

综合孔径微波辐射计顺轨方向亮温反演算法的研究

黄永辉, 吴 季, 董晓龙

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 8701 信箱, 北京 100080)

摘 要: 本文利用卷积理论对综合孔径微波辐射计在顺轨方向的孔径综合进行了理论分析, 给出了在一定条件下的基线设计, 并且分别利用矩量法和基于 Backus-Gilbert 理论的线性算法两种数值方法进行了顺轨方向地物亮温的反演. 数值模拟结果表明, 在顺轨方向有效稀疏天线阵设计的基础上, 亮温反演达到了很高的精度.

关键词: 微波辐射计; 综合孔径; 反演算法

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-0108-03

Brightness Temperature Reconstruction in the Along-track Direction of a Synthetic Aperture Microwave Radiometer

HUANG Yong-hui, WU Ji, DONG Xiao-long

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 8701, Beijing 100080, China)

Abstract: The theoretical analysis of aperture synthesis in the along-track direction of a synthetic aperture radiometer is presented under the theory of convolution. The baseline design is accomplished according to a spatial frequency domain analysis. The brightness temperature of the earth in the along-track direction is reconstructed by two numerical approaches, i. e. the method of moment and the linear algorithm based on the Backus-Gilbert theory. Numerical simulated test cases show that the reconstruction of the brightness temperature agrees well with the original on the base that the antenna array is effectively thinned in the along-track direction.

Key words: microwave radiometer; synthetic aperture; reconstruction algorithm

1 引言

微波遥感与可见光和红外遥感相比, 具有全天时、全天候、对地具有一定穿透能力的特点, 并能进行极化和相干接收. 其中直接接收地物电磁辐射的无源微波遥感器(微波辐射计)与以高度计、散射计、合成孔径雷达为代表的有源微波遥感器相比, 具有功耗低、重量轻、体积小特点, 特别适合于星载. 然而, 微波辐射计空间分辨率低的弱点却严重的限制了其应用范围. 提高其空间分辨率的唯一办法是增大接收天线的物理口径, 而为了星载应用, 必须突破传统的天线设计理论. 射电天文学中的综合孔径技术^[1]可以有效稀疏阵列天线的口面, 如将其应用于微波辐射计, 有望为星载高分辨率微波辐射计技术带来一次革命性的突破. 80 年代末 90 年代初以来, NASA 的 JPL 实验室和 Massachusetts 州立大学 (Umass) 做了大量的交轨方向 (Cross-Track) 综合孔径辐射计的研究和实验工作^[2,3]. 但由于采用的只是口径方向可见度函数的频域采样技术和波束电扫描技术的结合, 仍需要较多的天线单元和和相关器, 对于星载应用, 特别是对于二维成像, 很难达到实用要求, 因而必须寻求新的技术上的突破. 1990 年 K. Komiyama 提出超综合孔径辐射计 (Supersynthesis Radiometers) 的概念^[4],

利用二元干涉仪输出信号的瞬时空间频率随位置变化的线性调频段, 采取类似于 SAR 的匹配接收处理方法, 在顺轨方向 (Along-Track) 上实现孔径综合. 但由于他用点源目标进行实验, 未考虑实际地物目标对入射角的选择性, 因此离星载遥感应用还有相当的距离. 在超综合孔径辐射计的基础上, 本文对任意基线方向的二元干涉仪进行了深入研究^[5]. 观测系统几何关系与基线的空间方向如图 1 所示.

图中 x 为平台运动方向, 阴影部分为波束足迹, 其中假设交轨方向的分辨率已由波束本身得到, D 为基线长度, 也即两个单元天线之间的距离; α, β, γ 为基线与坐标系所成的方向角. 干涉仪的输出为两路信号的乘积, 对位于 (x_0, y_c) 的地物目标而言, 干涉仪的输出为

$$\begin{aligned} V(x, x_0, y_c) &= V_1(x, x_0, y_c) V_2^*(x, x_0, y_c) \\ &= f_1(x, x_0, y_c) f_2^*(x, x_0, y_c) |E_1(x, x_0, y_c)| \\ &\quad |E_2(x, x_0, y_c)| e^{-jk\Delta R} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Delta R = D[(x_0 - x) \cos\alpha + y_c \cos\beta - h \cos\gamma] / \sqrt{(x_0 - x)^2 + y_c^2 + h^2}$, $k = 2\pi/\lambda$, f_1 与 f_2 , E_1 与 E_2 以及 V_1 与 V_2 分别为两个天线单元的方向图、到达天线口面的电场强度

收稿日期: 1999-12-02; 修回日期: 2000-07-24

基金项目: 国家 863 计划 (No. 863-2-7-4-14); 国家自然科学基金 (No. 69881004)

以及两个通道的输出. 由于辐射亮温与电场的平方或功率成正比, 引入辐射亮温 B 来代替场强 E . 对扩展目标而言, 干涉仪的输出应该是天线波束覆盖区内所有目标响应的积分. 考虑 E_1 和 E_2 在幅度上基本相同, 只是相位不同, 如果在整个观测区内, 同一地点的地物亮温不随入射角的变化而改变, 地物的辐射亮温也没有极化选择特性, 两个天线单元又完全等同, 可以得到:

$$V(x) = C \int_{x_a}^{x_b} f^2(x_0) B(x_0) e^{-jk\Delta R} dx_0 \quad (2)$$

其中 $V(x)$ 为可见度函数, C 为常数, $f(x)$ 为天线单元的方向图, $B(x)$ 为地物亮温.

由此出发, 本文进行了综合孔径辐射计的基线设计和亮温反演成像的数值优化模拟.

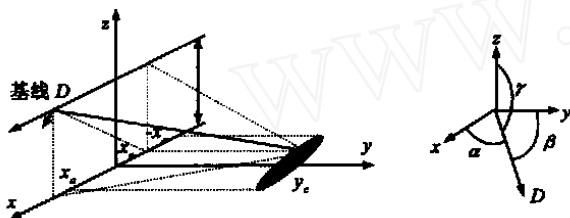


图 1 观测系统与基线空间方向

2 基线分析与设计

为了简化问题, 假设 $C=1$, $f(x)=1$, 并将式(2)改写为

$$V(x) = \int_{x_a}^{x_b} \phi(x, x_0) B(x_0) dx_0 \quad (3)$$

其中 $\phi(x, x_0) = e^{-jk\Delta R}$. 进而对 x 进行离散化, 可得矩阵表达式

$$V = \Phi \cdot B \quad (4)$$

此处忽略了积分步长的影响, 在后面的“反演结果修正”中加以考虑.

由式(2)可见度函数 $V(x)$ 可以认为是亮温 $B(x)$ 与 $e^{j\phi(x)}$ 的卷积, 即

$$V(x) = B(x) * e^{j\phi(x)} \quad (5)$$

其中,

$$\phi(x) = 2\pi D [x \cos \alpha - y_c \cos \beta + h \cos \gamma] / (\lambda \sqrt{x^2 + y_c^2 + h^2}) \quad (6)$$

根据反卷积理论, 亮温反演所能达到的分辨率决定于卷积因子 $e^{j\phi(x)}$ 的频带宽度. 对式(6)表示的相位求导, 得到

$$f = D [(y_c \cos \beta - h \cos \gamma) x + (y_c^2 + h^2) \cos \alpha] / [\lambda (x^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2}] \quad (7)$$

称 f 为空间频率. 根据 Fourier 变换与采样定理, 平台在飞行过程中的采样间隔 Δx 与单元天线波束在沿飞行方向上的覆盖宽度 $(-x_a, x_a)$ 直接相关, 并由下式给出

$$\Delta x = \lambda (x_a^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2} / [2 D x_a (y_c \cos \beta - h \cos \gamma)] \quad (8)$$

而地面分辨率与最大空间频率的关系为

$$\Delta x_0 = 1 / (2 f_{\max}) = \lambda (x_{\max}^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2} / \{2 D [(y_c \cos \beta - h \cos \gamma) x_{\max} + (y_c^2 + h^2) \cos \alpha]\} \quad (9)$$

下面, 分析一个模拟星载辐射计的例子^[5]. 假设卫星平台高度 $h=800\text{km}$; 成像区域距星下点 400 公里侧视, $y_c=400\text{km}$;

波束在地面上的覆盖区域为 180km, 也即 $x_a=90\text{km}$; 干涉仪的空间采样区间为 160 公里, 也即 $x_{\max}=80\text{km}$; 这样, 被测目标在整个采样区间, 入射角的变化很小, 为 26.56° 到 28.5° , 达到遥感应用的要求; 数据采集窗之间有 20km 的间隔, 如考虑平台移动速度为 7.8km/s , 这段距离可以为单元天线提供约 2.5s 时间, 用于波束回摆.

根据上面的讨论, 为达到 10km 的空间分辨率, 选用三条基线来覆盖所需要的空间频带. 基线的几何参数如表 1 所列, 图 2 为组成三条基线的四个单元天线的几何位置.

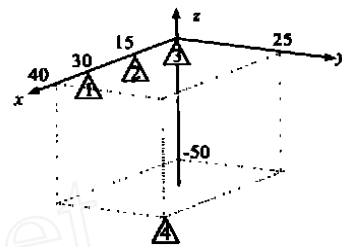


图 2 四个单元天线的几何位置
(单位为波长数)

表 1 基线几何参数与覆盖的空间频率段

	α	β	γ	D/λ	空间频率覆盖段
No. 1	79.9	63.9	151.7	56.79	4.92 ~ 14.85
No. 2	65.9	65.9	144.7	61.24	19.77 ~ 29.60
No. 3	54.4	68.7	136.7	68.73	34.61 ~ 44.45

注: 1. 基线一由 1, 4 组成; 基线二由 2, 4 组成; 基线三由 3, 4 组成.

2. 表 1 和图 3 中的空间频率覆盖是对 $\sqrt{y_c^2 + h^2}$ 归一化后的结果, 无量纲.

三条基线对应的空间频率

覆盖, 同时用图 3 表示. 该

基线结构的最大空间频率

为 $f_{\max}=0.0497(1/\text{km})$, 归

一化后为 44.45, 由式(8)、

(9), 得到空间分辨率为

$\Delta x_0=1/2f_{\max}=10.06(\text{km})$,

可见度函数的采样间隔为

$\Delta x=80(\text{km})$.

3 亮温反演

下面采用两种方法进行可见度函数的反演. 第一种是矩

量法, 第二种是基于 Backus-Gilbert 理论的线性算法(以下简称

为 BG 算法).

3.1 矩量法

如上分析, 采用三根基线覆盖所需要的空间频率, 对每根

基线采样三次(分别在 -80、0、80 公里处), 加上零空间频率

(由任一天线的自相关得到), 共得到 10 个空间频率点上的采

样值, 再把可见度函数实、虚部分开, 可得 19 个方程, 反演出

19 个亮温, 以满足分辨率要求. 反演出的亮温用下式表示

$$T(x) = \sum_{i=1}^n u_i \cdot N_i(x) \quad (10)$$

其中 u_i 为相应反演点 x_i 上的亮温反演值, $N_i(x)$ 如下所示:

$$N_i(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, & x_{i-1} < x < x_i \\ \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i}, & x_i < x < x_{i+1} \end{cases} \quad (11)$$

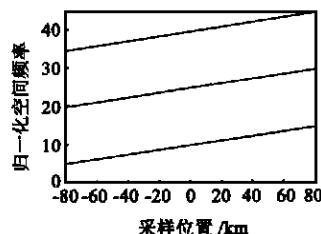


图 3 基线的空间频率响应

在采样的空间频率域上采用点匹配法. 由矩量法理论^[6,7], 可以得到

$$\sum_{i=1}^n u_i \int_V L(N_i) dv = \int_V g dv, j = 1, \dots, 10 \quad (12)$$

其中 L 为生成可见度函数的积分核, g 为可见度函数的采样值. 最后得到

$$A \cdot U = G \quad (13)$$

其中 U 是由亮温反演值 u_i 组成的列向量, G 是由可见度函数采样值的实部和虚部组成的列向量, A 由下式生成

$$A = \Phi \cdot N \quad (14)$$

其中 Φ 同式(4), N 是由列向量 N_i , ($i = 1, \dots, 19$) 生成的矩阵, Φ 和 N 的维数与相邻反演点 x_i 之间所取的点数相适应. 采用总体最小二乘法^[8]解矩阵方程(13), 可以保证在系数 A 、 G 有扰动时, U 有稳健的解. 最后, 用均匀亮温分布时的反演结果对所得的反演亮温进行修正. 模拟亮温的反演结果如图4所示. 可以看出, 采用矩量法的反演结果比 Fourier 变换法^[5]的精度提高很多, 达到了设计的 10 公里分辨率.

3.2 BG算法

根据 Backus-Gilbert 理论, 亮温反演可以通过可见度函数采样值的线性组合实现^[9], 即

$$T = C \cdot V = C \cdot \Phi \cdot T \quad (15)$$

其中, C 为系数矩阵, V 为可见度函数采样值的实部和虚部组成的列向量. 在理想情况下, 应该有 $C \cdot \Phi = I$, 这样就有 $T = T$. 但由于可见度函数的采样点数有限, $C \cdot \Phi = I$ 不能得到完全满足, 得不到理想解, 因而采用在均方误差, 即

$$e = \sum (C \cdot \Phi - I)^2 \quad (16)$$

最小的条件下获得系数矩阵 C . 最小化上述误差矩阵, 可以得到

$$\Phi^T \cdot C^T = I \quad (17)$$

进而可以得到 C , 最后求出亮温反演值 T . 此方法可以根据需要选择参与反演的点数(一般取 v 的阶数的 3 倍以上), 以得到比较平滑的亮温反演结果. 最后, 用均匀亮温时的反演结果对结果进行修正, 得到图4所示的反演结果. 可以看出, BG算法的反演结果比矩量法更为平滑, 更接近原始亮温分布.

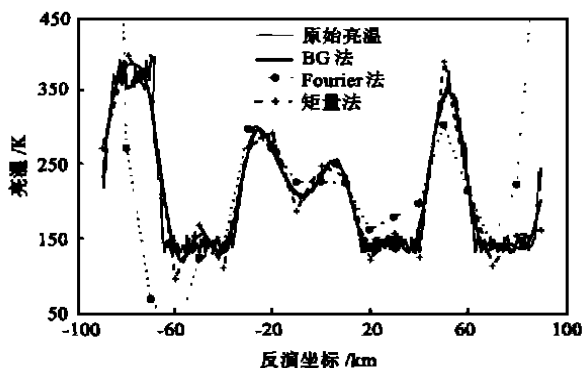


图4 三种反演方法的结果对比

4 结果分析与结论

上述两种方法所得的反演结果都比 Fourier 变换法更为

准确, 因为可见度函数与亮温的 Fourier 变换对关系是在对式(1)中的 ΔR 进行一阶近似的情况下得到的^[5], 而本文中的两种方法是直接利用 ΔR 进行反演. 进一步的分析表明, 这两种方法是等价的. 矩量法(点匹配)最后的亮温反演表达式为

$$T = A^{-1} \cdot V = [\Phi \cdot N]^{-1} \cdot V \quad (18)$$

而 BG算法的亮温反演表达式为

$$T = C \cdot V = \Phi^{-1} \cdot V \quad (29)$$

式(18)和(19)中 Φ 的生成方式一样的. 从上述表达式不难看出, 在适当选取 N 时, 两种方法是完全等价的. 只是由于具体的实现方式不同, 主要是反演点数的多少, 导致 BG算法反演所得到的亮温曲线比较平滑.

本文中模拟的亮温反演达到了预期的精度, 因而用前面的基线分析设计和亮温反演方法, 并配合交轨方向的孔径综合技术, 可以大大简化微波辐射计天线的结构, 大幅度的提高辐射计的空间分辨率, 有效的进行星载二维成像综合孔径辐射计的研制. 并且, 如果选用更高的微波频段作为工作频段, 还可进一步提高空间分辨率, 进而拓展辐射计的应用领域, 或者在已有的领域获得更有价值的更为广泛的应用. 可以说, 顺轨方向的孔径综合是星载微波辐射计技术的一个重要发展方向.

作者简介:



黄永辉 1998年毕业于清华大学电子工程系, 同年进入中国科学院空间科学与应用研究中心攻读硕士学位. 主要从事微波遥感机理、成像算法等方面的研究工作.



吴季 丹麦技术大学电磁所博士, 现为中科院空间中心研究员. 主要从事微波遥感机理, 综合孔径微波辐射计, 土壤湿度测量, 电磁场与天线理论等方面的研究工作.

参考文献:

- [1] Thompson, A. R., J. M. Moran, and G. W. Swenson, Jr. Interferometry and synthesis in radio astronomy [M]. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1994.
- [2] Ruf, C. S., C. T. Swift, A. B. Tanner and D. M. Le Vine, Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth [J]. IEEE Trans. GRS, 1988, 26: 597 - 611.
- [3] Le Vine, D. M., M. Kao, A. B. Tanner, C. T. Swift and A. Giffis, Initial results in the development of a synthetic aperture microwave radiometer [J]. IEEE Trans. GRS, 1990, 28: 614 - 619.

(下转第 107 页)

电磁问题. 为此在馈源中引入了内阻, 提出了内阻型电流馈源模型, 与内阻型电压馈源模型相比, 它不随内阻的增大而出现不稳定性, 而且模拟时间随内阻的适当增加而进一步减少. 数值实验表明, 这些馈源模型具有相同的计算精度.

参考文献:

- [1] A. Taflove, Computational Electrodynamics: the Finite-difference Time-domain Method [M]. Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [2] C. Wu, K.-L. Wu, Z.-Q. Bi, etc., Accurate characterization of planar printed antennas using finite-difference time-domain method [J]. IEEE Trans. on AP, 1992, AP-40(5): 526 - 533.
- [3] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra, etc., Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits [J]. IEEE Trans. on MTT, 1990, MTT-38(7): 849 - 857.
- [4] R. J. Luebbers, H. S. Langdon, A simple feed model that reduces time steps needed for FDTD antenna and microstrip calculations [J]. IEEE Trans. on AP, 1996, AP-44(7): 1000 - 1005.
- [5] M. R. Zunoubi, N. H. Younan, J. H. Beggs, etc., FDTD analysis of linear antennas driven from a discrete impulse excitation [J]. IEEE Trans. on EMC, 1997, EMC-39(3): 247 - 250.
- [6] Kōmiyama, K., High resolution imaging by supersynthesis (SSR) for the passive microwave remote sensing of the earth [J]. Electronic Letters, 1991, 27: 389 - 390.
- [7] 倪光正, 钱秀英. 电磁场数值计算 [M]. 高等教育出版社, 1996.
- [8] 邹谋炎. 反卷积和信号复原 [M]. 中国科技大学研究生院(北京)讲义, 1998.
- [9] Stogryn A., Estimates of brightness temperature from scanning radiometer data [J]. IEEE Trans. Antenna and Propagat., 1978, 26(5): 720 - 726.
- [10] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, Antenna Theory and Design [M]. John Wiley & Sons, 1981.

作者简介:



袁伟良 1970 年 12 月出生, 分别于 1993 年, 1996 年和 1999 年在西安电子科技大学获得工学学士, 硕士和博士学位. 目前主要从事电磁兼容, 天线分析与设计和电磁场数值计算方法等方面的研究.



梁昌洪 1943 年 12 月出生, 1965 年毕业于西北电讯工程学院无线电物理系, 自 1967 年起, 任教于西安电子科技大学微波电信工程系, 目前为该校教授, 博士生导师. 1980 年到 1982 年作为访问学者在美国 Syracuse 大学深造. 目前的主要研究兴趣包括计算电磁学, 计算微波网络理论, 电磁散射和逆散射, 电磁孤子, 分形电动力学和瞬态电磁学. 中国电子学会会士和 IEEE 高级会员.

(上接第 110 页)

- [4] Kōmiyama, K., High resolution imaging by supersynthesis (SSR) for the passive microwave remote sensing of the earth [J]. Electronic Letters, 1991, 27: 389 - 390.
- [5] 吴季, 张升伟, 董晓龙, 赵凯. 高分辨率微波辐射计关键技术研究 [R]. 中国科学院空间科学与应用研究中心内部报告, 1999, 4.
- [6] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, Antenna Theory and Design [M]. John Wiley & Sons, 1981.
- [7] 倪光正, 钱秀英. 电磁场数值计算 [M]. 高等教育出版社, 1996.
- [8] 邹谋炎. 反卷积和信号复原 [M]. 中国科技大学研究生院(北京)讲义, 1998.
- [9] Stogryn A., Estimates of brightness temperature from scanning radiometer data [J]. IEEE Trans. Antenna and Propagat., 1978, 26(5): 720 - 726.