

无线电全息摄影

国防工业出版社

73.71178
919

无线电全息摄影

Г. С. 萨伏洛诺夫 著

A. П. 萨伏洛诺娃

浙江大学《新技术译丛》组 译

1106614

国防工业出版社



内 容 简 介

本书介绍微波全息图造图的基本原理及其主要特性,探讨各种不同的建象条件下全息图图像再现的特点、全息图的分辨力和信息容量,讨论用来记录全息图的感光板的非线性特性对象质产生的影响。书中研究了量化型、离散型、离散量化型和镶嵌型全息图的特征以及诸型全息图图像再现的特点,还讨论了分辨力的问题及量化间隔和离散间隔对图像结构的影响。同时还探讨用平面或线形孔径天线阵及“点状”孔径天线拍摄微波全息图的原理和特点,列出不同的微波全息图造图条件下确定再现现象参数的关系式。

本书可供无线电技术人员和雷达专业人员、高等院校无线电工程专业、无线电物理专业的师生参考。

Введение в радиоголографию
Г. С. Сафронов, А. П. Сафронова
«Советское радио», 1973

*

无线电全息摄影

浙江大学《新技术译丛》组 译

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 8³/₈ 176 千字

1978年5月第一版 1978年5月第一次印刷 印数: 00,001—14,000册

统一书号: 15034·1641 定价: 0.88元

译 序

全息摄影是现代摄影技术中一个全新的概念，于本世纪六十年代随着激光相干光源的出现而问世以来，发展异常迅速，目前已在生产、科研的许多领域中获得日益广泛的应用。无线电全息摄影作为全息摄影术的一门分支，顾名思义是利用无线电波来实现全息摄影。本书在介绍全息摄影的基本原理及全息图造图建象的主要特点的基础上，重点归纳讨论了各类微波全息图的造图方式和图象再现的特点。

本书内容偏重于理论分析，为此引用了大量数学公式，但缺少实验研究方面的资料。书写成于几年以前，所用参考资料都是七十年代初期的，然而毕竟不失为一本入门导引用书。

在翻译过程中，对原书作了少量删节，还改正了一些明显的排印错误。本书由宓鼎梁同志译，张志诚同志校，朱如曾同志对公式作了推导、核对。限于水平，错误不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

目 录

导论	1
第一章 全息摄影基础	6
1.1 全息图的拍摄及图象的再现原理 点状物体的全息图	6
1.2 全息摄影所用的衍射公式	12
1.3 点状物体全息图的特性	19
1.4 复杂形状物体的全息图及其分类	24
1.5 菲涅耳全息图	29
1.6 夫琅和费及傅里叶全息图	33
1.7 全息图的特性	37
1.8 全息图的图象再现	42
1.9 全息图再现现象的特点	57
1.10 用不同于造图时的频率实现缩尺型 全息图 图象再现的特点	63
1.11 物体的空间频率 经物体衍射的电磁场信息量	75
1.12 全息图的分辨力	82
1.13 记录全息图用感光板的非线性特性对再现图象的影响	88
1.14 多重全息图图象再现的特点	92
第二章 离散结构全息图及其再现图象的特性	100
2.1 离散结构全息图	100
2.2 离散全息图及其再现图象的结构	103
2.3 镶嵌全息图及其再现图象的结构	110
2.4 量化全息图及其再现图象的特性	121
2.5 固定量化间隔型量化全息图的分辨力	132
2.6 量化全息图图象再现的特点	138

2.7	离散量化型全息图图象再现的特点	143
2.8	随机量化间隔型全息图图象再现的特点	146
第三章	无线电全息摄影术	152
3.1	微波成象法	152
3.2	用线孔径天线合成微波全息图的原理	158
3.3	用“点状”孔径天线合成微波全息图的原理	173
3.4	无线电全息摄影的衍射公式	189
3.5	微波全息图单元造图的特点	192
3.6	准光学微波全息图	200
3.7	用线孔径天线合成的微波全息图	214
3.8	用“点状”孔径直线运动的天线合成微波全息图	222
3.9	用“点状”孔径天线合成直线运动目标的微波全息图	234
3.10	用“点状”孔径天线合成转动目标的微波全息图	237
3.11	用待摄目标运动方向上的“点状”孔径 天线合成微波全息图	242
3.12	信号和参考波参数的变化对微波全息图结构及其 再现图象的影响	247
3.13	根据微波全息图判断和识别目标	251
参考资料		257

导 论

现代雷达技术的一项重要课题是识别远距离的目标。解决此问题的途径之一是利用被测目标反射信号（回波）的参数。根据接收到的信号有可能确定被测目标的尺寸、相对于质量中心的转动速度、目标反射系数参量、反射信号的偏振结构，以及其他一些参数。通常是按照上述参数的数值建立矩阵，借以识别或判断目标。然而，根据这些矩阵识别目标并不总是可靠的。许多场合下必须“亲眼看到”雷达目标，并把看到的形象与标准目标的形象进行对比。为了目视观测雷达目标，要求把雷达设备和光学仪器合并成一个系统。雷达设备用来发现目标和确定其坐标；光学仪器在目视观测的基础上识别或判断目标。此时的目标识别和判断既可由操作者目视进行，也可运用数字计算机。光学设备只有在良好的气象条件下方能实现目视观察，气象条件恶劣（雨、雾、雪）时难于或根本无法进行观测，因而就很有必要使用不受气象条件限制的无线电波摄取图象。

光波和无线电波的本质相同，故而原则上是能够用无线电波照射目标来获得图象的。例如，可采用准光学法建象。其实质在于将目标所反射的无线电波靠透镜聚焦在换能器阵列上，形成缩小的目标无线电图象。在换能器输出端产生与入射波场的强度成比例的信号，经换能器放大的信号输至显示器以便再现聚焦在换能器阵列上的图象。显示器上的每一点对应于一个换能器，每点的照度由换能器输出端的信号

值决定。聚焦在换能器阵列上的目标无线电图象以诸点有不同亮度等级的形式再现于显示器的荧光屏上，结果是无线电图象转变成了光学图象。但是实用上，准光学法仅仅在用亚毫米波和毫米波的探测信号照射目标时才是有效的。这样的波段用于雷达会带来不少困难，因为这个波段的电波在大气及雨雾中衰减很严重，所以最好能运用较长的波段来建象。不过，在较长电波的波段内又由于接收天线的尺寸受限制而使分辨力不足以构成目标的优质成象。

雷达站上的天线尺寸要受天线的安置、运转和运行特点的限制，因而摆在研究人员面前的一个问题是，如何在不增大天线尺寸的同时改善分辨力。五十到六十年代发明的合成孔径天线法是解决上项困难的一种手段，它用在相对于被测目标移动的雷达站，特别是飞行器的侧视雷达上。这种方法是使飞行器的机载雷达发射装置朝飞行轨迹垂直方向发射相干的探测信号，而目标的反射信号为飞行轨迹上等距离各点的接收装置接收并存贮起来。在很大一段飞行轨迹上接收到的信号群按幅度和相位进行求和，如同相控阵天线那样。这样处理信号的结果，可使被测目标的分辨力不取决于接收天线的尺寸，而是由能收到回波信号的那段飞行器运动轨迹的长度决定。这段轨迹长度确定了天线合成孔径的大小和侧视雷达的分辨力。带合成孔径天线的雷达的潜在分辨力等于照射目标的无线电波半波长。这方面所作的进一步研究表明，合成孔径天线法乃是全息摄影术中采用的特殊的信号处理方法。在平面或立体感光板-全息图系统上记录目标散射场参数的信息，并在用光源照明后能获得可见立体象的方法称为全息摄影术。全息术的独特之处在于，不象照相术那样

直接记录目标的图象，而是记录下决定着图象结构的目标散射函数的傅里叶或费涅耳变换。也正是这一特征构成了全息术的某些卓越的性能。

可以用无线电波给被摄目标造图及再现出目标的可见象，是微波成象采用全息术所拥有的主要特点。必须指出，按空间不同位置 and 不同时刻接收到的目标无线电回波有可能构成这样的合成孔径全息图，其合成孔径的尺寸比信号接收所用天线的尺寸大出好多倍。这种全息图的目标可见象具有很高的分辨力。

利用无线电波拍摄的全息图通常叫做微波全息图，在此种波段内处理信号的全息摄影方法称为无线电全息摄影术。

奠定现代全息术基础的最初一些论文是盖伯于1947年提出的，他当时拍摄了第一批平面全息图，展示出全息图的惊人特性。但正象科学和技术上经常发生的，全息术尽管拥有许多优点，由于技术设备的不够完善，它一开始并没有得到重视，却被人忘却了。只是经过十五年以后，美国工程师利思和乌帕特尼克斯在运用激光技术的基础上复活了全息术，从而奠定了无线电光学的一个新的分支——现代激光全息摄影术。

与此同时，苏联科学家杰尼索克提出并首先制造成体积全息图，可在白光下再现被摄物体的立体象和彩色象。

近年来，全息术的急速发展越来越引人注目。全息摄影方法能用到几乎所有传统的应用光学领域、X射线和电子显微学，以及红外技术、无线电测量、声学的某些范围，并使这些领域出现完全崭新的面貌。有关全息图及其再现象特性的研究成果，以及在各种技术部门和科学实验中的应用，许

多定期的科技刊物上均有报导。

应该指出,全息术运用无线电波段是1962年才提出来的。首批微波全息图于1965年拍摄成功,采用了与光学全息图相仿的造图系统,所以被称为准光学微波全息图。借助此类全息图有可能以厘米波照射目标,获得可见象。当时能得到的全息图尺寸有限,而全息图尺寸对分辨力是决定性的因素,所以图象的质量不高。合成孔径微波全息图有较高的图象质量,这方面的研究情况在不少文章中已有介绍,但缺乏有关无线电全息摄影术理论的系统性论述。

本书的主要目的在于从统一的观点探讨无线电全息摄影术的可能性。第一章介绍全息图造图及图象再现的原理,以便读者了解用全息摄影方法处理信息的基础,根据全息图上记录的干涉条纹结构的差别进行全息图的分类;研究各类全息图的特性和图象再现的特点;列举决定各种全息图分辨力的数量关系式;确定全息图记录介质的非线性对再现现象质量的影响;探讨分别摄制的全息图相互迭合在一起形成多重全息图时的图象再现特点。

记录微波全息图的干涉条纹,通常采取离散结构。在某些场合下,干涉条纹除了离散化外,还有按幅度量化的。为此,第二章研究具有确定和随机的离散和量化间隔的离散、量化、离散量化型全息图的特性,以及以上各种全息图图象再现的特点。这一章还确定拥有优质再现现象的离散和量化参数允许值,评价全息图离散和量化对分辨力的影响。

在第一、第二章的基础上,第三章介绍无线电全息摄影术的理论基础。从比较各种微波成象法的特性开始,说明利用合成微波全息图的微波成象法要比其他方法优越。接

着探讨借助线形孔径和“点状”孔径天线接收信号的微波全息图的合成原理；列出确定全息图分辨力的关系式。此种微波全息图的分辨力远比用别种信号接收天线的全息图的分辨力为佳。本章还对微波全息图作了分类，罗列各种类型微波全息图单元的造图特点及确定准光学微波全息图及其再现现象参数用的一些算式。介绍准光学微波全息图的可能应用范围，特别注意到用线形孔径和“点状”孔径天线合成的合成全息图的特性。此外又列出目标散射场波前相对于接收天线有各种运动时确定合成微波全息图及其再现现象参数的算式，研究信号和参考波参数变化给微波全息图及其再现现象带来的影响。

第一章 全息摄影基础

1.1 全息图的拍摄及图象的再现原理

点状物体的全息图

运用照相机拍摄各种物体的象已有一百多年的历史。透镜是任何一架照相机的主要部件，靠它把被摄物体的象聚焦在记录介质——感光板上。照相的成像过程在于被摄物体表面所散射的不同的光强被记录在感光板上。用照相机法，平面的和立体的物象都是可能得到的。想使平面感光板保存被摄物体的立体信息，就必须采用立体透镜系统，以便获得两张有区别的照片。用立体镜观看这两幅照片，物体的立体效果便重现出来。

通过改进电子显微镜的实践，盖伯认为，无需求助于聚焦装置便有可能从平面感光板保存的信息得到物体的可见立体象^(1~3)。他提出的方法称为全息摄影术或波前再现法。前一种名称表示记录了物体散射场的全部参数信息，即感光板-全息图记录下不仅仅有关物体散射场幅度的信息，还包括散射场的相位信息。后一种叫法表明，全息图的建象是借助于物体衍射场的原始波前的再现。

全息照相是一种两步成像过程：首先拍摄全息图，其次是再现全息图中的信息图象。

全息图的造图原理如下。物体受单色相干光源照明，感光板放置在物体衍射波的传播途径上，与照射物体的波相干的参考光波同时也射向感光板。全息图的摄制示意图见图1.1。

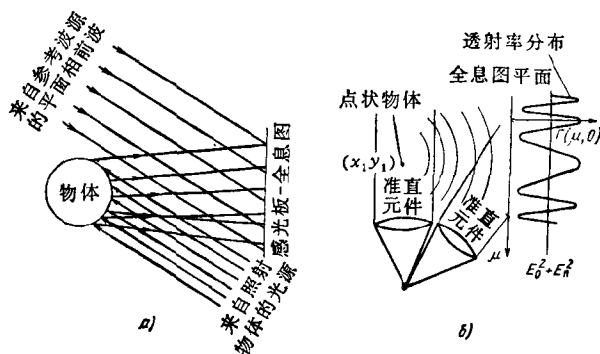


图1.1 (a)全息图的摄制示意图；(b)拍摄点状物体全息图及全息图的透射率分布。

在参考光波与物体衍射波相互作用的整个范围内，它们之间始终存在着干涉。所形成的干涉图样可记录在立体或平面的感光板上。平面感光板上的干涉图样是按感光板透射率随干涉场光强变化而改变的方式记录的；至于立体感光板，除记录干涉场入射平面内的透射率变化外，还记录下感光板整个厚度上的干涉图样。保存在全息图中的信息同被摄物体象毫无相似之处，然而却包含物象再现所必须的信息。体积全息图记录的信息最完整，而平面全息图所记录的不那么完全。从技术实用角度来看，拍摄平面全息图比较容易，所以已获得普遍的应用。无线电全息摄影只能用平面全息图记录，为此，本书仅针对平面全息图进行讨论。

为使信息再现出图象，应该用光照射全息图。体积全息图可由白光照射，再现的是被摄物体的立体象；如若在特定的

条件下造图，则能再现出彩色象。再现体积全息图中的物象时，观察者感受到一种特殊的效应，即感受到原物成象空间的深度和立体感。对于平面全息图，为了再现物象必须用相干光照射，从而再现出两个立体象。一个是虚象，就位在物体拍摄时的原来位置上，无论从哪个角度观看，此象和被摄物体象完全一样。第二个象是全息图再现的实象，位在全息图的另一侧，同虚象成镜象关系。实象具有幻视性这一特征，物体原来凸出的地方似乎凹了进去，而凹陷之处却凸了出来。平面全息图的物象再现之所以必须用相干光源，并且出现的是实象，是因为立体干涉图包含的信息在记录进平面全息图时，势必有一部分会丢失的缘故。

记录在全息图上的干涉图样的结构取决于被摄物体外形轮廓的复杂程度如何。点状物体的全息图最简单，我们就由此开始研究全息图的造图特征及其性能。

为了拍摄全息图，应该具备：1）照射物体的单色光源；2）与用以照射物体的光波相干的参考光源；3）记录参考光波与物体衍射波相互作用后所产生的干涉图样的感光板。

图 1.1 (6) 表示全息图的一种拍摄方式。这里，单色光源发出的光波分裂成两个光束：一束照射位在 x_1, y_1 坐标点上的物体，另一束作为参考光波。采用此种方式能有参考光波和物体光波之间很高的相干性。为了肯定起见，我们取参考光波平面相前同感光板平面 ($\mu\nu$ 平面) 的夹角为 α_0 。

参考光波在感光板平面内的光场强度瞬时值为

$$e_o(\mu, \nu; t) = E_o \exp\{-j[\omega_0 t - \Phi_o(\mu, \nu)]\} \quad (1.1.1)$$

上式中 E_o 表示感光板平面内的光场幅度； Φ_o 表示相位分布。

$$\Phi_o = \kappa(r_0 - \mu \sin \alpha_0)$$

式中 r_0 ——全息图和光源间的距离;

$\kappa = 2\pi/\lambda$ ——波数;

λ ——波长。

在感光板平面内由物体衍射的光场瞬时值为

$$e_n(\mu, \nu; t) = E_n(\mu, \nu) \exp\{-j[\omega_0 t - \Phi_n(\mu, \nu)]\} \quad (1.1.2)$$

式中

$$E_n(\mu, \nu) = \frac{E_1}{[(\mu - x_1)^2 + (\nu - y_1)^2 + r^2]^{1/2}} \quad (1.1.3)$$

E_1 ——与物体处的光场幅度成正比的量;

r ——物体和感光板间的距离;

$$\Phi_n(\mu, \nu) = \kappa[(\mu - x_1)^2 + (\nu - y_1)^2 + r^2]^{1/2} \quad (1.1.4)$$

合成场的瞬时值可写成和的形式

$$e(\mu, \nu; t) = e_o(\mu, \nu; t) + e_n(\mu, \nu; t) \quad (1.1.5)$$

参考光波和物体衍射波是相干的, 故相互干涉。干涉图样中的光强分布可看成是光场的复值幅之和的模数平方。为书写简便起见, 删去函数的自变数, 便得到感光板平面内的光强分布

$$\mathcal{I} = |e_o|^2 + |e_n|^2 + e_o e_n^* + e_o^* e_n \quad (1.1.6)$$

记号*表示复数共轭值。将 e_o, e_n 值代入后得

$$\mathcal{I} = E_o^2 + E_n^2 + 2E_o E_n \cos(\Phi_n - \Phi_o) \quad (1.1.7)$$

如果以幅度透射率和入射光强成正比的照相胶片作为感光板, 则经曝光和显影后记录在胶片上的干涉图样为

$$\Gamma = \varepsilon \mathcal{I} = A + B \cos\{\kappa[(\mu - x_1)^2 + (\nu - y_1)^2 + r^2]^{1/2} - \kappa(r_0 - \mu \sin \alpha_0)\} \quad (1.1.8)$$

式中 ε ——由感光材料灵敏度和曝光时间决定的系数;

$$A = \varepsilon (E_o^2 + E_n^2); \quad B = 2 \varepsilon E_o E_n$$

上述的点状物体全息图是底片上量化级为 A 的明暗交替的图纹组合。为了确定这些图纹的几何形状, 令余弦的自变数等于常数 ψ 。自变数经过变换以后有

$$\begin{aligned} \mu^2 \cos^2 \alpha_0 + (v - y_1)^2 - 2\mu \left(x_1 - r_0 \sin \alpha_0 - \frac{\psi}{\kappa} \sin \alpha_0 \right) \\ + x_1^2 + r^2 - \left(\frac{\psi}{\kappa} + r_0 \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad (1.1.9)$$

由此得出, 全息图上的图纹乃是同心的椭圆环集。椭圆环中心的坐标为

$$\mu_0 = - \frac{\left(r_0 + \frac{\psi}{\kappa} \right) \sin \alpha_0 - x_1}{\cos^2 \alpha_0}; \quad v_0 = y_1 \quad (1.1.10)$$

分析式 (1.1.10) 可知, 各椭圆中心的坐标与参考光波波前在全息图上的入射角 α_0 及由 ψ 值决定的椭圆参数有关。随着 ψ 值的增大, 椭圆的尺寸也要增大, 同时椭圆中心会沿 μ 坐标偏移。

全息图椭圆环的透射率是全息图坐标的函数。当全息图的尺寸增大时, 如式 (1.1.8) 所示, 椭圆环的幅度透射率 B 将缩小, 在无限远处变为零。若全息图的尺寸远比至物体的距离 r 为小, 则整个全息图平面范围内的 B 值可认为是不变的, 且等于 B_0 。

如果光波的相前平行于全息图平面, 那么椭圆环变成同心圆环集, 越接近全息图边缘, 环与环之间的间距就越小。环的中心坐标与点状物体在全息图上的投影坐标重合。此时描述全息图的函数是

$$I' = A + B \cos \{ \kappa [(\mu - x_1)^2 + (v - y_1)^2 + r^2]^{1/2} - \kappa r_0 \} \quad (1.1.11)$$

在全息图的尺寸符合条件

$$\max |\mu - x_1| < r, \quad \max |v - y_1| < r \quad (1.1.12)$$

的特例中, 可用下面的近似值代替式 (1.1.11)

$$\Gamma = A_0 + B_0 \cos \left\{ \frac{\kappa}{2r} [(\mu - x_1)^2 + (v - y_1)^2] + \kappa (r - r_0) \right\} \quad (1.1.13)$$

正如罗杰斯最先指出的那样, 符合式 (1.1.13) 的点状物体的全息图按照本身的特点来说, 同菲涅耳波带板完全一样。菲涅耳波带板可用下面函数式表达:

$$\gamma = A_0 + B_0 \frac{\cos \left\{ \frac{\kappa}{2r} [(\mu - x_1)^2 + (v - y_1)^2] \right\}}{\left| \cos \left\{ \frac{\kappa}{2r} [(\mu - x_1)^2 + (v - y_1)^2] \right\} \right|} \quad (1.1.14)$$

全息图的不同于波带板只在于幅度的透射方式, 前者作均匀平滑的变化, 而后者取阶跃形状。图 1.2 示出透过全息图和波带板的幅度随坐标 μ 而变化 (当 $v = 0$) 的关系。

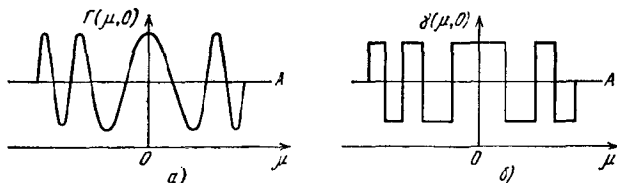


图1.2 幅度透射与坐标的关系

(a)全息图; (b)波带板。

这样, 点状物体的全息图具有以下一些特点:

1) 参考光波相前斜射至感光板的场合, 全息图呈现出