骚扰”(1929)。

当我们全面观察无线电脉冲技术的巨大发展,并于现在庆祝我们认为是首次用无线电波研究高空大气无线电反射层性质的决定性实验的五十周年纪念时(可能是出于习惯),我们再一次地想到科学或技术的重大发展并不是突如其来的,而是在相当长时间内缓慢推进的。只有“时机成熟”,一种观念才得以发展(往往是对旧观念稍加修改),而通常独立地出现在几个地方,多少有点象许多人的“典型思想”同时表达一样。我们也应当看到,如果兴趣的总泉源在某一时期不“需要”从而不孕育某一特定的观念,那么,即使极其明确地表现了出来,也仍然会被忽视,而它被埋没的潜力等到过后某时方才得以表现。

第一次世界大战以前,所做的无线电反射层第一批直接研究显然也是这样。在 20 年代,我们中的大多数人,包括我们自己在内,对某些早期的观测和讨论,直到我们初步研究了 Kennelly-Heaviside 层以后才有所了解。当然我们都知道, Balfour, Stewart(1882)确认了高空大气存在一个“带电层”,并由 Arthur Schuster 详尽阐明其为引起罗盘变化的电流的所在地,同时我们还知道 Kennelly 和 Heaviside 曾在 1902 年各自分别指出: 1901 年 12 月 Marconi 的横跨大西洋信号必定是从这样的一层反射到地球的。因为它们强度的大用绕射远远不能解释。W. H. Eccles 在 1912 年对‘大气干扰’或‘天电’的研究更进一步详论了这一观念。哈佛大学的 G. W. Pierce 教授在 1910 年出版的有关无线电报学一书中,也提出了这样一种可能性:如果沿地面传播的直达波与强度相近的天波同相和反相地交替结合,无线电波就可能产生有极大值和极小值的显著干涉图样。不过,却是在旧金山联邦电报公司的 Lee de Forest 和 Leonard F. Fuller 在 1912—1914 年期间首先大致测量了这一“无线电反射层”的高度。

De Forest 1912 年 11 月做了首批决定性的观察。他用新近装设在旧金山和檀香山之间的联邦电报通讯线路鲍尔逊电弧发射机的连续波代替了火花发射(阻尼波列),这时, de Forest 碰到了仅能用相干波列的干涉加以解释的现象。当一个信号的频率减弱时,附近另一个频率的信号就增强(用电键稍微改变发射频率而得到点划信号),在几分钟时间

* 美国华盛顿卡内基研究院地磁学部。

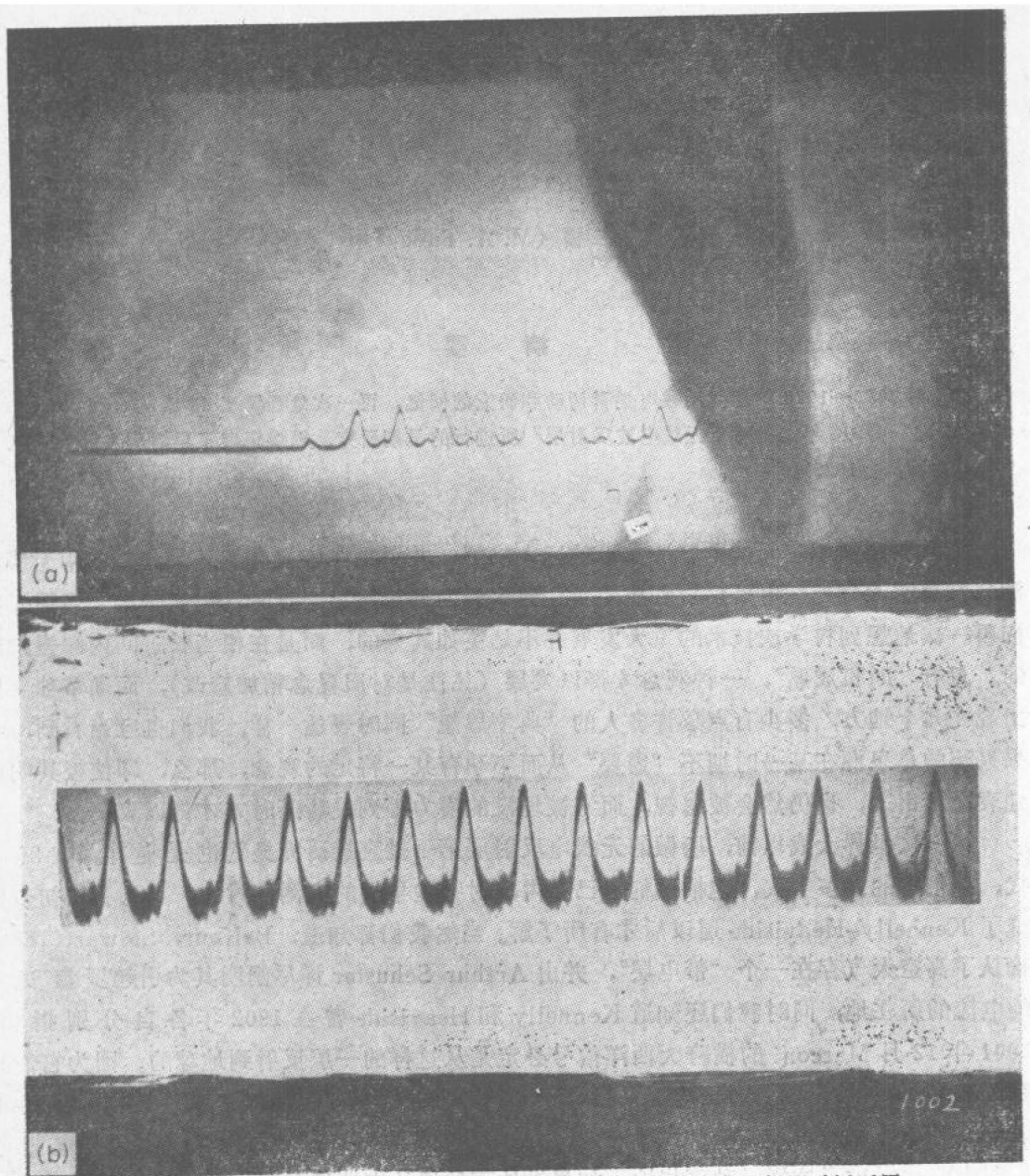


图1 早期(1925)地波和天波的无线电脉冲记录；两种波由于行程时间不同而在接收处分开。脉冲重复率为500/秒

内，情况又颠倒过来，这显然不可能是与频率有关的吸收所造成的，他在新的无线电工程学会的新会刊第一期上发表了观察结果 (Eccles, 1912; de Forest, 1913)。在将选择性吸收对照干涉作了讨论以后，de Forest 指出：“如果反射层位于两站的中途，反射层的高度为 62 英里…”。在同一篇论文里，他还提出最好不采用象在他的实验里使用几个不同的频率而是在一小段范围内以连续的方式慢慢改变发射波长，使海路和空路之间的程差为几个整数数字。测出一个极大值经由一个极小值连续地移动到下一个极大值所需的频率变化，并且知道了以波长度量出的从发射机到接收机的海洋距离，他就能计算出空路的长度，从而得出无线电反射区域（或层）的（有效）高度。他的在联邦电报公司的同事 L. F.

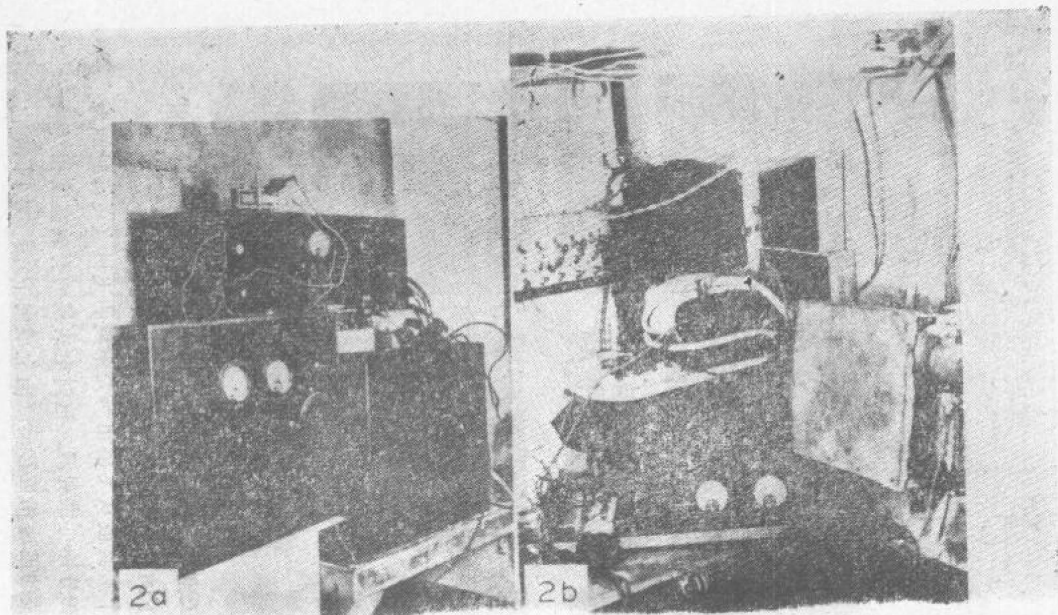


图2 1925年的接收机。也示出了“面包台”功率放大器以及在它上面的高衰减可动线圈式示波器（用白色水冷软管包裹）。这一组合用一个8000赫的无衰减示波器频率对接收到的射频脉冲给出线性响应(945—946)

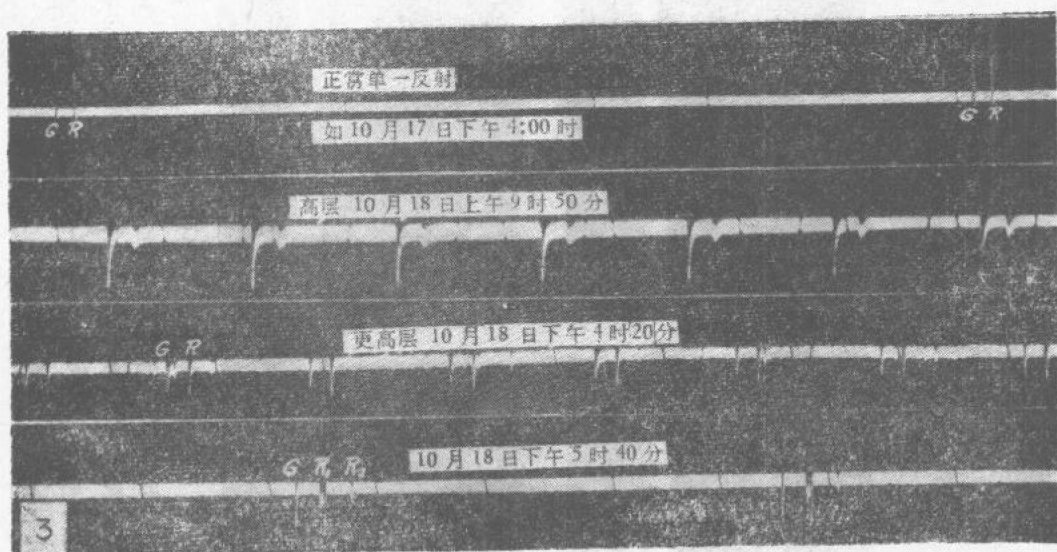


图3 发射机由多谐振电路激励时所产生的宽间隔脉冲，脉冲持续时间约为 1.5×10^{-4} 秒。底部记录表示在地面脉冲G之后的2—3个天空回波(1485)

Fuller 也于1913—1914年期间就檀香山-旧金山通讯网做了大量的研究。Fuller (1915) 向美国电气工程师学会纽约分会报告了他的研究，并将他的报告发表在美国电气工程师学会学报上。象 de Forest 一样，他也观察到波长在3000米到12000米范围内大约变化5%时（用电板电键产生频移），就有颇为明显的极大值和极小值出现。他把这种结果解释为空间波和地面波相互作用形成的干涉条纹图样。他在旧金山附近相距9英里的两站同时做的观察也明显地表现了“不超过18英里宽的”干涉带的存在。不过，当时所能得到的连续

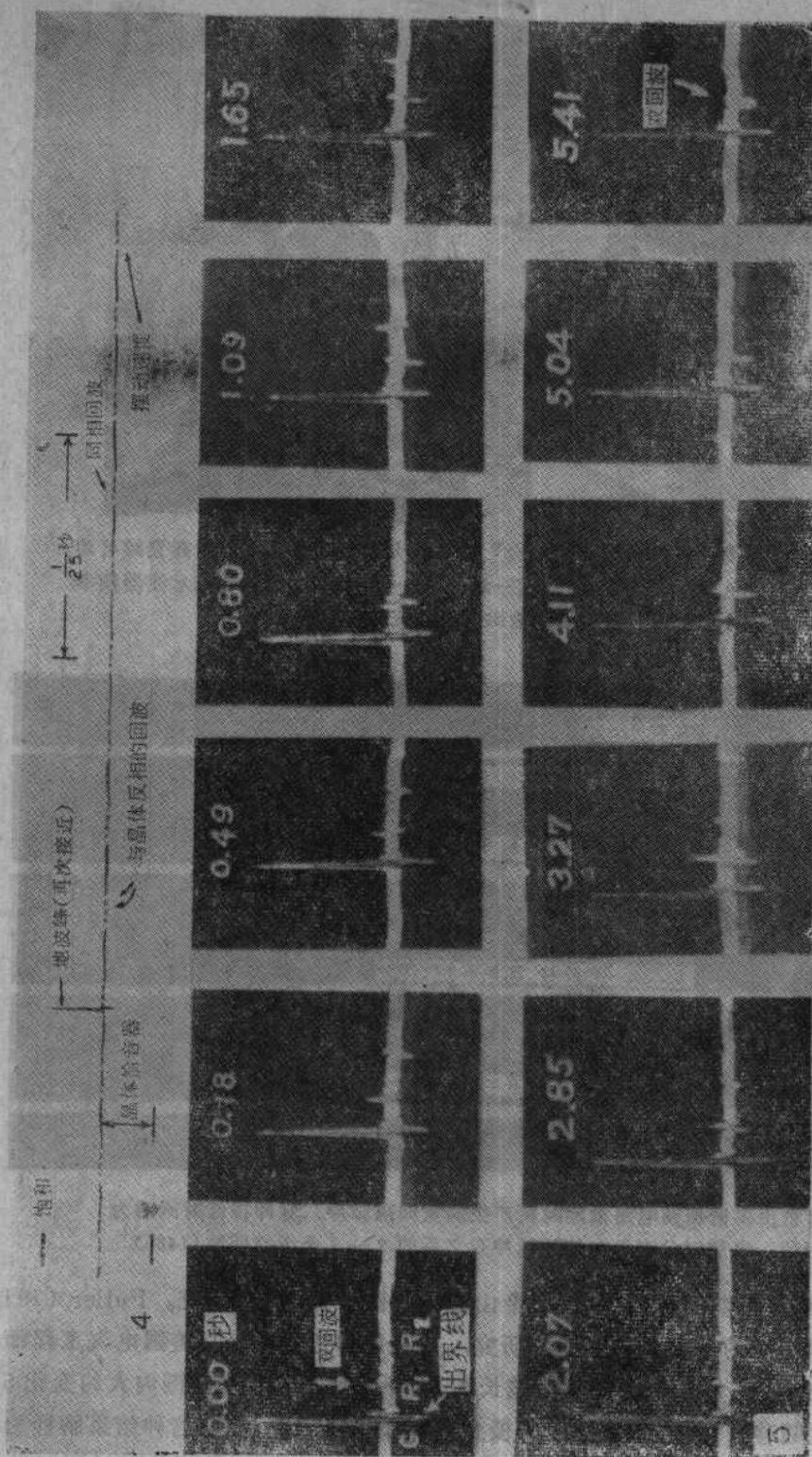


图4 1928年4月回波干涉记录。发射机晶体振荡器的弱连续信号给出一半刻度的偏移，而天空波（由同一晶体控制）与这个连续信号同相和反相地交替组合，当相对相位缓慢改变时，给出向上或向下的波峰(1558)

图5 同样的回波干涉记录。注意回波在不到2秒时间里的变化，甚至在静止期也如此。这个实验被从飞出相当大距离的飞机（飞行时间为好几分钟）上返回的波所扰乱，使得我们大声的悲叹，因为每天只有在下半的前段时间有约20分钟可供观测，这时电离层的有效高度相对地保持不变。在早晨和傍晚的几个小时里，电离层有效高度（路程长度）迅速地改变，引起回波的迅速相位移动（向上或向下）。多次回波也是引起混淆的一个原因(1559)

波只是在波长长于 3000 米（频率低于 100 千赫）的范围内，因此，用频变方法对高空大气进行真正的大力研究便不得不等候十年以后的 Appleton 和 Barnett。

无线电业余爱好者在 1920—1923 年期间所开拓的洲际低功率短波通讯（5 瓦），重新唤起了人们探索无线电反射层性质的兴趣，其热烈程度一如 1901 年 Marconi 的横跨大西洋传播实验的情况。1922 年，那时我还是明尼苏达大学学生，W. F. G. Swann 教授在一次学术讨论会上就曾推测，用一个接收机使它当邻近的发射机被驱动时不灵敏，而当发射的点或短脉冲结束时很快恢复高增益，有可能观察到大约垂直入射的无线电“回波”。他于 1923 年按照这种想法做了一些实验，但都由于发射时断时续在接收机中产生巨大的‘嗡嗡声’而终告失败。当今一代的实验人员简直无法想像阴极射线示波器诞生的若干年之前，观察快速现象，甚至观察 1 毫秒范围内的现象时所面临的困难。1923 年，我和 Breit 博士在明尼苏达共事很短一段时间，当时唯一能观察和记录这一时间范围的仪器便是爱因多芬线检流计（事实上，早在 10 年以前，这种“医疗”仪器就已和许多鲍尔逊电弧设备一并被人们常用了）。

在 1923—1924 年间研究高空大气性质的另一些实验手段发展起来了，但没有利用直接的当地实验探测。由于使用了大批无线电通讯成功的简单数据，E. O. Hulburt 和 A. H. Taylor 能在华盛顿特区的阿纳科斯塔斯新建的美国海军研究实验室里着手概略地描述世界范围无线电反射层的特性，它的日变化、季节变化、纬度效应和一般电磁特性，其中包括用所用的波长和所达到的通信距离表示的各个近似高度上每立方厘米自由电子密度的估计值。

那时，在通信实践中最引人注意的新事物就是明确观察到的“跳距”。跳距是一个半径，通常可达几百英里或更远些，在这个半径以内接收不到（短波）信号（除了非常靠近发射机的地点），但一超出这一半径即能观察到很宽的高信号强度区域。由 J. L. Reinartz 业余无线电杂志 QST 组织业余无线电爱好者所作的系统研究，增补了 Hulburt 和 Taylor 的广泛的海军通讯数据。Hulburt 和 Taylor 以接收机附近地面波的迅速衰减解释了这些数据，把所有远距离接收都解释为频率愈高，愈在更高层“反射”（实际上是折射），甚至经由两跳反射，即再一次在地面反射及第二次空间反射，使两次跳距远隔发射机几千英里（Hulburt 和 Taylor, 1926）。跳距随频率和昼夜时间的变化使 Hulburt 和 Taylor 得以推导有关高空大气最大电子密度（最高频率不会折射回到地球）和电子密度随昼夜时间和纬度的变化的大量细节，并使人们能够确定电波可以返回的有效高度的某些限值，并由此得出电子密度按高度分布的某些限值。每当收发两地处于黄昏和黎明的时候便会出现一些特殊效应。对这些效应的综合研究是人们对无线电反射层重新产生的兴趣最初表现；这些综合研究扎实地进行并且部分地完成以后，Appleton 和 Barnett 才进行他们 1924—1925 年的观测工作（Appleton 和 Barnett, 1925 a, b）。他们首先观察了下行波的到达角，这使他们重新发明了 de Forest 在 1913 年描述过的频率变化方法。另外值得一提的是：只有当波经由一条地面路径和一条空间路径到达时才能正确地解释用频率变化技术所得的观测结果。用 Dr. Gregory Breit 和本文作者所描述的技术，即脉冲无线电技术（Tuve 和 Breit, 1925; Breit 和 Tuve, 1926）立刻表明只有部分时间存在这种简单情况；电波在很多情况下往往各以不同的延迟时间沿几条路径抵达接收机。

于是，到1924—1925年之间的那个冬天，由于无线电广播的兴起并且受到低功率短波通讯惊人的远程传播的刺激，多多少少广泛地引起了人们对高空大气电状态作定量描述的兴趣。所以在这个时期，独立地着手跳距、频率变化和脉冲回波这三个不同的办法就不是突然的了。这时“时机已经成熟”，而不象在1902年或1912—1914年的情况。

几年以后，出现的一种情况又是一个有趣的例子，说明一个思想如果不是明显地被当时所需，或者与当时风行的兴趣没有特别的关系就得不到什么响应。那时我们已在华盛顿特区北部用我们的接收装置做了极短暂的射频脉冲近乎垂直反射的卡内基实验，当时还用了大约7英里外在华盛顿的阿纳科斯提亚（Anacostia）地区美国海军研究实验室的一台10千瓦短波海军发射机。Taylor和Hulburt是该研究实验室的重要研究人员。这次我们放弃了早期的500周的发射，同我们的同事Odd Dahl（现在挪威卑尔根的Mikkelsen研究所）一道制作了一个多谐振荡器自动开关电路使海军发射机发射出满功率宽间隔（80/秒）的极短暂脉冲（ 1.5×10^{-4} 秒）（Tuve和Dahl, 1928）。这些短暂的波峰使我们能分辨出经由两条以上路径同时到达的波的许多复杂情况，这在早期实验中即已明显地表现了出来。我们还观察到，在白天某些时刻出现多达四个或五个不同时延的分立的回波，并且观察到单个空间返回波的情况似乎还不及观察到多次返回波那么典型。这就启示我们同我们的同事L. R. Hafstad（后为通用汽车公司研究副主席）对那些分立回波的电相位关系进行研究，看看它们之所以分裂是否部分地由于干涉效应所致（Hafstad和Tuve, 1929）。为此，我们将接收机移到海军研究实验室，安装在发射机附近的一幢房屋里。发射机由一保持连续运转的晶体振荡器频率控制，脉冲在较高功率放大电路中产生。同时，我们还使晶体泄漏少量连续辐射到接收机上，并且进行调整使接收机输出端示波器上产生约为满刻度一半的稳定偏转。这就成了下行空间波列的一个稳定的相位基准；同相时，使亮点向示波器满刻度方向偏移，反相时，使亮点向示波器零位偏移。这装置也就是一个干涉计，对于有效路程长度仅只20米（ $\frac{1}{2}\lambda$ ）的改变，就有很高的灵敏度。我们称此法为回波干涉法。这是一项立竿见影的定性成就，但也提出了一个使人非常头痛的观测问题。分立的回波在上午的中间阶段时而同相时而反相变化很快，然后在下午一点钟左右有10秒或20秒相对稳定的同相，可是到了下午的中间阶段相位变化再一次的快起来。

令人头痛的问题是由于海军研究实验室太靠近博林机场（Bolling Field），此地是一业务繁忙的飞机场。每当飞机在该机场起飞或着陆时，我们的观测便在一个颇长的时间里受到了明显的强干扰。如果飞机充分地接近，以至我们能听到它的声音时，稳定偏转就杂乱不定地大受干扰，但是，在听到飞机来到以前很久，我们早就可以注意到它对回波相位和示波器偏转的不太明显的影响，而在飞机离去以后，这种影响还持续一段长的时间。“基线”（半刻度偏转）也受到一些干扰，尤其是在初始脉冲附近的地方。我们接收机的恢复时间是 10^{-4} 秒，而初始脉冲往往显得衰减欠高，并且在回到基线时有较平时“冲出过度”的现象。这对我们决定是否开动示波器照像机来记录回波变化，造成了紧张情绪（我们的胶片供应有限），要么我们照像，以后把变化的图样归因于高空路径的变化，要么决定不对正被见到的变化照相，因为在几分钟内可能就有飞机进入博林机场。请记住，这是在1929年，空中往来的主要是中等大小的军用飞机。通常，我们的这种烦恼事喜欢在午餐和其它时候议论一番。在我们1929年底终止海军研究实验室的回波干涉实验的一年半以后，那