

遥感物理讲座

第四讲 微波遥感器

徐希孺

(北京大学遥感技术应用研究所)

一、微波遥感的基本特点

微波遥感是指运用的波长介于 1mm—1m (0.3—300GHz) 的电磁波段获取地球表面资源信息的遥感手段。由于综合孔径侧视雷达概念的提出和这类雷达的研制成功,使雷达的空间分辨率有了极大地提高。侧视雷达图象已经能够提供许多地貌特征,如地质上的断层、水系特征、水域范围、雪盖、城市和沙漠等,因此微波图象已具有资源应用的价值。从六十年代开始,微波遥感获得迅速的发展,现已成为遥感事业中一个很有发展前途的分支。据统计 1962 年以来,装载有各类微波遥感器的人造卫星共有十六个。例如在海洋卫星 A 中,除一台遥感器为海岸带彩色扫描仪之外,其余的遥感器均为微波遥感器,其中包括 L 波段综合孔径侧视雷达一台、雷达散射计、雷达高度计和 SMMR 微波辐射仪等,自从美国发射航天飞机以来,哥伦比亚号及挑战者号多次携带综合孔径侧视雷达进入空间轨道,获得了大量的地面和海洋的雷达图象及微波信息特征。航天飞机所摄取的山区侧视雷达图象,不同岩性、断层及山间河流城镇轮廓清晰。微波遥感的应用潜力在国际上已被广泛地承认。

微波遥感的应用潜力是基于微波波段本身独具的优点。这主要是:微波波段穿透大气、云、雨的性能比可见光、红外波段好得多,即微波遥感具有全天候特征;微波对地表层具有一定的穿透能力;地物的微波比辐射率的差异比

物理

红外波段大。

对晴空大气微波的贯穿能力主要决定于大气中氧气和水汽的共振吸收,在微波范围内氧气和水汽各具有两个共振吸收频率范围。氧气在 50—70GHz 内共有 39 根共振线,但在海平面高度上由于吸收共振线的压力加宽,39 根共振线合并为中心频率为 60GHz 的一个带。第二个共振吸收频率为 118.75GHz。水汽的两个共振吸收线分别为 22.235GHz 和 183.31GHz。总的来说波长大于 3cm 的微波可以不考虑大气吸收的影响。波长小于 3cm 的波段存在着三个主要的大气窗口,它们的中心频率分别为 35GHz (波长相当于 8mm)、90GHz 和 135GHz,其中以 8mm 窗口用得比较多。晴空大气微波穿透能力随波长的变化见图 1。

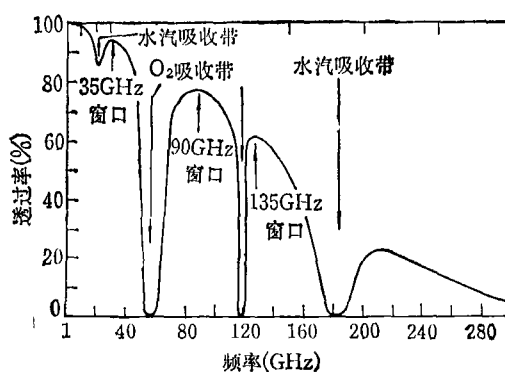


图 1 大气微波透过率与频率的关系

众所周知,云、雨已成为运用可见光及红外波段进行资源遥感的主要障碍,平均说来中纬

度地区云量小于10%的时间只在全年中占30%左右,而许多低纬度地区终年为云层所覆盖,微波贯穿云、雨层的能力取决于云的组成成分,云滴或雨滴大小,含水量高低,云厚和微波波长等条件。对于冰晶构成的高层云,它对微波的影响可以忽略不计。平均说来波长大于3cm的微波对水滴云层的透过率大于85%。因此,云对波长大于5cm的微波的影响可以忽略。

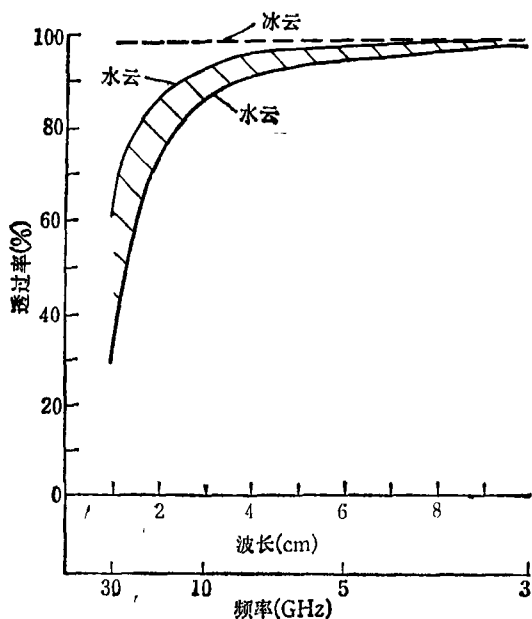


图2 微波对云层的透过率与波长的关系

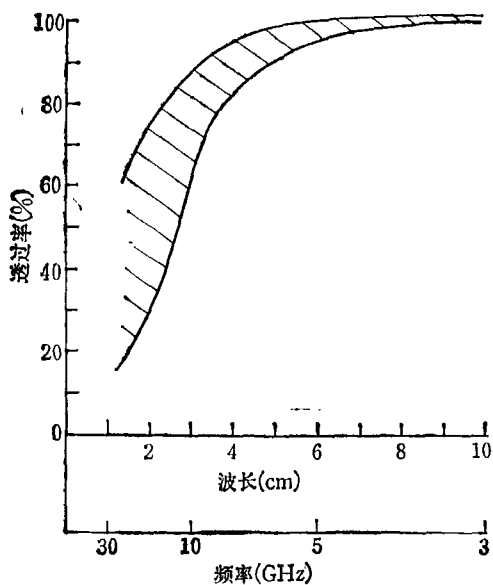


图3 微波对雨层的透过率与波长的关系

对于雨区,波长大于5cm的微波其透过率大于85%,所以波长大于10cm的微波具有相当好的穿透雨层的能力。微波贯穿云雨的能力见图2和图3。

微波遥感的全天候性能在自然灾害的紧急监测中有着极其重要的意义,例如六十年代以来,美国多次用侧视雷达监视密西西比河的洪水泛滥,预报洪峰位置,监视泛滥区域,指导救援工作。此时相比之下,其他遥感手段已失灵。因为洪水爆发往往与暴雨关系密切,云层的阻挡使其他波段的遥感器收不到地面的信息。

可见光及红外波段被下垫面所反射或散射,这一过程只发生在表面层,但是微波却具有一定的穿透能力,穿透的深度由下垫面的介电特性、微波波长等因素决定。例如干沙或干雪层,由于它们介电常数的实部与虚部都比较小,所以微波可以穿透的深度为波长的20—50倍。这种对下垫面的穿透能力在资源遥感上是十分有用的。

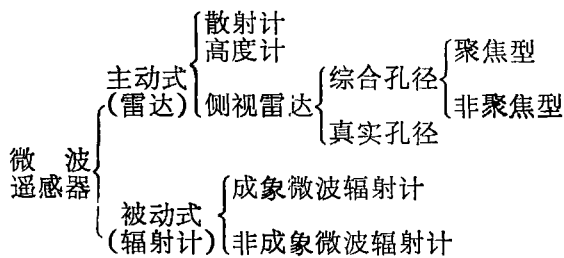
土壤含水量的不同会引起可见光波段的反射率的变化和反射光的偏振度的变化,亦可引起红外波段比辐射率的变化和热惯量的变化,因此,可见光和红外波段均可以用来测定土壤湿度。然而,无论是可见光还是红外波段,它们都只反映土壤极表层的湿度情况。由于其他种种原因,表层土壤含水量与深层土壤含水量之间关系复杂,因而影响可见光和红外波段的实用价值。但微波与它们不同,微波发射率或微波散射截面与土壤湿度之间的关系,由于微波具有一定的穿透性能而具有实用意义。土壤表面的植被覆盖将严重影响可见光和红外波段对土壤湿度的测定。如果植被层不十分浓密,微波可以贯穿。表层植被层只是附加了一个散射量,因此只需稍加修正,原有关系仍然成立。

事实表明,航天飞机侧视雷达图象对寻找沙漠、干旱、半干旱地区的地下水源和古河道等具有特殊的本领。这是因为水和干沙等物之间的介电常数差别很大,微波对于干沙层具有极好的透射性能,而水面对微波又有强烈的反射,因此在具有在地下水源的沙漠、干旱和半干旱

地区,在其表层之下,存在一个由含水层引起的强烈的微波反射层,这会极大地增加微波的反射信号强度,如用微波辐射计去测量上述目标物的亮度温度,那么地下含水层的存在将使亮度温度明显下降,因此,在有地下水源和没有地下水源的沙漠、干旱和半干旱地区,其微波特性将有很大的差别。

二、微波遥感器

测定在空间传播的微波信号的仪器称为微波遥感器。微波遥感器可以分为主动式和被动式两大类。主动式的空间分辨率比较高,图象细节清楚,但成本高,信息处理复杂,被动式的则空间分辨率低,但成本低廉,亮度温度的分辨率极高,适于隐蔽。目前常用的几种微波遥感器有



雷达的空间分辨率原则上受天线尺寸的限制,就常用的微波天线而论,它的主瓣半宽度 β 与天线口径尺寸 D 以及雷达波长之间的关系为

$$\beta = K \cdot \frac{\lambda}{D}, \quad (1)$$

其中 K 为比例因子,由微波天线的几何形状和结构等因素决定。由(1)式可知,要提高空间分辨率(即降低 β 值),必须增大 D ,并使用更短波长的雷达。例如,设光学仪器的口径为5cm,波长为 $0.5\mu\text{m}$,则它的波长与口径尺寸之比为 10^{-8} ,如用波长为3cm的雷达,只有当天线口径达到 $3 \times 10^6\text{m}$ 时才有可能获得与光学仪器相近的分辨率。显然这样巨大的天线是不可思议的。所以长期以来,微波雷达的分辨率低成为雷达图象能否应用到资源遥感上的主要障碍。五十年代提出了综合孔径天线的概念并付之实践,使雷达图象的分辨率得到大的提高。

我们可以从相干原理去讨论综合孔径天线的概念并推导它的分辨率公式。衍射光栅利用分波前的办法使透过光栅缝隙的各束光波之间产生相干,以达到使波束变窄、提高分辨率的目的。射电天文学家将这一原理直接应用到射电天文望远镜上,产生了所谓的线阵天线,见图4。

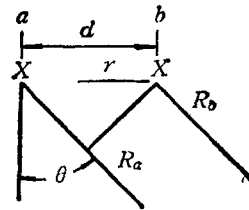


图4 综合孔径天线两个相邻元之间的相位关系

由于星体离地球很远,从星体发出的电磁波可视为平面波(平行光),将各基元天线接收到的发自同一星体的电磁波信号进行相干叠加,相邻两基元天线的相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \sin\theta. \quad (2)$$

到达第 n 个基元天线上的电场强度为

$$E_n = E_0 e^{i(\omega_0 t + n\Delta\phi)} \quad (3)$$

设共有 N 个基元天线组成一个线阵天线,相干叠加后的总电场强度为

$$E = E_0 e^{i\omega_0 t} \cdot \sum_{-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} e^{in\Delta\phi} = E_0 e^{i\omega_0 t} \frac{\sin N \frac{\Delta\phi}{2}}{\sin \frac{\Delta\phi}{2}}. \quad (4)$$

所以线阵天线的功率方向特性受到

$$\frac{\sin^2 \left(N \frac{\Delta\phi}{2} \right)}{\sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)}$$

的限制,我们称它为“阵因子”。它的半角宽度为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd}. \quad (5)$$

用于遥感的综合孔径侧视雷达是由空间向地面观测,因此不可能在空间形成一个由一系列的基元天线所组成的线阵天线,它只可能将

一个基元天线装载于飞行器上。令飞行器作等速直线运动，基元天线在一些等距离的位置上发射信号，同时接收回波信号。如果能保证在不同位置上发射和接收的信号之间仍保持良好的相干性，那么仍可以对记录的信号(包括振幅和位相)进行相干叠加。必须指出，综合孔径天线与线阵天线间仍有显著的差别，其一是线阵天线中各基元天线间的相位差是由单程引起的，而侧视雷达综合孔径天线中是由双程引起的，其二是对综合孔径侧视雷达平面电磁波已不适用，必须用球面波模型代替，相应地在信号处理方法上可分为聚焦型与非聚焦型两种。

如设基元天线的主瓣半宽度为 β ，对于正侧视方向斜距为 R_0 的目标物 T 第一次包含有 T 目标物信息的位置为 A，最后一次包含有 T 目标物信息的位置为 C。如以 d 表示相邻两次信号间的空间水平距离，那么包含有 T 目标物信息的实际综合孔径长度应为 Nd ，用 L_p 表示(见图 5)，则

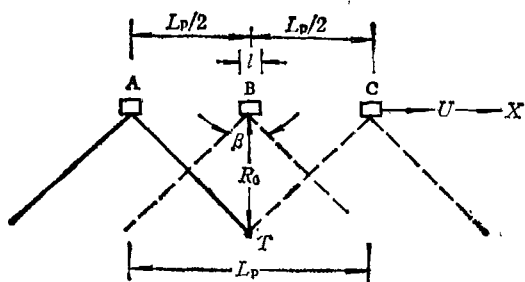


图 5 天线照明宽度与目标间的几何关系

$$L_p = Nd = \beta R_0 = \frac{\lambda}{D} \cdot R_0. \quad (6)$$

考虑到侧视雷达各信号间的位相差是由双程引起的，那么半角宽度应为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2L_p}. \quad (7)$$

所以，斜距为 R_0 处的距离分辨率应为

$$\delta_1 = \Delta\theta \cdot R_0 = \frac{1}{2} D. \quad (8)$$

因此综合孔径侧视雷达的方位分辨率原则上与距离 R_0 无关，且等于天线口径尺寸之半。

真实孔径侧视雷达要获得高分辨率须用大

口径天线和短波长，但综合孔径侧视雷达却相反，高分辨率要求小尺寸口径的天线，这是因为天线口径越小， β 越大，综合孔径的实际尺寸 L_p 就越大。

由于在资源探测中目标与天线间的距离总是有限的，因此必须采用球面波模式。平面波模式与它的差别如图 6 所示。

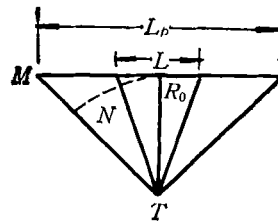


图 6 球面波与平面波模型间的相位差

如用平面波模式去代替球面波模式，实际上就是忽略了 MN 所引起的附加相位差。考虑到双程 MN ，所引起的相位差值应为

$$2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot MN = 2 \cdot \frac{\pi L_p}{\lambda R_0}. \quad (9)$$

所谓综合孔径聚焦型就是在进行信号相干叠加之前先进行附加相位差的补偿，反之，如不进行附加相位修正就直接进行相干叠加，则称为非聚焦型。实际上非聚焦时的 L_p 必须受到限制。如果边缘信号与中心信号的附加相位差大于 $\pi/4$ ，那么这些边缘信号不仅对信号的综合无益反而有害。因此中心与边缘附加相位差必须小于 $\pi/4$ 。考虑到双程的影响，则有

$$\left(R_0 + \frac{\lambda}{8}\right)^2 = \frac{L_p^2}{4} + R_0^2, \quad (10)$$

$$L_p = \sqrt{R_0 \lambda}, \quad (11)$$

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{L_p} \cdot R_0 = \frac{1}{2} \sqrt{R_0 \lambda}. \quad (12)$$

综上所述，可知不同侧视雷达的方位分辨率 δ_1 分别为：

对真实孔径侧视雷达，

$$\delta_1 = \frac{\lambda}{D} \cdot R_0. \quad (13)$$

对综合孔径非聚焦型侧视雷达，

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \sqrt{R_0 \lambda}. \quad (14)$$

对综合孔径聚焦型侧视雷达,

$$\delta_1 = \frac{1}{2} D. \quad (15)$$

装在海洋卫星 A 上的 L 波段综合孔径侧视雷达,其地面分辨率为 25m,航天飞机侧视雷达的地面分辨率约为 15m. 目前装在陆地卫星 5 上的专题制图仪 TM, 它的可见光波段地面分辨率为 30m, 虽然这可以说明目前先进的侧视雷达已有相当高的地面分辨率, 但这并不意味着实际侧视雷达图象比 TM 图象的细节还要分明. 这是因为侧视雷达是相干信号经相干处理以后成象的, 图象上带有周期性的相干亮斑点. 要消除这些相干处理的有害后效只有采用平均和多次重叠取样等方法. 它们将降低实际侧视雷达图象的象元尺度.

微波辐射计是一种测定目标物微波热噪声信号的仪器. 就目前技术水平来说, 微波辐射计的灵敏度达到分辨 1K 的温度差是不困难的, 但是微波辐射计的空间分辨率是相当低的. 因为原则上说它只能靠增加天线尺寸或使用短波长来提高它的空间分辨率. 例如, 装在卫星上的多波段扫描微波辐射计, 其不同波段的地面分辨率可在几十公里到百公里之间. 很高的亮度温度分辨率和很低的空间分辨率是微波辐射计的主要特点. 那么为什么微波辐射计具有较高的温度分辨率, 它与哪些因素有关?

微波辐射计的对象是目标物的自身热辐射, 所以被测信号本身无论在幅度上还是在相位上均具有随机性质, 辐射计本身当然无法跟随热噪声的快速随机变化, 它所测量的只能是一种平均值.

对于随机过程本身可以计算它的固有平均值和均方根值等. 均方根值描述了瞬时信号电平在平均值周围涨落的幅度. 如果采用平方检波律检波, 即输出信号电平正比于实际检测信号的功率, 那么随机分析证明信号的均方根值恰好等于平均值. 这就意味着亮度温度为 100K 的物体, 瞬时信号在平均信号周围的涨落范围也是 100K, 显然这样的测量精度是不高的. 解决这个问题的办法就是取平均, 也就是

让输出信号经过一个积分器, 只要适当选取积分器的积分时间便可获得所期望的精确的输出信号.

已经证明对于一个频带宽为 B 、积分时间为 T 的积分器, 均方根值 σ 与平均输入功率 P 有如下关系:

$$\sigma^2 = \frac{P}{BT}. \quad (16)$$

对于实际的微波辐射计, 它的平均输入功率 P 应包括两部分: 目标的微波热辐射功率和本机热噪声功率. 如用亮度温度的概念来表达辐射功率, 则

$$\Delta T_b = \frac{T_{AT} + T_{sys}}{\sqrt{BT}}, \quad (17)$$

其中 ΔT_b 为微波辐射计可测的最小亮度温度差值, T_{AT} 为用天线温度概念表达的目标热辐射功率. T_{sys} 为用亮度温度概念表达的等效本机热噪声功率. 就地球资源目标而论, $T_{AT} \sim 300K$ 具有广泛的代表性, 而 T_{sys} 可达 1000K, 甚至高达 20,000K, 实际上本机噪声温度远远大于信号热噪声温度. 为了从大噪声信号中提取我们所需的小目标信号, 人们发展了“零平衡式”微波辐射计. 为了降低微波辐射计增益变动所带来的影响, 人们又增加了自动增益控制线路等.

增加积分时间固然可以提高微波辐射计的灵敏度, 但积分时间本身会受到其他因素的限制. 考虑了有关因素后, 可以得到如下结论:

(1) 增加积分时间固然可以提高微波辐射计的测量精度, 但这要以损失它的跟随能力为代价.

(2) 实际测量中微波辐射计的精确度不会受到飞行参数等其他因素的限制, 决不能孤立地考虑精确度问题.

由于微波辐射计的主要特征是空间分辨率低和辐射分辨率高, 它在机载遥感方面主要用于海面油膜污染的监测, 海面盐度的测量, 海冰等环境要素的监测和陆地的土壤湿度遥感. 因为飞机的飞行高度低可以补偿它空间分辨率低的弱点. 它在海岸油膜污染监测方面不仅可以

测出范围,而且可以比其他方法更精确地测出油膜厚度.盐度分布的测量目前仅能依靠微波辐射计进行,在海冰监测中可以区分出不同性质冰层的范围和厚度,监视冰山的移动,保证高纬度海洋上的航行安全.由于星载微波辐射计的空间分辨率低,因而只能作一些大尺度问题的研究.在气象方面,可用它测定大气温度层结、湿度分布、大气降水量和总水汽含量等.在资源遥感方面可用它测南极洲的冰雪累积率和

北极冰的范围及其变动,还可测定海面温度等.总之,微波遥感器在环境遥感方面的应用前景是很广阔的.

参 考 文 献

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Addison-Wosley Publishing Company, Inc, (1981).
- [2] 杨士中,合成孔径雷达,国防工业出版社,(1981).
- [3] 赵柏林等,中国科学(A辑),3(1983),283.
- [4] 徐希孺,地理学报, 39(1984),194.

(上接第57页)

关于此书,我国物理学史界早有评价.这本书的出版对我国知识界曾有重大影响,译名出现后很快为我国学术界所接受,1904年京师同文馆出版丁韪良编著的《物理学算法》,1905年上海山西大学译学院出版(日)西师意编译的《物理学教科书》.大约同一时期还出版一部线装的《物理学初步》也是译自东邻日本^[16].1902年京师大学堂在格致科下设物理学课目,1912年改格致科为理科,下设物理门.同年金陵大学设物理系.1918年商务印书馆出版的《物理学》^[17],是第一本由中国人编写的,名为《物理学》的著作.

参 考 文 献

- [1] *Colliers Encyclopedia*, Vol. 19, New York, (1980), 1.
- [2] (美) 乔治·伽莫夫, 物理学发展史, 商务印书馆,

- (1981), 1.
- [3] 亚里士多德,物理学,商务印书馆,(1982), 9—10.
- [4] (明)王征: 远西奇器图说,守山阁丛书本,(1843)
- [5] 周昌寿,张菊生先生七十生日纪念论文集,商务印书馆,(1937),434.
- [6] (英)艾约瑟译,(清)李善兰笔述,重学,刻本,(1866).
- [7] (英)马格纳斐立原著,(清)严文炳初译,常福元重订,力学课编,学部编译图书局,(1906).
- [8] 通学斋丛书,第五函第42册.
- [9] 戴念祖,力学与实践, No. 1 (1980),77.
- [10] 日本物理学会,日本の物理学史·上,东海大学出版会,(1978),54,78,81,60,78.
- [11] (日)汤浅光朝,科学文化史年表,科普出版社,(1984), 186.
- [12] (日)八木江里,日本最初の物理学者たち,载辻哲夫編集《物理学史研究》,东海大学出版会,(1976),125.
- [13] (日)板仓圣宣,科学史研究, 43(1957), 15.
- [14] (日)中村久四郎,史学杂志, 25(1915),1604.
- [15] (日)桑木或雄,科学史考,河出书房,(1944), 483—484.
- [16] (日)后藤牧太著,(清)张文阁译,物理学初步,学务处排印局校印.
- [17] 陈规,物理学,商务印书馆,(1918).

1987年第2期《物理》内容预告

弱相互作用中宇称不守恒效应的实验测定(梅镇岳);金属硅化物(许振嘉);拓广不可逆热力学简介(李述华);低温等离子体及其在材料表面改性中的应用(胡建芳等);小电流下降与等离子体刻蚀工艺(俞诚);红外探测器窗口和光学镜头镀膜技术(李忠奇);固体

中低吸收损耗的测量(周良智);确定原子、分子激发态寿命的方法(刘汉朋等);用单板机控制的铁磁性测量仪(徐淑馨等);脉冲强磁场用于金属成形的初步试验(叶茂福等);遥感图象的相干光处理(陈怀琳);图象分类(刘政凯)。