

全息原理与生物全息

申 吾

一、前 言

全息术是近年来取得的最重要的科学技术成就之一。它的出现,不仅发展了信息储存、加工的新方法,在干涉计量学、显微放大、三维立体显示等方面有了广泛的应用,同时对其他学科,包括生物学的研究,也有着重大的影响。

“全息图”(Hologram)一词,顾名思义就是包含有全部信息的图象。周围世界的绝大部分信息是通过各种波动传递给人的。例如人们借助了光波所携带的信息观察到三维空间的外部世界;通过机械振动波感知振动源所发出的有关振动的信息;依靠电子波和X射线所传送的信息可以考察微观世界的结构和变动,等等。所有这种种波动过程,以波动方程来表示,都可以用波长、振幅与位相三个量来描述。因此,所谓全息,就是指包括振幅、波长、位相三者所携带的有关波动的全部信息。

波动信息的接收器大体可以分成两大类,一种是相干接收器,另一种是非相干接收器。前者可以检测波动的本身,因此它能接收波动所携带的波长、振幅和位相的全部信息。这类接收器有天线、超声波接收器、检测地震波的地震仪等。非相干接收器是一种能量接收器,它只能检测为波动能量所决定的有关振幅的信息。这种类型的接收器,常见的有照相底板、光电元件、热电偶以及人眼的视网膜等。它们不能检测波动位相的信息,但是通过相关的方法,这种能量接收器也可以记录物体的包括位相的全部信息。全息术正是利用信号携带波与参考波相干的方法,使原来的能量接收器可以记录物体的全部信息。

大家知道,各种生物,包括人在内,是生活

在三维空间的世界里。对这个世界,生物可以如实的感知到不同于一般光学照相所记录下来的东西。一般光学照相仅仅记录了物波振幅的信息,彩色照相还记录了有关波长的信息。在物波中波长是不可能携带有关目标形状、目标距离及深度信息。物波中振幅的变化情况比较复杂,根据振幅所携带的信息,不能对目标的距离及深度作出准确的判断,但是它携带了有关目标的形状、轮廓的信息,而这正是光学照相的基础。至于目标距离及深度的信息,却可通过波动的位相信息加工获得。

生物可以感知三维空间外部世界,因此它除了获得有关振幅、波长的信息之外,还可以接收包括位相信息在内的全部信息。并且,它可对全部信息进行加工、存储和再现。所有这些,正是生物全息的内容。

从全息的观点来研究生物对信息的接收、加工、存储与再现,一方面可以加深对生物体本身的认识,如弄清视觉、听觉模式识别及记忆的机制,另一方面可以从生物所具有的全息能力中得到启发,为工程技术提供新的设计思想,因此生物全息的研究,在理论上和在实践上都有重要意义。

二、全息原理简介

1948年 Gabor 首先用一个能量接收器,同时记录了物波振幅与位相的信息,并将它再现,方法是用一个参考波与携带信息的波相干,将振幅与位相的信息同时记录在一张底板上。这种底板因为同时记录了位相和振幅,所以称之为全息图,它是一种特殊的干涉图,也是一个编码的象。

全息图可用数学的形式描述如下:用复数

描述波的振幅与位相, $Se^{i\varphi}$ 表示接收平面上(即全息图上)任一点 (x, y) 信息载波的复振幅, 其中时间因素 $e^{-i\omega t}$ 被略去; $Re^{i\phi}$ 表示在接收平面同一点上参考波的复振幅。

在点 (x, y) 产生的强度为:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= (Se^{i\varphi} + Re^{i\phi})(S^*[e^{i\varphi}]e^{-i\varphi} \\ &\quad + R^*e^{-i\phi}) \\ &= SS^* + RR^* + SR^*e^{i(\varphi-\phi)} \\ &\quad + S^*Re^{-i(\varphi-\phi)} \end{aligned} \quad (1)$$

如果接收器的转换系数 $\tau(x, y)$ 正比于 I , 用恒等于参考波的光照明全息图, 最后的振幅是:

$$\begin{aligned} \tau(x, y) \cdot Re^{i\phi} &= (SS^* + RR^*)Re^{i\phi} \\ &\quad + SRR^*e^{i\varphi} + S^*R^2e^{-i(\varphi-2\phi)} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式中右边第一项代表参考波, 第二项是信息载波。如果 RR^* 是均匀的分布, 根据惠更斯原理, 它携带了物体的信息; 如果 RR^* 不是均匀的分布, 在再现时, 图象中有些畸变。第三项是物体的共轭象。

方程 (2) 的主要含义可以由向量图 1 清楚地给出。

在接收器上任一点, 下式成立:

$$\begin{aligned} (R + S \cos \varphi)^2 + (S \sin \varphi)^2 \\ = R^2 + S^2 + 2RS \cos \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

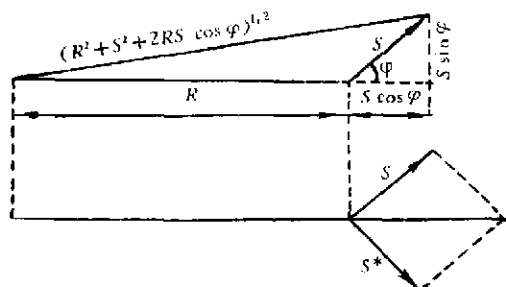


图 1 全息术的基本向量图

在 (3) 式中第三项是被参考波放大的信息携带项。式中第一项代表参考波, 它类似于电视中载波的作用。为了得到最初的信息, 使其再现, 必须把载波与所携带的信息分离开来, 这可以借助于参考波来实现。

第三项

$$2SR \cos \varphi = SR(e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}) \quad (4)$$

这项包含了放大的原始信息及它的共轭。由向量图可以看出这种记录却伴随着某些信息的丧失, 记录和再现的仅是 $S \cos \varphi$, 而 $S \sin \varphi$ 丧失了。换句话说, 这样记录与再现的信息仅仅是物体信息的一部分。1966 年 Gabor 曾指出, 这类型的损失是可以设法避免的。

总之, 由波前所携带的全部信息可以用只对强度敏感的接收器, 即能量接收器, 加上参考波而被记录下来。这样记录下来的图象, 再现时是原始的物波, 包括振幅与位相的信息。

由此可见, 全息术的思想是基于分解与综合二步的原理: 第一步, 将图象分解为它赖以构成的元素; 第二步, 经过综合, 使图象再现。

归纳起来, 全息术有如下特性:

1. 全息图是一个干涉图, 它和原始的物象不同, 它是物象分解转换的形式, 要再现原始的物象必须借助于参考波。

2. 为了使物体再现, 无须记录干涉图所有的灰度, 只要知道记录强度的最大值和最小值就足够了, 因此全息图的编码可以是两进制制的。

3. 全息图上的任一点都接收了来自空间上每一点的信息, 因此全息图的任何一小部分都包含着给定空间的全部信息, 用它可以使整个物体再现, 只是分辨率有所降低。

4. 全息术相干接收的方法, 可以通过提高参考波的强度来提高接收信号与噪声的比值, 实现在高噪声条件下弱信号的检测。

5. 再现的同时, 它的共轭也再现。

三、生物全息信息加工

谈到生物信息加工, 首先要说明它的主要兴趣不是在新陈代谢的物理、化学过程上, 而是用读入与读出函数之间的传递特性来解释生物信息加工的机制, 例如视觉信息加工、模式识别的问题, 以及有关信息存储的问题。

关于生物信息加工这个问题, 巴甫洛夫曾经说过: “生物第一步是分解由周围世界得到

[注] S^* 是 S 的共轭, R^* 是 R 的共轭。

的信息模式,第二步是将它综合形成知觉。”这种思想是和全息信息加工的观点相吻合的。全息术具有三维信息存储、再现及其他关联特性,生物有视觉模式识别、联想、记忆,那么这二者之间有没有相似之处,换句话说生物的信息加工是不是全息术式的呢?现在就从全息观点来考察生物信息加工方面的若干现象。

1. 生物接收全部信息的方法

从生物系统能够获得三维空间的全部信息来看,它接收的是信息的全部。可是动物的视觉等感受器,都是只对强度敏感的接收器。如上所述,这类接收器只能接收有关振幅的信息,不能接收信息的全部。那么,动物究竟是如何实现全息式的接收?即如何接收和加工位相信息的?这个问题,正是以往生物学研究被忽略的内容。

动物体上有些器官是成对的,这一有趣的现象对接收信息是有意义的。例如眼睛或耳朵,当空间某一点所发出的波动,到达这一对感受器时,由于距离不同,在两个器官之间出现波程差,这可引起动物位相的感知。

比较低等的动物如昆虫,它的眼睛由许多小眼组成。例如蜻蜓、苍蝇、夜蛾、萤火虫等,它们的复眼是由成千的小眼组成,小眼的形状有六边形的、正方形的种种,小眼直径约在30—50微米之间。模拟这种复眼结构的透镜,可以在自然光条件下,将一个三维目标的全部信息记录下来。三维目标的全部信息可用以下三个量来反映:

1. 从目标每一点所散射的球面波前的曲率;

2. 关于全息图平面,那些曲率的绝对方向;

3. 在全息图平面上这些波前的相对强度。

最后这类信息可以记录在能量检测器上,例如照相底板上。前两类携带了物波位相的信息,也可以同样地通过复眼透镜记录在能量检测器上。

如图2所示,目标上 P_i 点发出球面波。每一个小透镜收集球面波前的一个有限的立体角,在底板的乳胶上记录为 P_{ij} 。由于这种微小

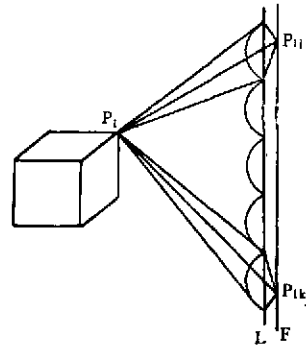


图2 用复眼透镜L,将三维信息记录在底板F上

光锥的方向与乳剂上对应记录点的位置是唯一有关的,因此透镜的列阵用离散的方法记录了上述两类和位相有关的信息。换句话说,单个波前的曲率和它们关于记录平面的绝对方向,由每个小透镜的象点的相对位置记录下来。这种记录方法所取得的信息与费涅尔全息图所具有的全部信息非常近似,我们可以将这种记录信息的底板叫做全息编码器。

如果利用这种底板再现图象时,可以从右边通过记录底板(正片)与复眼透镜,即发生与上述记录时的相反的过程,获得目标的三维实象,象的位置与目标最初位置是重合的(图3)。

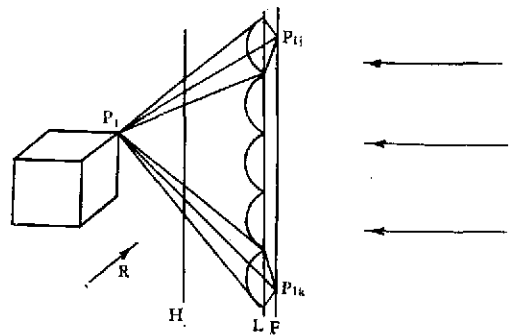


图3 用全息术方法,将底板F上的三维信息记录在全息图H上

实现这一过程无须相干光,但获得的象是一个实象,观察是不方便的。如果与激光全息术的方法相结合,可将全息编码器的三维目标的信息转换成全息图,然后用全息术的方法观察到目标的三维虚象。在记录全息图时,全息底板放在复眼透镜的左边,参考光可以从左侧,也可以从右侧提供。在前者情况下,就可以得

到 Lippman 型全息图, 观察时可用白光。

关于昆虫复眼角膜透镜的成象原理有几种解释, 其中近年来提出的有衍射学说。此学说认为角膜透镜形成许多光学象, 而在复眼的深部变成付利叶象。同时实验也证明, 如果将能够产生衍射的小孔有规则的、周期性的排列起来, 也具有角膜透镜成象的特性。

2. 主动类型的生物全息加工

许多动物, 如蝙蝠、海豚、猫头鹰以及某些鸟类, 能发出超声波, 并根据接收到的目标反射波定向, 捕捉食物, 躲避敌害或障碍。过去认为这种定位是通过发出声波到收到回声所经过的时间长短来确定的, 但这不能解释下列回声定位的许多重要特征:

(1) 动物怎样区别目标的形状? 测定回声经过的时间, 只能给出有关目标反射表面距离的信息, 并不能带来有关目标形状的信息。

(2) 动物如何区分前方目标是应当躲避的障碍还是可以追捕的食物。

(3) 如果目标是一个栅状物, 为什么动物能区别构成栅状物的线或棒是横的还是竖的。

(4) 蝙蝠发出的脉冲宽度为 1—10/1000 秒, 当食物距离它一米半以内时, 在脉冲持续时间中由目标反射的声波已回到蝙蝠身上, 这样就难以确定回声经过时间的长短。因此, 用回声经过时间就不能解释蝙蝠是如何捕取近距离的食物。

(5) 蝙蝠为什么能区别哪些脉冲是自身发出的, 哪些是别的蝙蝠发出的? 有这样的情况, 有的山洞里有几万只蝙蝠同时飞翔, 并不发生碰撞, 而且能照常发现和捕捉食物。

(6) 这些动物的信噪比非常之高, 它们可以接收甚至比噪声低二千倍的微弱信号, 远远超过目前人类所掌握的技术水平。

很显然, 即使反射的波前包含了三维空间目标的全部信息, 但如果只根据声波发射至接收到回波的经过时间是无法获知全部信息的。为了获得三维空间的信息, 必须对有关强度和位相的信息进行加工, 而这就是全息方式的信息加工。

Ayrapetyanc 于 1967 年用实验首次证实了蝙蝠在发射一定频率的超声波的同时, 还输送一个信息(即一个刺激)到大脑的一定部位上, 在这个部位上接收由目标反射回来的信息载波。Greguss 在 1967—1968 年指出, 由目标返回的载波包含有振幅和位相的信息, 它与作为参考波的刺激相干, 而被接收下来(图 4)。

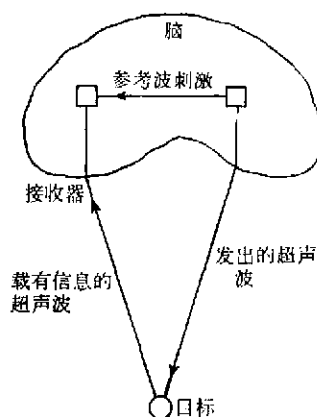


图 4 蝙蝠信息加工原理图

根据公式(3)可知, 它所接收的信息实际上是 $2RS\cos\varphi$; 其中 R 是参考波振幅, S 是信号波的振幅, φ 是参考波与信号波之间的相位角, $S\cos\varphi$ 是目标信息携带项, 在相干接收时放大了 $2R$ 倍。这就可以解释为什么它的信噪比高以及它又是如何提高信噪比的。当噪声增加时, 蝙蝠只须增加参考波刺激的强度, 而无须增加发出的超声波脉冲的强度, 信息携带项就由于 $2R$ 的因子而被放大。这种信息加工的方法也能用于解释动物通过回声定位可以获得三维空间目标信息的其他特征。

海豚也是基于这种机制来定位和捕捉目标的。Dreher 在 1969 年研究了海豚的瓜状体(melon)的组织结构, 也验证了生物信息加工是按照全息原理的。海豚的瓜状体器官接收由目标返回的信息载波。由于这一器官所处的位置, 它可以直接接收自身发出的部分超声波, 而产生参考波刺激。组织学的观察表明, 这个器官是由极为整齐、极有规则排列的微细结构组成。如果将它与照相底板相比较, 它的分辨率是 100 对线/毫米数量级。这样的分辨率比光

学全息照相底板低一个数量级,但如果考虑到它所用的超声波的波长是厘米波到米波,比光波远远要长,那么这种器官记录相干模式所具有的分辨率已经是足够的了。

认为海豚是进行全息加工的根据还有一个,这就是它发出的脉冲不是单个的,而是双重的;两个脉冲的时间间隔相差 $\lambda/4$ 。Gabor 曾经指出,一张全息图携带信息的 $S \sin \varphi$ 项,在记录再现时丢失了。但是如果用两个相差 $\lambda/4$ 的参考波,从信息模式可以得到两张全息图,同时进行信息模式的再现,这种丢失就可以避免,于是通过译码过程,海豚获得了整个信息模式(图 5)。

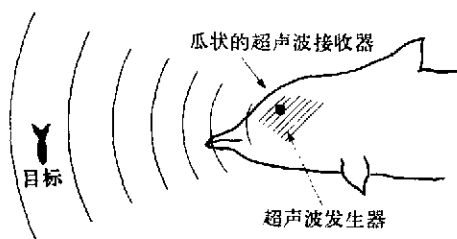


图 5 海豚瓜状体的位置

鱼类在游泳时产生波动,并接收了这些反射波,当加工这些反射波所携带的信息时,就获得关于周围环境的三维空间的知觉。鱼类检测这种反射波的器官叫侧线,它的结构和海豚的瓜状体相类似。鱼类游泳时产生的机械波激发了一个参考波刺激——神经电活动,它是与游泳活动同步的。这个参考波刺激与侧线检测到的携有信息的反射波相干。由单个点所产生的干涉模式是一维的费涅尔波带片(Fresnel zone plate),这个信息模式是以全息的方式记录下来的。再现这种全息刺激模式,鱼就获得了周围环境三维空间的“印象”(图 6)。这类似于 Kock 1968 年提出的“侧视雷达”(Side looking radar)。

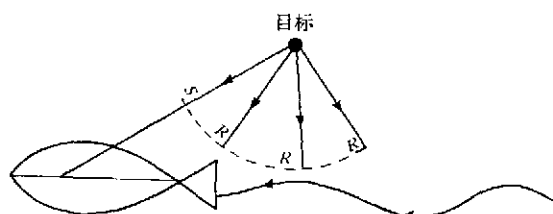


图 6 鱼类的“侧视雷达”技术

动物的全息式的信息加工机制的研究与观察,首先在蝙蝠、海豚、鱼类中取得结果不是偶然的,这些动物活动在水中或空中,这是一个三维空间的环境。在这种介质中活动,自由度比生活在陆地上的动物更大,对位相信息的需要也更多,对位相信息加工的能力也更发达,那么对它们信息加工机制的研究比较容易得到有意义的结果也是自然的事了。在这里,可以举一个与此有关的有趣的例子。两栖类的蝾螈,一年中九个月生活在陆地上,其余三个月配偶期生活在水中,只有这三个月侧线发达,而生活在陆地上时侧线完全退化,显然这是与位相信息加工的需要有关。

3. 被动类型的全息信息加工

光波携带的信息产生视觉,象这类情况是否也是按照全息信息加工原理进行的?

下面把生物系统和光学系统做比较,用生理实验结果说明生物系统可以象一个光学系统一样进行全息信息加工,在此基础上提出被动的信息加工模型,反过来又可以用这个模型去解释某些生理现象。

(1) 生物接收器是一个换能器,它接收外界的信息,再编码转换成神经电脉冲。这种脉冲在神经上传导是按照全或无定律,即传导的脉冲强度,或者是 1,或者是 0,信息是通过频率的调制来传递的。因此可以将神经回路系统看做一个二值的系统,在给予一定的运算法则之后,就可以按波动来处理。另一方面,从全息原理来看,全息图的记录无须包括所有的灰度,只须记录最大值和最小值就足够了,也就是说全息图的编码可以是两进位制的,因此利用具有全或无定律的神经脉冲,进行全息信息加工是可能的。

(2) 阈值律。神经电脉冲在神经突触处进行空间和时间的总和,只有当总值大于阈值时,脉冲才能继续传下去,否则脉冲消失。这种神经脉冲传导的阈值律也可以和全息原理相类比。1961 年 Gabor 证明了最初由目标发出的信息载波的能量 E_s 小于某个最小值 E_0 时,就不能获得全息图,这是因为当 $E_s < E_0$ 时,

信息携带项变成小于参考波随机离差的平方, 即 $E_s E_R < (\Delta \bar{E}_R)^2$ 。式中 E_R 是参考波的能量。而仅仅当 $E_s \geq E_0$ 时, 得到全息图才有可能。因此, Gabor 指出, 全息术中的阈值律和动物神经脉冲传导的阈值律是相吻合的。

(3) Bishop 在 1936 年观察大脑电位时, 发现仅仅那些与大脑活动静止周期正位相同步的输入刺激可以被记录。Bartley 在 1936 年、Landan 在 1961 年也观察到类似情况。这与前面提到的全息图类型加工与存储不完备性是相吻合的。事实上全息图记录的仅仅是与参考波同位相的复数振幅的那些部分, 即 $S \cos \varphi$, 而另一部分 $S \sin \varphi$ 被丢掉了。

(4) 全息记录是通过信号波与参考波相干, 形成干涉图来实现的, 用参考波就可以再现, 生物全息信息加工也应具有这类特点。

Herrick (1956 年) 认为, 脑的灰质神经细胞外部的纤维结构与脑细胞连结, 但它又有独立的功能, 也就是说这种纤维结构是能产生自刺激的物质, 又是自发活动的物质, 与外部刺激无关。Ernst (1966 年、1967 年) 观察到这种神经纤维除了起着传导信息作用之外, 还有调制信息载波频率的作用。这意味着有一个与外部刺激无关的刺激, 它调制载有信息的神经脉冲的频率。有理由可以认为, 这个过程与全息术中信号波与参考波相干的作用是类似的, 而这个无关的刺激就起着全息术中的参考波的作用。

(5) 在全息术中物象是以一定的方法形成的, 即收集由物体散射的波, 并与参考波相干, 形成相干图形, 再用参考波复制出物体的原始的象。Abbe (1873 年) 叙述象的形成成为两次付氏变换的结果。携带波前信息的复数振幅分布——如果用仅仅对振幅敏感的接收器, 那么只能以全息的方式被记录——它是最初物体信息的付氏分布。而第二次付氏变换的结果, 就是最初的信息图形, 即物象。在全息术中, 携带信息的波前、参考波、记录介质的表面的相互关系, 确定了全息图的类型和波前再现所用的数学工具。近处的物体形成的全息图称为费涅尔全息图, 远处的物体形成的全息图叫夫琅和费全息

图, 或者叫付利叶变换全息图。这两种全息图分别用费涅尔变换和付利叶变换的数学工具来描述。这两种变换都具有自反 (Self reciprocity) 的性质, 它们运算之间的差别在研究生物信息加工时可以不考虑。生物全息信息加工中的一个关键问题是如何解释在生物的反应时间中具有付氏变换的能力。

生物信息加工模型的所有概念和想法都是以波导的神经网络为基础的。最近关于神经网络结构研究的结果, 使这些思想更加强了。Szentagothai 于 1968 年发现小脑皮层结构是异常有规则的, 甚至接近晶体; 同时, 攀缘纤维和浦肯耶氏细胞的比例是一比一。攀缘纤维能够读出浦肯耶氏细胞的兴奋和抑制水平, 而浦肯耶氏细胞的兴奋与抑制是通过苔藓纤维输入造成的。A. Pellionisz 用电子显微镜研究的结果指出, 每个颗粒细胞可以看成是在四个顶点上具有一对一的树突的四面体, 这与 Butler 矩阵中的混合结相似, 而 Butler 矩阵具有进行快速付氏变换的功能。Fernandez-Moran 在电子显微镜下观察到脑神经纤维的髓鞘与晶体非常相似。根据这种顺晶体的排列, Fernandez-Moran 提出脑的某些结构类似液晶。神经髓鞘顺晶体的发现是很有意义的, 因为这意味着脑的主要组成结构是极有规律的, 是相干的。

Fernandez-Moran 推测晶状的脑组织结构能起到电磁波能量波导的作用。根据这种假设脑传送一个有规律的电磁波能量束, 与激光束非常类似。这种类似激光的能量可以用来从脑的任意部分提取与存储信息 (记忆), 记忆的象很象一张全息图, 存储的三维象通过类似激光波束相干 (intersect) 来产生, 能在脑中一次又一次的“再现”。

Godman 和 Lawrence (1967 年) 利用电子计算机, 采用快速付氏变换算法, 计算物波与参考波相干产生的全息图, 需要 8 分钟, 在生物中相似的反应时间只要 1/10 秒, 而加工的时间应小于 1/10 秒, 看来生物再现全息图不可能用快速付氏变换数字计算的方法, Butler 矩阵进行快速付氏变换则不需要数字运算。

Rudolph 应用 Butler 矩阵对微波进行数据加工, 速度为毫微秒数量级。神经脉冲传导速度为 10^2-10^4 厘米/秒, 比微波速度低许多个数量级, 因此在神经网络中如果用 Butler 矩阵进行付氏变换, 运算速度应为 $10^{-1}-10^{-3}$ 秒, 这与生物进行运算的速度是一致的。Butler 矩阵还有以下特点: ① 它有 2^n 个输入和 2^n 个输出。这与攀缘纤维和苔藓纤维一对一的比例是相吻合的; ② 它基本上是延迟线系统, 由混合结 (hybrid) 和相移器所组成, 这与上述 Pellionisz 所提出颗粒细胞的结构相类似。

(6) 还应当证明脑子发出的参考波能够满足相干的要求。现证明如下:

将载有信息的神经脉冲频率记作 N , 参考波的频率为 $N-\Delta N$, 神经脉冲传导速度为 C , 则 $C=\lambda N$, 角频率 $\omega=2\pi N$, 位相 $\Phi=2\pi Nt$ 。

如果在时间 $t=0$ 时, 载有信息的脉冲与参考波刺激是同位相的; 在经过时间 t 后, 载有信息的神经脉冲与参考波刺激产生位相差:

$$\Delta\Phi = 2\pi[Nt - (N - \Delta N)t] = 2\pi\Delta Nt$$

$$\therefore \Delta N = -\frac{\lambda}{\Delta\lambda^2},$$

代入上式

$$\Delta\Phi = 2\pi[C\Delta\lambda \cdot t/\lambda^2]$$

如果按信息波和参考波相差 $\pi/2$ 为相干时间的判断, 由上式可以导出公式:

$$t = 0.25\lambda^2/C \cdot \Delta\lambda$$

将已知的神经加工时间常数 λ 和 C 代入上式, 就得出相干所需要的时间, 而它正是在已知反应时间常数范围内的。

(7) 人和动物的记忆象全息图一样, 是分散存储的, 而不象目前计算机那样, 这个结论可以从 Lashley 等人的动物实验中获得。Lashley

把动物与视觉有关的大脑皮质切除 90% 以上, 动物仍然产生映象记忆。

(8) 生物体中实现全息存储的物质是什么? 近几年有人认为记忆是与 RNA、DNA 分子有关的。由于神经细胞兴奋的结果, 细胞核的 DNA 分子的电场强度可以引起它最初的基本序列发生改变, 这种改变将长时间保留在 DNA 的分子上, 因此它实际上是长期记忆的存储信息的“元件”。

由以上介绍的情况来看, 支持生物全息这一概念的事实越来越多, 接受这一概念的人也不断增加, 但如果生物对信息的接收、加工、存储与再现是全息式的, 它又是如何进行的? Greguss 等人在 1967 年提出了一个生物全息信息加工的模型, 阐明了一些难以理解的问题, 但这些问题都尚有待深入的研究。当然, 在这一问题研究的道路上困难肯定是很的, 但它的前景也肯定是诱人的。

参 考 文 献

- Aldridge, F. E. et al.: *Brit. J. Radiol.*, **44**(518), 126—130, 1971.
- Barett, T. W.: *Neuropsychologia*, **1**, 135—148, 1969.
- Barett, T. W.: *Math. Biosciences*, **9**(1), 49—60, 1970.
- Dreher, J. J.: *Acoustical Holography*, Plenum Press, New York, 1968.
- Greguss, P.: *SPIE Proceedings*, April, 14—15, 1971, Boston, pp. 55—83.
- Greguss, P.: *Progress of Cybernetics*, **1** 433, 1969.
- Greguss, P.: *Nature*, **219**, 482, 1968.
- Greguss, P.: *Acta Biochim. et Biophys.*, Acad. Sc. Hung., **1**(3), 263—273, 1972.
- Gabor, D.: *Nature*, **161**, 777, 1948.
- Pole, R. V.: *Applied Physics Letters*, **10**(1), 1967.
- Vilkomerson, D.: *ISRI. Technol.*, **9**(3), 297—304, 1971.
- Westlake, P. R.: *20th Ann. Conf. Eng. Med. Biol.*, Boston, **4**, 5, 1967.
- Westlake, P. R.: *Kybernetik*, **1**(4), 129—153, 1970.
- 土井康弘: 医用电子と生体工学, **8** (5), 1970.