

遥感理论模式研究的几个问题*

金亚秋

(复旦大学电子工程系)

摘 要

本文简要地评论近年来微波遥感理论模式研究的进展,主要包括遥感对象理论模拟的随机离散散射粒子介质,连续随机介质,和随机粗糙表面的电磁散射和热辐射的理论,定量的数值求解方法,以及它们在地表植被、土壤、冰雪、大气云雨、海冰、风驱海面等主动和被动遥感中的应用。随着今后遥感技术的发展,要更为精细地模拟自然界中遥感对象及其环境,给出定量的数学物理学方法,进行定量的数据分析和遥感参数反演,还有大量的工作有待于研究。本文讨论了当今遥感理论模式研究中还存在的问题,提出了今后要予以研究的若干个方向性工作。

关键词 定量的遥感 理论模式 未来研究课题

一、引 言

遥感科学是随着无线电电子学、计算机技术、航天科学等高技术的发展,而成为近廿年来人类探索自然环境、监视和估计地球资源、了解全球性物理化学和生物系统变化的最重要的科学技术成就和最为有效的手段之一。在90年代,随着人类活动对环境日益增大的压力,对全球性气候和生态变化的了解,遥感科学的发展将变得更为迫切。90年代的遥感科学包括了诸多学科的综合交叉的前沿性的发展工作,以及在众多领域中的广泛应用。它的成功将为人类进入21世纪展现新的机会和前景。

电磁热辐射和入射电磁波(可见光、红外、毫米波、微波)与遥感对象和环境的相互作用为我们提供了被动和主动遥感的丰富信息。要充分理解遥感图像和数据的丰富信息,必须深入理解和研究电磁波与遥感对象和环境相互作用的机理,发展定量的数理模式和数值计算仿真方法。自然界中遥感对象(大气、云雨、土壤、植被、冰雪、海洋等)可以看作是离散的散射体组成的随机介质,或介电常数随机起伏的连续随机介质。散射体的介电特性、大小、形状、空间取向及其分布,或者介电常数的起伏统计方差、相关函数,以及随机介质的多层复杂结构,平滑或粗糙界面等等,构成了随机介质基本的物理模型。研究随机介质中电磁波散射、热辐射及其传输的数学物理学理论及其数值计算方法,使我们能够得到主动遥感中各种极化的双站和后向散射系数、被动遥感中极化的辐射亮度温度,并建立起这些量与遥感对象介电的,几何结构的,以及其它重要的特征性参数之间的定量的函数关系。进而为遥感数据的分析和利用,参数的反演等提供可靠的理论依据。它对进一步改善和发展遥感仪器,发展遥感的新方法新手段,也具有十分重要的意义。

近20年来,遥感理论模式的研究取得了很大的发展^[1-3]。它包括随机介质的矢量辐

* 遥感理论模式的研究得到国家自然科学基金会和霍英东教育基金会的资助。

射传输理论^[4], 波的解析理论^[2,5], 随机粗糙面散射理论^[4], 以及在大气云和降水、地表植被、森林、冰雪、海冰、海洋等主被动遥感中的应用。然而, 随着遥感技术的发展, 要更为精细地模拟自然界中遥感对象及其环境, 完善理论方法, 按特定的遥感手段和要求, 采用准确的物理参数, 并以有效可行的数值计算方法, 给出定量的数值结果。在这些方面, 还有大量的工作要做。本文简要地评论现有的遥感理论模式的进展, 并提出今后进一步研究理论模式及其数值方法的几个问题。

二、理论模式的进展和问题

1. 矢量辐射传输理论

矢量辐射传输理论是讨论极化电磁波的辐射强度, 即 Stokes 矢量在随机介质中散射传输的理论。从能量守恒出发, 考虑强度的迭加, 可以得到矢量辐射传输方程 (VRT):

$$\cos\theta \frac{d\bar{I}(\theta, \varphi, z)}{dz} = -\bar{K}_e(\theta, \varphi) \cdot \bar{I}(\theta, \varphi, z) + \bar{Q}(\theta, \varphi, z) + \int d\Omega' \bar{P}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \cdot \bar{I}(\theta', \varphi', z) \quad (1)$$

其中 \bar{K}_e 为消光矩阵, \bar{P} 为多次散射的相矩阵, \bar{Q} 为该随机介质中的辐射源。对于有大小分布的球形 (Mie 或 Rayleigh) 粒子随机介质, 可用离散坐标—特征值方法, 迭代法、不变嵌入法等求解 VRT 方程 (1) 和相应的边界条件。这些方法已广泛地应用于一层或多层的大气云和降雨的主被动遥感中。

在 VRT 方程的推导中, 采用了散射独立的假定, 即各散射粒子的散射是不相干的。因此在应用 VRT 方程到密集分布的散射粒子介质 (其体积占空比大于 10%) 时, 比如冰雪, 多孔岩石和土壤等, 独立散射的假定不能成立, VRT 方程必须予以修正。从波的解析理论出发, 对散射场的一阶矩 $\langle \bar{E}_i \rangle$ 的 Dyson 方程作非线性近似, 二阶矩 $\langle \bar{E}_i \bar{E}_i^* \rangle$ 的 Bethe-Salpeter 方程作梯形近似, 可以推导得到修正的密集粒子的矢量辐射传输方程 (DVRT)^[6,7]。在准晶体近似下, 并利用散射粒子随机分布的成对分布函数, 可以解析地计算密集散射粒子介质中波的有效传播常数, 它包括了粒子散射相干的作用。冰雪可以看成是在空气背景中密集分布的冰球粒子, DVRT 方程已成功地应用于冰雪的主被动遥感。但是, 当粒子大小与波长可以相比时, 如 Mie 粒子, 散射的相干性以及相应的 DVRT 方程还没有推导。

在应用 VRT 方程讨论植被模型时, 往往采用连续随机介质的模型。从遥感器看来, 电磁散射是由于介质随机的介电起伏。介电起伏的相关函数描述了随机介质的散射特性, 用以计算 VRT 方程中的散射吸收和消光系数, 以及多次散射的相矩阵。VRT 方程已应用于复杂的多层植被模式中, 用离散坐标—特征值解法得到数值解^[8]。对于介电常数强起伏的连续随机介质的 VRT 理论也已进行了研究^[9]。但是, 由于相关函数及其相关长度是一个比较抽象的统计学概念, 不象离散粒子的大小、形状等来得明确直观。虽然由冰雪的剖面可以计算相关函数, 在理论上还可以推导球形粒子的大小与相关长度的定量关系, 但是对于植被的相关函数的确定就比较困难。因此在植被遥感中, 特别是成像

雷达全极化测量的模式研究中,讨论得更多的是离散粒子的模型。植被中的果实、叶、茎、秆等可模拟成椭球、盘状、针状、柱状等的散射体,它们可以有大小和空间取向的分布。对于这些非球形粒子,可由 Rayleigh 近似或 Rayleigh-Gans 近似,来计算散射和消光矩阵,以及多次散射的相矩阵。对于非均匀取向的非球形粒子,消光矩阵是一个 4×4 的非对角化的矩阵,目前还没有有效的方法求解包括所有高阶散射的 VRT 方程。在频率不高的条件下;用迭代法可求解 VRT 方程的一阶和二阶解,即是 Muller 矩阵法^[4]。具有非均匀取向不同成份的非球形粒子的多层模式,及其在植被森林的全极化后向散射测量中的应用的工作也正在进行^[10]。在较高的频率,要计入高阶散射的贡献,如何求解非球形粒子的 VRT 方程将是十分有意义的。

合成孔径成像雷达(SAR)后向散射的全极化测量是主动遥感中最重要的课题之一^[11]。全极化测量指的是能够确定所有各种发射和接收极化的后向散射技术。它与以往的散射测量不同在于后者往往指的是某一特定的极化状态。在 90 年代,美国的 SIR-C,欧洲的 ERS-1,日本的 J-ERS-1,加拿大的 RADARSAT 等都有 SAR 遥感计划。电磁散射的极化对于非球形粒子的大小形状和空间取向分布相当敏感,全极化测量对遥感参数的反演起着重要的作用。因此,发展 SAR 全极化测量的 4 个 Stokes 数的 VRT 理论是极为重要的。用高速计算机进行 Monte Carlo 方法的仿真计算,以及电磁散射中有限元和矩量法也都是值得研究的。

近来,在毫米波段上的发展令人注目。美国的密执根大学近来成立了 NASA Tera-hertz 研究中心,进行 100 GHz 以上遥感的科研工作。毫米波段上电磁波与物质相互作用的理论研究还很少见,^[12]应趁早开展这一领域的研究。

在发展更为精细的复合性(多层、多种散射成份、粗糙界面等)理论模式的同时,要进行能予以控制的能够重复的多频段多视角多极化的实验工作。要准确地测定植被各组成成份的介电常数,使得理论模式的参数选取有一致的规范。同时使理论模式的有关参数(如粒子大小,介电常数等等)与植被本身的生物物理特性(如总叶面覆盖指数、含水量变化等)准确地对应起来。此外,各向异性随机介质的 VRT 方程,用空间取向分布描述叶面弯曲,地表遥感的参数反演技术等等,都还有大量的工作要做。

2. 波的解析理论

波的解析理论从基本的 Maxwell 方程出发,推导得到场的一阶矩 Dyson 方程:

$$\langle \bar{E}(\vec{r}) \rangle = \bar{E}_0(\vec{r}) + \int_V d\vec{r}' \bar{G}_m(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \langle \bar{Q}(\vec{r}') \bar{E}(\vec{r}') \rangle \quad (2)$$

其中 $\langle \bar{E}(\vec{r}) \rangle$ 为总场的系综平均, \bar{E}_0 为人射场, \bar{G}_m 为随机介质的平均并矢格林函数, $\langle \bar{Q}(\vec{r}') \cdot \bar{E}(\vec{r}') \rangle$ 为随机介质 V 内的散射源。在 Born 近似下, $\bar{E}(\vec{r}') \approx \bar{E}_0(\vec{r}')$, 可得到单次散射的一阶矩 $\langle \bar{E}_s^{(1)}(\vec{r}) \rangle = \langle \bar{E}^{(1)}(\vec{r}) \rangle - \bar{E}_0$, 如此等等。利用广义的 Born 近似,可得到散射强度 $\langle |\bar{E}_s^{(1)}(\vec{r})|^2 \rangle$ 。由此可以计算双站和后向散射系数。并由互易性定理,计算热发射率。对于介电强起伏的随机介质,应考虑平均并矢格林函数的奇异性。波的解析理论和广义的 Born 近似已应用到植被冰雪的主动遥感问题中。但是,由于(2)式的积分方程形式,无法在数值上计入所有高阶散射。因此只能用于计算较低频率的双站和后向

散射系数。由于波的解析理论是从基本的 Maxwell 方程出发,它能考虑场的相干性,能解释由于场的相干作用而得到的后向散射的增强现象,它也是推导 VRT 方程,单个粒子散射,以及粗糙面散射的基础。因此,进一步研究波的解析理论,并应用于遥感理论模式中一些基本的理论问题,是十分重要的。

3. 随机粗糙面的散射

土壤的界面,风驱动的海面等都是随机的粗糙面。电磁波在随机粗糙面上的散射在近 20 年中得到了广泛的研究。在遥感领域内,大致有三种方法:(1) 基尔霍夫近似和稳相法;(2) 微扰法;(3) 双尺度法^[13]。这些方法已应用于土壤和海面的理论模式中。由惠更斯原理,散射场可由表面场给出,即为:

$$\bar{E}_s(\bar{r}) = \int_S d\bar{r}'_1 [i\omega\mu_0\bar{G}(\bar{r},\bar{r}') \cdot \hat{n} \times \bar{H}(\bar{r}') + \nabla \times \bar{G}(\bar{r},\bar{r}') \cdot \hat{n} \times \bar{E}(\bar{r}')] \quad (3)$$

其中 $\bar{E}_s(\bar{r})$ 为 \bar{r} 处观察到的散射场, $\bar{E}(\bar{r}')$, $\bar{H}(\bar{r}')$ 为表面上 \bar{r}' 处的感应场, \bar{G} 为并矢格林函数, \hat{n} 为 \bar{r}' 处表面法向矢量。当粗糙面随机起伏的尺度比较大,远大于波长,粗糙面上每一点处的曲面可用该局部处小切平面取代,由此计算小切平面上的 $\bar{E}(\bar{r}')$ 和 $\bar{H}(\bar{r}')$ 。这就是基尔霍夫近似。并进而在高频近似下,采用稳相法(即积分的主要贡献来自于稳相点)和给定随机粗糙面高度起伏的高斯分布相关函数,得到双站和后向散射系数。这一方法特别适用于小角度入射。微扰法是假定随机的高度起伏 ξ 与波长相比是一个小量,即 $k\xi \ll 1$ 。将 $k\xi$ 作为微扰量展开表面场和已知的人射场,由广义的边界条件求得散射场的零阶解(镜面反射)和一阶解。在大角度入射时,微扰给出的贡献是显著的。若粗糙面具有大小不同尺度的起伏,则可应用双尺度法,将小尺度的微扰迭加在大尺度起伏上。散射场为这二种尺度独立贡献之和。这几种方法数值求解简单,已有广泛的应用。但是,其中理论推导中的假定,有限的适用范围,以及与实验比较,都有不满意的地方,还未能圆满解释遥感信号。近年来,有介于基尔霍夫近似和微扰法二者之间的相位微扰法(仅限于二维),还有随机付利叶变换法, Wiener-Hermite 展开法,全波法,积分方程法等等,但是这些方法大都是形式上的解析理论,还不能在数值上求解。同时工作的难点还在于粗糙面本身的统计特征的描述和准确的测量都远远不够。由于计算机技术的发展,用计算机计算仿真随机粗糙面测量,是十分有意义的工作。但是计算机仿真三维的随机粗糙面,将是十分困难的。或许我们不必需要一个适用各频段各种粗糙面统计特征(高斯的和非高斯的)精确的粗糙面散射理论(它必定是复杂的),但是要有明确的适用范围,包括了遥感对象和环境的主要特征,与实验拟合很好的解析理论和数值方法。因此,寻找解析理论的近似方法,并发展有效可行的数值计算方法,是随机粗糙面散射理论有待于发展的工作。

粗糙面散射的一个重要应用就是风驱动海面的散射,和风场反演。海面的随机起伏常常是倾斜的起伏面,而不是高斯分布,气海之间界面的湍动区域,破碎浪引起的浪花和白帽,会对热发射率和散射有显著的影响。而所有这些都未放到理论模式中去。未来的模式中一定要包括多层和多次散射的理论。同时,在现有理论模式的基础上,发展风场反演的方法,也是一项极为重要的工作。

随机粗糙面的理论模式应用于 SAR 遥感成像全极化测量是十分迫切的工作。此外,物理学中热门的分形理论,孤立波、混沌理论等,都有可能在遥感理论模式中具有有意义的应用。

三、结 论

本文综述了遥感理论模式的基本理论:离散散射粒子和连续随机介质的矢量辐射传输理论、波的解析理论,随机粗糙面散射理论,以及在大气、地表(土壤、植被、森林、冰雪等)和海洋的主被动遥感中的应用和进展。提出今后发展更为精细的理论模式和数值方法的一些方向性问题。电磁波与遥感对象和环境相互作用的机制,遥感理论模式,以及定量的数值方法,使我们能深入地理解遥感给我们带来的全面的丰富的信息,对于遥感数据的解释和应用,遥感参数的反演等等都具有十分重要的作用。我国人口众多幅员辽阔,必须在自立的基础上发展科学技术和科学理论。这对于应用科学的基础理论尤应如此。这需要我们今后进一步的艰苦工作、形成雄厚的学术繁荣的高水平科技队伍。

参 考 文 献

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing*, 3 volumes, Arttech, MA, 1986.
- [2] L. Tsang, J. A. Kong, and R. Shin, *Theory of Microwave Remote Sensing*, Wiley-Interscience, NY, 1985.
- [3] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, Academic Press, NY, 1978.
- [4] 曾亮,金亚秋,随机介质中的矢量辐射传输理论,物理学进展,10(1),p. 57—99,1990.
- [5] M. Zuniga and J. A. Kong, Active remote sensing of random media, *J. of Appli. Phys.*, Vol. 51, p. 74—79, 1980.
- [6] L. Tsang and A. Ishimaru, Radiative wave equation for vector EM propagation in dense nontenious media, *I. of electromagnetic waves & Applications*, 1(1), p. 59—72, 1987.
- [7] Y. Q. Jin, Some results from radiative wave equation for a slab of densely distributed, random scatterers, *J. of Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 39(2), p. 88—98, 1988.
- [8] 韦剑,金亚秋,植被森林多层耦合模式的热辐射的散射和传输,电波科学学报,5(4),p.1—11,1990.
- [9] 金亚秋,强起伏连续随机介质的辐射传输理论,中国科学,第5期,p.535—544,1990年.
- [10] Y. Q. Jin and L. Tsang, Complete polarimetric scattering from a multilayer forestry model of nonuniformly-oriented heterogeneous nonspherical scatterers, *Proceedings of IGARSS'91* Vol. 1, p. 23—26, Helsinki, Finland, June 3—6, 1991.
- [11] D. L. Evans, et al., Radar polarimetry: analitical tool and application, *IEEE Trans on Geosci. Rem. Sens.*, 26(6), p. 774—789, 1988.
- [12] F. T. Ulaby and T. F. Haddock, 140 GHz Scatterometer System and Measurements of Terrain, *IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens.*, 28(4), p. 492—499, 1990.
- [13] S. T. Wu and A. K. Fung, A noncoherent model for microwave emission and backscattering from sea surface, *J. of Geophy. Res.*, Vol. 77, p. 5917, 1972.

On Several Topics in the Theoretical Modeling of Remote Sensing

Jin Yaqiu

(Department of Electronic Engineering Fudan University, Shanghai)

Abstract

The progress in theoretical modeling of microwave remote sensing in recent years is briefly reviewed in this paper. As the models for the objects of remote sensing the theories and numerical approaches of electromagnetic scattering and thermal emission of random discrete scatterers, continuous random media, and randomly rough surface are discussed. The applications in both active and passive remote sensing of the earth terrain, vegetation canopy, soil, snow and ice, atmospheric cloud and rain, sea ice, and sea surface driven by wind, etc. are also introduced. With the future development of the remote sensing technology, further efforts to develop more accurate models and quantitative mathematical physical approaches for remote sensing of the nature, and to develop numerical data analysis and parameter retrieval must be done. Some comments on the research progress in theoretical modeling of remote sensing are discussed, and several interesting and important topics for future research are pointed out.

Key words quantitative remote sensing theoretical modeling research topics in the future