

物理译丛

水声学

第二集

中国物理学会编

科学出版社

物理译丛

水声学

第二集

中国科学院电子学研究所編譯 原題中國
物理學會編

科學出版社

1962

內 容 簡 介

本集是水声传播专集。文集中包括国外(苏、美)的有关研究論文15篇。这些論文基本上反映了近年来关于分层介质中声传播問題的研究的各个方面,諸如波导和反波导传播理論、楔形区的声場研究、模型实验研究、海底底质的研究及自动声綫仪的设计等等。

鉴于現代水声学明显地表现出日益向低頻方面发展的趋势,文集的后一部分专门收集了有关低頻传播的論文七篇(第九篇到第十五篇)。通过这几篇論文,讀者对于分层介质中声传播及低頻传播的研究工作在近年来的发展,能够得到一定的了解。

本书可供水声学方面的科学工作者及大专师生参閱。

物 理 譯 丛

水 声 学

第 二 集

中国科学院电子学研究所編譯

*

科 学 出 版 社 出 版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1962 年 6 月 第 一 版

书号: 2519 字数: 304,000

1962 年 6 月 第一次印刷

开本: 850 × 1168 1/32

(京) 0001 - 3,050

印张: 11 1/8 插頁: 9

定价: 2.20 元

目 录

声在非均匀介质中的传播(综述).....	1
声波与次声波在天然波导中的远距离传播.....	13
声在一类分层不均匀介质中的波导传播.....	25
在声速分布能形成影区条件下的半空间的声传播理论.....	47
楔形区域中点源声场的渐近表示.....	83
具有铅直声速梯度的介质中的声影区的研究.....	92
几种声线仪的基本原理.....	99
高声频下水下底质声学特性的研究.....	109
浅水中低频声传播的研究.....	121
水层中第一号简正波的声场.....	134
三层介质中的简正波.....	151
连续分层介质中远距离声传播的数值解及其在深海中的应用	164
声的超远传播.....	177
爆炸声在浅海中的传播理论.....	211
爆炸声在浅海中的传播.....	340

声在非均匀介质中的传播^{*†}

(綜 述)

布列霍夫斯基赫 (Л. М. Бреховских)

这篇报告的题目所指的问题是非常广泛的。它包括声在固体、液体及气体中的传播。形成非均匀性的原因可以是异质成分、温度、速度、浓度梯度、物质的颗粒状结构等。声在大气及海洋中传至几百或几千公里的“超远传播”问题，在大气中由具有湍流性质的非均匀性所造成的声散射问题，声波在声学测量用的特殊消声室壁复盖物中的吸收问题，超声在多晶体以及乳剂中的传播问题等等，所有这些问题都是属于声在非均匀介质中传播的问题。这里还可以包括声波在不平表面上的散射问题以及在各点阻抗不同的表面上的散射问题。

但是，在这篇简短的报告中不可能把如此广泛的领域全部包括进去。这里既有大量个别的物理现象，也有大量用以描述这些现象的理论概念。因此，我们的研究限于两个范围：声波在所谓分层介质中的传播以及声波在具有统计性质的非均匀介质中的传播。

分层介质的特点是其性质（如密度、声速度）只依赖于一个坐标，并在垂直于此坐标的平面上保持恒定。以下我们将研究简单的平面分层介质，这时采用直角坐标是比较方便的。

近十年来，关于分层介质中的传播问题已有了大量的工作。尽管有很大的数学上的困难，但是现象的一般图象目前已经基本

* 本文原载于 *Акустический журнал*, 2, № 3, 235 (1956).

† 这篇综述性报告曾在 1956 年 6 月 21 日于美国麻省剑桥举行的第二次国际声学会议上宣读。

上得到闡明。

大气及海洋在作某些理想化之后是典型的分层介质。我們所提出的問題对于特殊消声室的吸声复盖物的計算工作也具有重要意义。此外,在研究固体地壳中弹性波的传播时,也必然要碰到介质参数随深度連續变化以及跃变的情况。

关于在参数連續变化的介质中的传播的問題,只对于几种变化規律得到了精确解。近年来所发表的工作多半是討論参数任意变化介质的問題的近似分析方法或数值分析方法的。在这一方面得到了很大成就。直接从事反射系数方程的求解(而不去解有势声場的波动方程)往往更合适一些,因为最終我們感兴趣的只是反射系数。

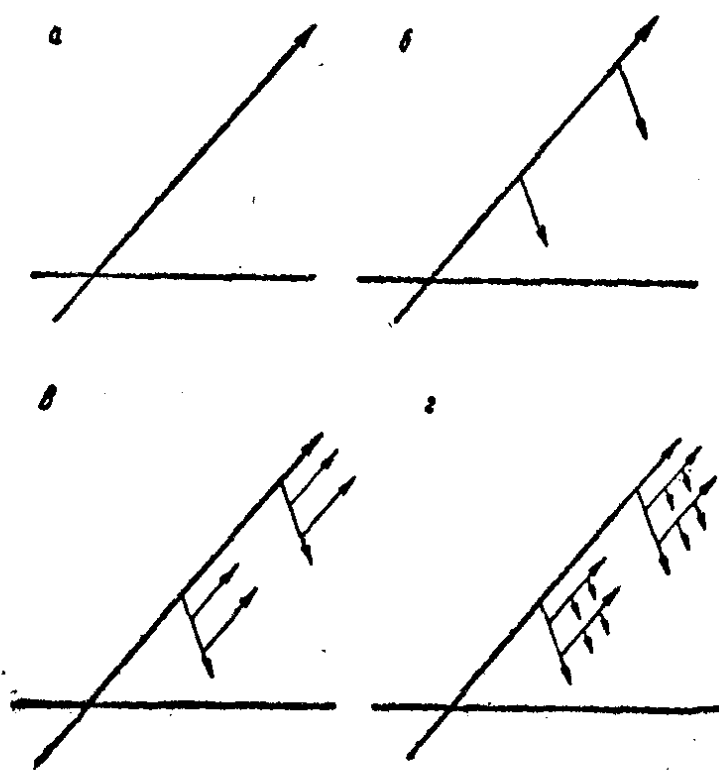


图. 1

反射系数方程是黎卡迪型方程。解此方程的最通用的近似方法之一,很好地用于介质特性在空間中变化較慢的情形。此时,取在介质中无反射地传播着的波作为零級近似(图 1a)。在一級近似中考虑到这个波在每一点給出一元反射波(图 1b),此时反射系数为零。在二級近似中考虑到这些反射波由于介质的不均匀性又产

生許多与初始入射波同方向的波(图 1b)。在三級近似中后者又产生了加入反射波中的新波(图 1c),依此类推。

还有另一种近似方法,它很适用于介质参数变化任意快、但所要研究的反射层很薄的情况。这个方法特别常用在这样的情况,即在需要确定当把两种介质的明銳的分界面换成稍为弥漫的过渡层时反射系数改变了多少的时候。

声传播理論表明,在非均匀介质中一般不能够把总的声場分成入射波与反射波。由图 1 很易了解这一点。这种分法不是唯一的。最初分析非均匀介质中全反射規律的工作者(1915 年)之一的甘斯(Gans)^[1],在这个問題上曾犯了重大錯誤。例如,他提出在波的反轉点射綫的行程問題。图 2 中实綫所示的射綫通常对应于在非均匀介

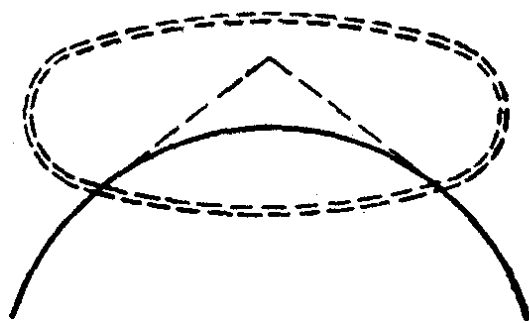


图 2

质中受到折射及全反射的波。为寻求在波的反轉区域的总場的完全正确的表式,甘斯武断地把总的場分成入射与反射波,分別将其与射綫对照,并发现这些射綫在波的全反射点构成一角度(图 2 中的虚綫)。实际上这种論断是沒有任何意义的。可以証明,一般地說,图 2 中由双虚綫所包围的区域内是不能建立射綫的,因为在此区域射綫理論是不适用的。

在談到自非均匀介质的反射时,應該提到柯芬克(Kofink)^[2]所提出的有趣的意見。他指出,对于給定頻率的波,永远可以找到一個适当的非均匀层,它所具有的参数沿厚度的变化,使得波能全部透过这个层而沒有任何反射。他并給出一个极其簡單的选择这种层的方法。

到現在为止,我們研究了介质参数連續变化的情况。但是,介质参数只具有跃变的情况也应当属于非均匀介质。在这类介质中的波传播問題具有很大的实际意义。正如在伯瑞內克(Beranek)及其合作者們的工作^[3]中所証明的,采取由許多层的組合結構,

可以达到寬頻帶的有效隔声。隔声程度决定于反射及透射系数。

为了合适地挑配声学透鏡的增透层，也必需会計算层系統的反射系数。相应的理論也得到发展，特别是塔塔可夫斯基(Б. Д. Тартаковский)^[4,5]的增透层系統公式，虽然計算公式复杂，但是并不难計算。这个系統保證了例如鉛-空气界面的相当寬頻帶的全透射性。利多夫(С. М. Рытов)^[6]研究了一个极端情况，即单独的层的厚度比波长小很多的情况。証明了由大量这种层的組合构成的介質可以看作是均匀的、但具有各向异性的介質。証明了它等价于六角对称晶体，并由五个弹性常数来描述。

現在我們来討論无方向性点源所輻射的波的传播情况。这个问题在数学上之所以有較大的困难，是由于介質及輻射波在对称性上有所不同。介質是平面分层的，而源輻射出球面波。然而，这时我們已能用最合适的方法来研究问题了。必須将球面波分解成为平面波，而对平面波的行为我們已在前面研究过了的。这种方法無論对平滑变化的介質或是有分界面存在的介質都是十分有成效的。我們只想討論在假設沿鉛直方向 z 介質的不均匀性局限于某个有限区域、而当 $z \rightarrow \pm\infty$ 时介質是均匀的情况下所获得的某些基本結果。

在这种情况下，在分层介質中传播的声場可以分为三部分。

第一部分看来也是最重要的一部分，是有限数目的所謂簡正波的組合。每个簡正波具有自己的沿层传播的相速以及其独有的沿 z 軸的振幅分布。振幅对水平距离 r 的依賴关系为 $\sim \frac{1}{\sqrt{r}} e^{-\beta_n r}$ ，其中因子 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ 对应于波的柱面发散，而 $e^{-\beta_n r}$ 是与簡正波号数有关的衰減因子。

第二部分可以叫作“剩余簡正波”。虽然其数目无限多，但这些波的振幅随着离开源的距离的增加而很快地衰減。它們只有在輻射器的近域才是重要的。

第三部分是由两个所謂“旁側波”組成的。当介質中沒有声能

吸收时，旁侧波的振幅在离开声源足够远处按 $\frac{1}{r^2}$ 规律衰减。

在原理上很容易求出每一号简正波的传播速度以及衰减因子，然而在实际计算中可能会碰到很大的困难。

假设在介质中没有切变阻抗，此时所有简正波（包括“剩余简正波”）的特征可以由方程

$$V_1 V_2 = 1 \quad (1)$$

求得。这里 V_1 及 V_2 分别是平面波自 $z < z_1$ 及 $z > z_1$ 的非均匀半空间的反射系数，其中 $z = z_1$ 是某一任意选定的水平面。 V_1 与 V_2 是入射角 θ 的函数。方程(1)的根有无限多个： $\theta_1, \theta_2, \dots$ ，其中的每一个各属于一个简正波。在美国，托尔斯泰(I. Tolstoy)^[7]曾经很熟练地应用了方程(1)。

应着重指出，为了确定简正波系的特征可以选取任意的 z_1 。除去一个特殊情况，即介质的各部分彼此以绝对不透射界面分隔开的时候。此时，我们将有两个或更多个彼此独立的简正波系，必须独立地去寻求它们当中每一系简正波的特征。

将(1)推广到固体层的情形并不困难。此时除了纵波与横波平面波反射系数之外，将引进由一种波变成另一种波的转变系数。

对于给定的介质，频率愈高，属于上面我们所提的第一类的简正波的数目就愈多。当提高频率时，在某一确定的频率下我们将碰到新的简正波“产生”的有趣的现象。在此频率下旁侧波的行为也有一些有趣的特点。

实际上，在分层非均匀介质中波传播的所有情况显然可以分为两类，我将它们称为“波导”传播与“反波导”传播。在波导传播时简正波随距离的衰减是非常慢的。在这种情况下声音可能传到很远的距离去。这一点正好说明强的爆炸声有可能在上千公里或更远的距离上被记录到。

在大洋中还有更惊人的声波的波导传播现象。几公斤三硝基甲苯炸药所产生爆炸声波可以在 5000 公里以外的地方被记录到。

声脉冲越过这样的一段距离需一个多小时。象同一篇文章的作者所提到的，交响乐队在音乐会开始时所产生的声音可以在大厅中一直保持到音乐会的終了，也是十分令人惊异的现象。

虽然借助于简单的射线方法远不能对所有的波导传播现象进行十分正确的描述，但是射线概念还是可以很好地定性地解释现象。

设声速与铅直坐标 z 的关系如图 3a 所示。在 $z = z_0$ 处声速有极小值。如果在这个深度上放置声源辐射器 O ，则有一部分自声源以确定的不太大的出射角射出的射线在远距离处能够一再重新返回这个深度上来。声能在远距离处将基本上集中在靠近声速极小值这个深度附近的某一层内。对声在海洋中传播来说这一层叫作水下声道。它之所以产生，是由于温度梯度与静压力梯度的联合效应。在大气中由于在 30—50 公里高度上温度的递增，也形成相似的波导。

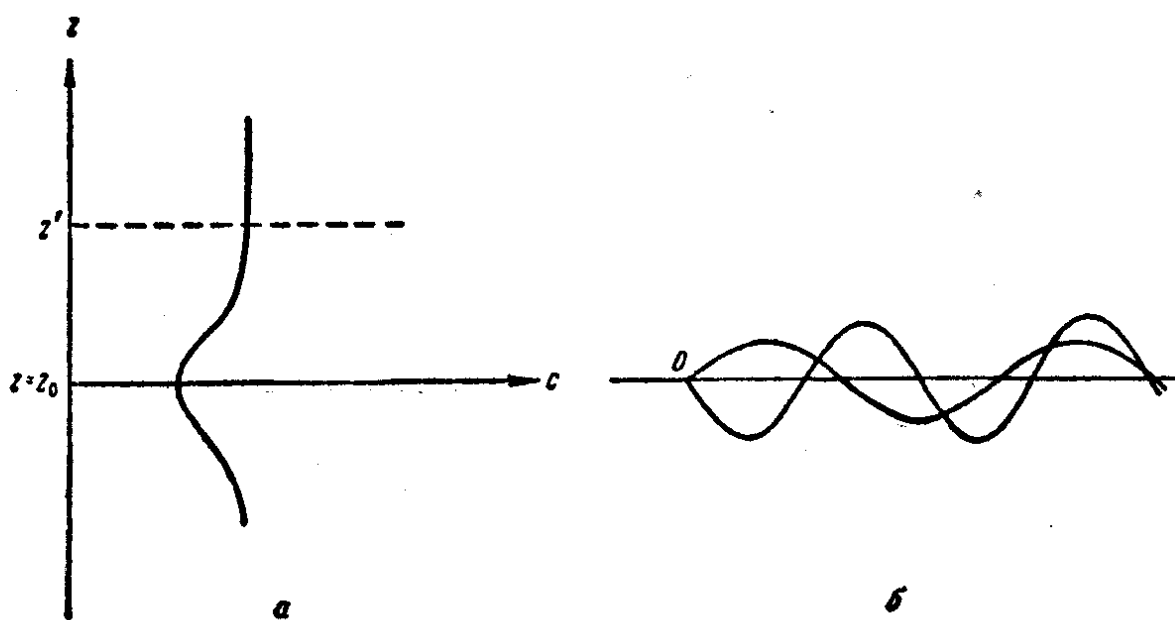


图 3

不仅把辐射器放置于声速为极小的深度上或其附近会产生波导传播，而且在把辐射器放置到波导外面，例如放于 $z = z'$ (图 3a) 时，也会有波导传播。在此情况下声能量通过衍射方式进入波导，此后就在波导中以简正方式传播。射线概念对解释这种现象当然是不适用的。

当声波在波导中传播时能够发生非常有趣的声波聚焦现象。波的聚焦现象通常是与特殊的透镜系统以及反射镜的作用相联系的，但是当波在非均匀介质中传播时，聚焦现象却是经常出现的。

波导是具有某一临界频率的。当频率低于临界频率时，则波不具波导性质，波导对这些低频率的波来说是太窄了。自然，射线方法对于确定临界频率也是不适用的。

完整的波导传播的波动理论是很复杂的。但是不久前噶则良 (Ю. Л. Газарян)^[8] 所研究过的一类波导传播情况是值得提出的，它具有很大的特色，并且得到了非常简单的解。他选用了相应于所谓“爱普斯坦 (Epstein) 层”来作为“波导形式” (即声速对于坐标 z 的函数关系)。

还应该提到，B. A. 福克 (Фок)^[9] 曾指出在非均匀介质中波的波导传播与量子力学中的波包的传播具有深刻的相似性。他把这两个问题的数学公式化成彼此完全相对应的形式。

在反波导传播的情况下，简正波很快的衰减，并且在足够远的距离处声强可能非常弱。图 4 所表示的是反波导传播的典型例子。在 $z = 0$ 平面置一绝对反射界面。在 $z > 0$ 的半空间声速随 z 线性减小，此时射线行程如图 4b 所示。没有一条射线自辐射

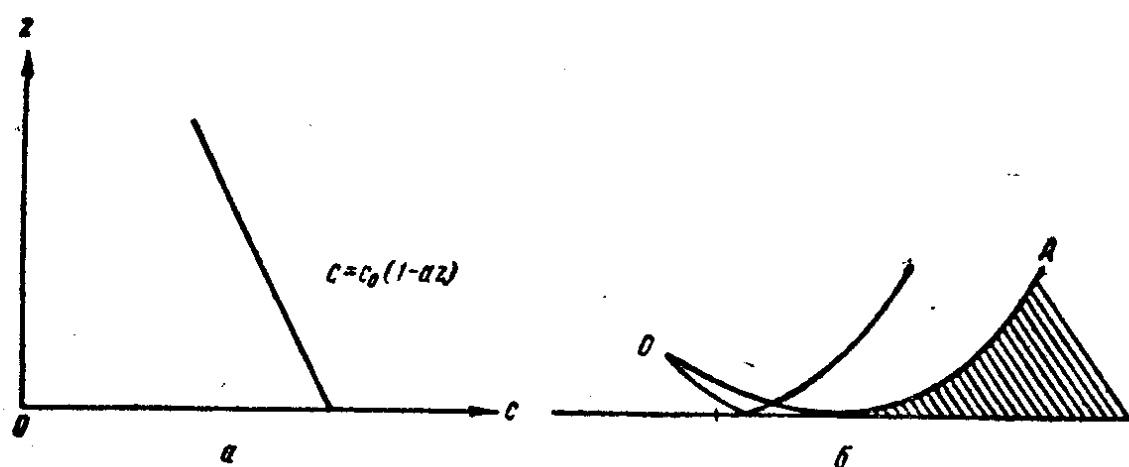


图 4

器 O 射出而进入斜线区域，这个区域即几何影区。声能只能由于衍射而透入此区。在影区随着离开临界射线 OA ，声压非常迅速地衰减。在大气中当存在有负温度梯度时会碰到这种情况。当

存在沿高度的风速梯度时也会产生同样的效果。此种情况的完整理論曾被匹克利斯^[10]詳細研究过。在本次會議上普列莫-布劳恩 (Д. Придмор-Браун) 作了由风速梯度形成的影区的場的研究報告。在海洋中当強烈日光照射使上层水温上升时, 也会观察到这种現象。

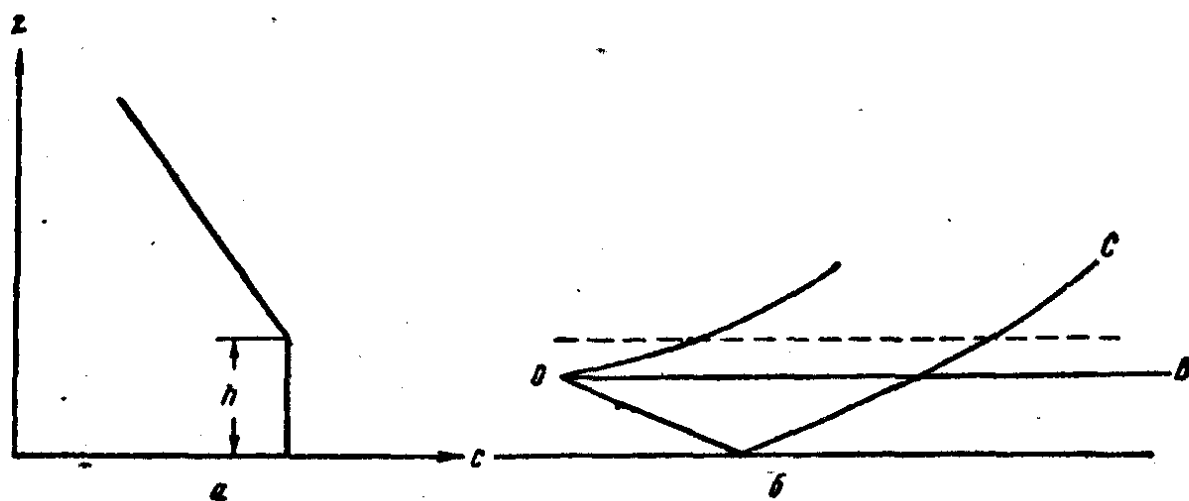


图 5

图 5 所示的另一种反波导传播情形具有比較复杂的特性。在負声速梯度的半空間下有一层厚为 h 的均匀层。此时不出現几何影区。特別是 OB 类与 OC 类声綫可以穿射到离开声源任意远的距离。但是这种“有利”的传播条件只是表觀的假象。事实上, 只是在 h^2/λ 数量級的距离之内能够应用射綫概念。对于这种情况, 我們有精确的波动解。波动理論表明, 对于均匀层中的传播(例如沿 OB 射綫), 我們得到由于非均匀半空間吸取声能量而引起的具有特殊衰減的波。

鉴于这个例子, 我們来討論一下声能的横向扩散的概念是适当的。声能横向扩散的概念在近几年来得到了愈来愈多的应用。在图 6 中实綫表示射綫, 而虛綫表示波陣面。在非均匀半空間 (AA 平面以上) 由于声綫的弯曲, 声束管大大地扩展了, 这就引起了声能量密度的減小。而在均匀空間的 AA 面以下附近之处能量密度很大。此时就发生了声能由高密度处向低密度处的“扩散”。扩散沿波陣面穿向图 6 中箭头所示的方向。上述情形是繼几何声

学之后向正确的波动理论作更进一步的近似，可以赋予严格的数学形式。馬留日涅茨 (Г. Д. Малюжинец) 特别发展了这些概念。

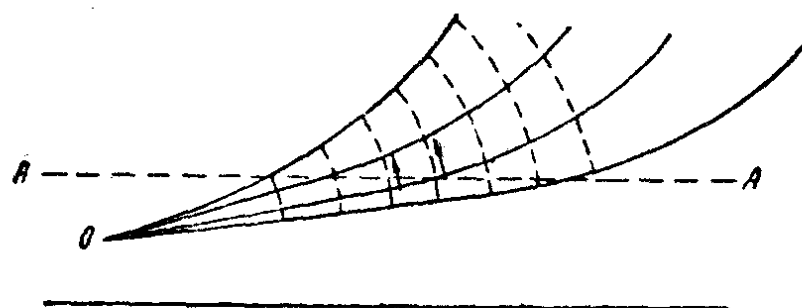


图 6

在谈到分层介质中的声波传播的时候，最好提一下，在一系列的情况下，理论家们找到一些有关“人工”非均匀介质的方便的概念。例如，在研究弯曲墙壁附近的波传播时 (图 7a)，可把问题归结为在平面界面但具有声速随着远离界面而按线性关系增长的半空间的传播问题 (图 7b)。这种情况的射线图示于图 7c。图 7a 所示情况对应于瑞利当时阐明的伦敦大礼拜堂的“细语廊”的著名声学

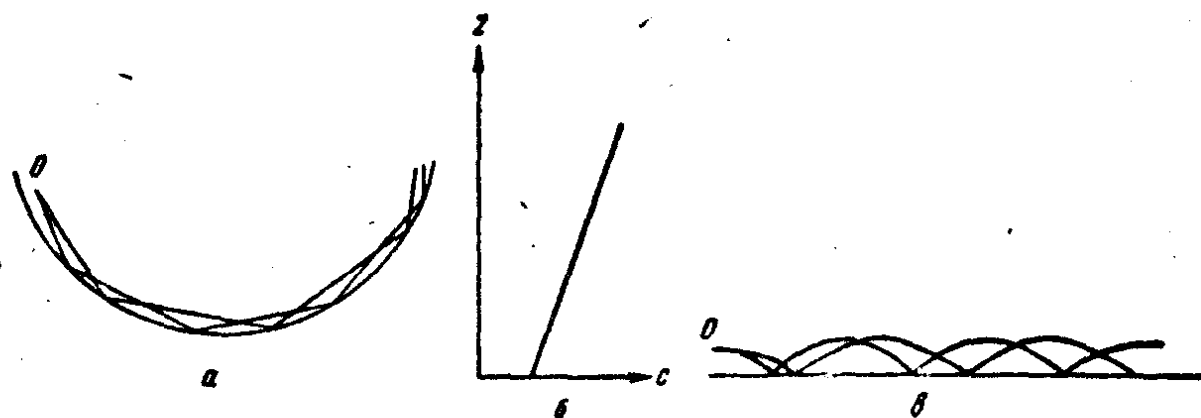


图 7

现象。靠近北京天坛“迴音壁”能更明显地观察到同样的现象。图 7b 对应于声在非均匀介质的波导传播的图景。因此，这两种现象彼此间有着深刻的相似性。上述概念在把无线电波沿球形地面上的传播问题归结为在平面地上传播的问题时得到了广泛的应用。

现在我们来研究具有统计非均匀性介质中的声传播。在大气

中这种非均匀性是由湍流引起的。在很久以前它就以星光的閃爍現象为人所知了。这类問題的研究对于声在海洋中传播問題也具有十分重要的意义,同样,在其他一些問題(例如声在多晶体中的传播)中也很重要。

設在介质中的声速作为点的函数围绕某一平均值 c_0 作随机的振动。以 $\Delta c = \Delta c(x, y, z)$ 来表示它对 c_0 的偏离。 Δc 随时间的改变可以忽略,因为这种改变所经历的时间间隔在数量級上远远超过声波的周期。就理論而言(这在以下将談到)不需要甚至不宜于給出 Δc 函数本身。但是却必需知道所謂相关函数

$$B(M_1, M_2) = \overline{\Delta c(M_1) \cdot \Delta c(M_2)},$$

这里 M_1 及 M_2 为介质中任意两点。一般只研究这种情况,即相关函数只依赖于介质中两点之间的距离 r 。令 $r = 0$, 我們得到一个重要的量 $\overline{(\Delta c)^2}$, 即声速起伏的均方值。一般限于相对起伏很小的情况, 即 $\left| \frac{\Delta c}{c_0} \right| \ll 1$ 。

当介质的性质这样被給定之后, 理論所要解决的問題是通过它們来表达声場特性, 那怕是对于最简单类型的声源的情形也好。目前已經解决了一系列重要問題, 特别是, 确定声压与位相的起伏級, 以及在不同点这些起伏的相关性。对指向性声輻射器計算了声波自亮区向其余空間的散射。

所謂“波动参数” D 在理論中起重要作用:

$$D = \frac{\lambda L}{2l^2},$$

其中 λ 是声波长, L 是在非均匀介质中波穿过的距离, l 是介质非均匀性的平均尺度(量 Δc 的“相关半径”)。当 $D \ll 1$ 时, 我們可以使用射綫声学。在远距离时則必需考虑由于介质非均匀性而引起的衍射。問題的复杂性还在于, 通常的微扰方法(即設声势 $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$, 并认为 $\varphi_1 \ll \varphi_0$) 在我們所研究的情况下仅仅有非常狹小的应用范围。事实上, 只要波的位相微扰达到与 π 相比的量, 則場的微扰就不是小的了。

阿布霍夫 (A. M. Обухов)^[11] 从这种困难中找到了出路, 在这个問題上他成功地使用了当时利多夫^[12] 在超声波中光的衍射理論中所提出来的微扰方法。对于这种方法, 只要求在波长 λ 之内位相扰动是小的。阿布霍夫及其他学者使用这种方法計算了一系列有趣的現象, 証明了相位对于非微扰值的均方偏差在远距离时与 L 成正比地增长, 而声強的偏差正比于 L^3 。还可以計算波的振幅与位相之間的相关。在小距离内它是常数, 而在大距离处差不多按 $1/L$ 減小。同时計算了位于垂直于传播方向的直綫上两点之間的声場起伏相关, 很凑巧, 这种相关刚好延展到与量 Δc 差不多同样的相关距离上。

所提到的結果一部分是属于切尔諾夫 (Л. А. Чернов)^[13] 的。近来他也从事在統計性非均匀介質中传播的波的聚焦过程的有趣的計算, 并使以前的一些結果大大明确化。克拉西里尼可夫 (В. А. Красильников) 在本次會議的一个小会上作了声波在随机性非均匀介質中的传播問題的報告, 在这个領域內的許多有趣的結果也是他得到的。

我們研究了非均匀介質中声传播問題的兩类重要情形——在有規分层非均匀介質中的传播以及随机性非均匀介質中的传播。对于这两类問題, 理論远远未达到完善的地步。各国的声学家对这些問題表現了极大的兴趣, 在各种杂志上发表的大量的工作就証明了这一点。但是提到日程上来的新的更为困难的問題是在同时具有所提到的两种不均匀特性的介質中的声传播問題。实际的介質, 特别是大气, 正是这样的。关于在声传播中这两种非均匀性的影响的独立可加性的簡朴的概念, 現在看来已經使很多人不能滿意了。

参 考 文 献

- [1] R. Gans, Fortpflanzung des Lichts durch ein inhomogenes Medium. *Ann. der Phys.*, **74**, 709 (1915).
- [2] W. Kofink, Reflexion elektromagnetischer Wellen an einer inhomogenen Schicht. *Ann. der phys.*, **1**, 119—124 (1947).

- [3] L. L. Beranek and G. A. Work, Sound transmission multiple structures containing flexible blankets. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **21**, 419—428 (1949).
- [4] Б. Д. Тартаковский, К теории распространения плоских волн через однородные слои, *ДАН СССР*, **71**, 465—468 (1950).
- [5] Б. Д. Тартаковский, Звуковые переходные слои. *ДАН СССР*, **75**, 29—32 (1950).
- [6] С. М. Рытов, Акустические свойства мелкослоистой среды, *Акуст. журн.* **2**, № 1, 71—83 (1956).
- [7] I. Tolstoy, Dispersion and simple harmonic point sources in wave ducts. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **27**, 897—907 (1955).
- [8] Ю. Л. Газарян, К вопросу о волноводном распространении в неоднородных средах. *Акуст. журн.* **2**, № 2, 133—136 (1956).
- [9] В. А. Фок, Теория распространения радиоволн в неоднородной атмосфере для приподнятого диполя. *Изв. АН СССР*, сер. физ., **14**, 70 (1950).
- [10] C. L. Pekeris, Theory of propagation of sound in a halfspace of variable sound velocity under conditions of formation of a shadow zone. *J. Acoust. Soc. Amer.* **18**, 295—315 (1946).
- [11] А. М. Обухов, О влиянии слабых неоднородностей атмосферы на распространение звука и света. *Изв. АН СССР*, сер. геофизич. **2**, 155—165 (1953).
- [12] С. М. Рытов, Диффракция света на ультразвуковых волнах, *Изв. АН СССР*, сер. физ. **2**, 223 (1937).
- [13] Л. А. Чернов, Корреляция флуктуаций амплитуды и фазы при распространении волн в статистически неоднородной среде. *ДАН СССР*, **98**, № 6, 953—956 (1954).

声波与次声波在天然波导中的远距离传播^{*†}

布列霍夫斯基赫 (Л. Бреховских)

§ 1. 引 言

如所周知,声波与次声波能在海洋中和大气中传播很远距离。在地球表面大气中所进行过的许多不同目的的大规模爆炸表明,炸药重量由数吨至数千吨的爆炸声可在数百至数千公里外记录到(例如见[1,2,3])。同样,大家也都知道,大气中的大规模核爆炸实际上在地球上任何一个地方都能记录到。

海洋中的条件对于声的远距离传播更为有利。比如,水下数公斤三硝基甲苯炸药的爆炸声可在5—6千公里外记录到^[4]。在一次水下核实验爆炸中,曾利用了声在水下远距离传播以及声由岛屿、暗礁等上反射的能力,调查了大面积洋底的地形^[5]。在同一实验中还取得了低频声在海洋中的衰减数据。

声之所以能在海洋与大气中传播很远距离,是因为在这些介质中存在有天然的声波导,即所谓的声道。

天然波导的出现是由于声速对铅直坐标有特殊的依赖关系。有趣的是,声速的相对变化并不大,它们在海洋中不超过15%,在大气中不超过30%。但是它们对声波的远距离传播起着主要的作用。

无论在海洋中或大气中,波导区在铅直方向上是相当宽的。当声源置于波导的“轴”上,即最小声速的水平面附近时,传播条件

* 本文原载于 *Успехи физических наук*, 70, № 2, 351 (1960)。

† 此报告曾于1959年9月在西德的斯图加特城召开的第三次国际声学会会议上宣读过。