

综合孔径微波辐射计天线单元互耦的影响及其校正

董晓龙, 张升伟, 吴 季, 黄永辉, 姜景山

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘 要: 本文建立了综合孔径微波辐射计天线单元之间互耦对于综合孔径成像的影响的模型, 分析了天线单元之间的互耦对于综合孔径微波辐射计分辨率的影响. 给出了校正天线单元互耦作用影响的方法, 在此基础上提出了一种综合孔径微波辐射计的定标方法. 通过数值模拟, 证明了所提出的方法的有效性.

关键词: 干涉式综合孔径; 微波辐射计; 互耦; 校正

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1280-03

Effect of Mutual Coupling Between Antenna Elements on the Imaging of Synthetic Aperture Radiometer and Its Calibration

DONG Xiao-long, ZHANG Sheng-wei, WU Ji, HUANG Yong-hui, JIANG Jing-shan

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Post Box No. 8701, Beijing 100080, China)

Abstract: In the paper, theoretical model of the effect of mutual coupling between antenna elements on the imaging of synthetic aperture radiometer (SARad) is established. The effect of mutual coupling on the resolution of SARad is analyzed. An analytical expression for the calibration of mutual coupling is presented. On the basis of theoretical results, a scheme for the calibration of SARad is proposed. Numerical simulations show the validity of the proposed method.

Key words: interferometric synthetic aperture; microwave radiometer; mutual coupling; calibration

1 引言

干涉式综合孔径微波辐射计是近年来被动微波遥感技术发展中的一个热点, 是射电天文综合孔径望远镜在对地观测领域的应用和发展. 干涉式综合孔径微波辐射计通过采用不同基线的干涉测量, 得到合成一个等效大口径天线所需要的所有的基线组合, 并通过对干涉得到的可见度函数测量结果反演成像得到观测区域的亮温分布. 在天线的远区, 所有相同长度和取向的基线的干涉测量结果相同, 所以可以大大稀疏大口径天线的离散结果. 综合孔径微波辐射计的主要优点是: 通过小口径天线的干涉组合合成大口径天线, 避免了高精度大口径天线的加工困难; 通过天线稀疏, 大大减小天线的体积和重量; 通过数字合成处理, 实现波束的数字扫描, 避免大口径天线机械扫描带来的问题, 并在一定程度上缓解由于积分时间引起空间分辨率和温度分辨率的矛盾. 综合孔径微波辐射计的基本单元是二元干涉仪, 综合孔径微波辐射计实际上就是多个具有不同基线的二元干涉仪的组合.

天线单元之间存在的互相耦合, 造成单元天线方向图和干涉测量组合关系的改变, 根据理想天线组合得到的测量与图象反演关系被破坏, 从而造成综合孔径微波辐射计总体成像结果变差. 在 ESTAR 的研制过程中, Swift 和 LeVine 等注意到天线互耦作用的影响, 并进行了实验研究, 通过对点目标和

均匀目标的测量, 获得实际的系统调制矩阵(即干涉测量得到的可见度函数与天线亮温分布之间的线性变换矩阵). 但这些工作, 都没有给出互耦作用的定量结果, 并且系统调制矩阵的获取方法需要复杂的实验条件, 定标结果的精度很难提高.

本文工作是在对互耦作用理论模型进行分析的基础上, 给出互耦存在时可见度函数测量结果变化和亮温反演结果畸变的定量关系, 从而得到严格的互耦校正的解析表示, 对于定量化测量, 具有重要意义. 另外本文所给的方法, 简化了互耦校正的处理和实验测量.

2 综合孔径微波辐射计的测量机理和反演成像

综合孔径微波辐射计的成像过程就是一个采用小天线实现大口径天线的过程. 微波辐射计测量的是天线波束范围内辐射功率. 图 1 所示为在一个大口径范围内的天线单元, 设 i, j 口径范围内的两个天线单元, 它们的位置分别为 $(x_i, H), (x_j, H)$, 设天线单元的方向图相同 $G(\theta)$, 两个天线的接收电压分别为 V_i 和 V_j , 设天线阵的长度为 L , 对于天线阵

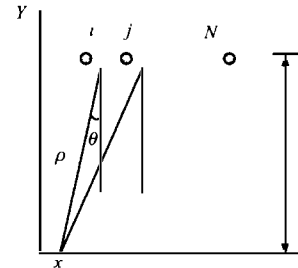


图 1 一维综合孔径微波辐射计的观测示意

收稿日期: 2000-05-22; 修回日期: 2001-01-17

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

而言,当被观测区域位于天线阵的远区时,对 V_i 和 V_j 进行复相关得

$$V_y = \langle V_i, V_j \rangle = \langle C \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{E(\theta) G(\theta) e^{-j(2\pi/\lambda)\rho_j(\theta)} \rho_i(\theta)}{\rho_i(\theta)} d\theta, C \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{E(\theta) G(\theta) e^{-j(2\pi/\lambda)\rho_j(\theta)} \rho_i(\theta)}{\rho_i(\theta)} d\theta \rangle$$

$$= C^2 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\theta \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\theta' \cdot \exp\{-\frac{j2\pi}{\lambda} [\rho_i(\theta) - \rho_j(\theta')]\} \cdot G(\theta) G(\theta') \cdot \langle E(\theta), E(\theta') \rangle \quad (1)$$

式中: ρ_i, ρ_j 分别是两个天线到被观测区域上一个点的距离, θ 是对应的观测角, E 是被观测区域在该方向上的辐射场强, C 是一个系统常数。

在远区条件下, $\Delta\rho_{ij}(x) = \rho_i(x) - \rho_j(x) \approx (x_i - x_j) \sin\theta$, 考虑到物质电磁热发射的非相干特性, 即 $\langle E(\theta), E(\theta') \rangle = C_0 T(\theta) \delta(\theta' - \theta)$, 式中 C_0 是一个比例常数, 可以得到

$$V_y = C^2 C_0 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} d\theta \cdot G^2(\theta) T(\theta) \cdot \exp\left(-\frac{j2\pi}{\lambda} \Delta x_{ij} \sin\theta\right) \quad (2)$$

所以在天线的远区, 复相关量 $\langle V_i, V_j \rangle$ 只与两个天线的位置差 $\Delta x_{ij} = x_i - x_j$ 有关, 而与所处的具体位置无关, 我们称之为对应于 $\Delta x_{ij} = x_i - x_j$ 的可视度函数。进一步进行变量代换 $t = \sin\theta$, $d\theta = dt/\sqrt{1-t^2}$, $\frac{\Delta x}{\lambda} = l$, $V_y = V_c(l)$, $C^2 C_0 G^2(\theta) T(\theta) = \tilde{T}(t)$, $\hat{T}(t) = \tilde{T}(t)/\sqrt{1-t^2} = \tilde{T}(\theta) \cos\theta$, 可以得到

$$V_c(l) = \int_{-1}^{+1} \hat{T}(t) e^{-j2\pi l t} dt \quad (3)$$

即满足远区条件时, 可见度函数与亮温分布为 Fourier 变换的关系。

由于亮温参数 $\hat{T}(t)$ 恒为实数, 所以有 $V(-l) = V^*(l)$, 因此在测量中只需要测量一半的基线组合要求, 即可以获得比物理口径大一倍的等效口径。

将天线口径离散化为天线阵, 在有限的天线单元分布区域 L 的范围内, 天线单元离散分布, 即 l 的取值为某一单位基线长度 Δl 的整数倍, 即 $l = n\Delta l$ ($n = 0, 1, \dots, N$), $L = N\Delta l$; 类似对变量 t 进行离散: $t = k\Delta t$ ($k = -N, -N+1, \dots, 0, \dots, N-1, N$), $\Delta t = 1/N$, 则式(3)所表示的关系可以用离散 Fourier 变换(DFT)计算

$$V_c[n] = \sum_{k=-N}^N \hat{T}[k] e^{-j(2\pi/(2N+1))kn} \quad (4)$$

式中: $V_c[n] = V_c(n\Delta l)$, $\hat{T}[k] = \hat{T}(k\Delta t)$, $(2N+1)\Delta t = 1/\Delta l$ 从而反演公式为

$$\hat{T}[k] = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N V_c[n] e^{j(2\pi/(2N+1))kn} \quad (5)$$

表示成矩阵算子形式为

$$V_c = \hat{T} \hat{T} \quad (6)$$

$$\hat{T}_c = F^* V_c \quad (7)$$

式中:

向量 $V_c = [V_c[-N], V_c[-N+1], \dots, 0, \dots, V_c[N-1], V_c[N]]^T$

向量 $\hat{T}_c = [\hat{T}[-N], \hat{T}[-N+1], \dots, 0, \dots, \hat{T}[N-1], \hat{T}[N]]^T$

$$F = [W_{2N+1}^k]_{(2N+1) \times (2N+1)}$$

$$W_{2N+1}^k = e^{-j(2\pi/(2N+1))kn}$$

上标 * 表示复共轭, T 表示转置。

可以证明:

$$\frac{1}{N} F^* F = \frac{1}{N} F F^* = I = \text{diag}[1, 1, \dots, 1] \quad (8)$$

所以无互耦影响的理想情况下, Fourier 变换可以得到理想的分辨率。根据离散 Fourier 变换的性质, 可以得到: 可见度函数 $V_c(t)$ 的离散密度 Δl , 即最小基线的长度, 决定了反演图象 $\hat{T}(t)$ 的延拓周期, 该参数由单元天线的波束宽度决定; 可见度函数 $V_c(l)$ 的最大长度 $(2N+1)\Delta l$, 即等效阵列的最大长度, 决定了反演图象 $\hat{T}(t)$ 的采样密度(即图象的分辨率)。

3 天线单元之间互耦对综合孔径成像的影响

理想条件下干涉式综合孔径微波辐射计的可见度函数与亮温分布是 Fourier 变换的关系, 如果存在天线单元之间的相互耦合, 则会引入可见度函数分量之间的耦合。设天线单元之间的耦合关系为

$$V' = AV \quad (9)$$

式中:

向量 $V' = [V'_1, V'_2, \dots, V'_M]$ 为有互耦时天线的接收电压;

向量 $V = [V_1, V_2, \dots, V_M]$ 是没有互耦时天线的接收电压。

矩阵 $A = [a_{ij}]$ 是互耦作用系数, a_{ij} 表示第 j 个天线单元对第 i 个天线单元的互耦贡献系数, $a_{ii} = 1$, 互耦贡献系数与天线阵的布局有关。

对于可见度函数分量 V_{ij} , 则包含互耦作用时的测量结果为

$$V'_{ij} = V_{ij} + \sum_{p \neq i} \sum_{q \neq j} a_{ip} a_{jq}^* V_{pq} \quad (10)$$

即基线 V_{ij} 的测量结果中包含所有基线 V_{pq} 的贡献。表示为算子形式

$$V'_c = BV_c \quad (11)$$

式中: $B = [b_{mn}]$ 是基线的关联矩阵, 矩阵元素 b_{mn} 是第 m 条基线对第 n 条基线的贡献。

进一步可以得到有互耦影响的反演结果为

$$\hat{T}' = \frac{1}{N} F^* V'_c = \frac{1}{N} F^* B V_c = \frac{1}{N} F^* B F \hat{T} = D \hat{T} \quad (12)$$

式中: $D = (1/N) F^* B F$ 为成像过程的相应算子, 类似于成像系统中的点响应函数, 它表示了互耦引入的反演成像的失真和分辨率的下降。当不存在互耦作用时, $B = D = I$ 。

4 天线单元之间互耦作用的校正

互耦的作用引起反演成像的失真和分辨率下降。为了对互耦的作用进行校正, 就必须设法求取 $D = \frac{1}{N} F^* B F$ 的逆矩阵 $D^{-1} = D$, 然后进行校正

$$D^{-1} \hat{T}' = \hat{T} \quad (13)$$

由于相对于自作用, 互耦的幅度通常较小, 所以矩阵 D

通常是对角占优矩阵,其求逆可以采用一般的求逆方法.

可以采用两种方法获得校正矩阵 D^{-1} :

(1)根据对天线互耦作用的测量结果求 D^{-1}

首先测量天线阵中单元天线之间的互耦,得到互耦作用系数 a_{ij} ;然后根据每条基线的组合情况得到基线的关联矩阵 B ;最后根据式(12)、(13)得到校正矩阵.

(2)通过点目标在成像区域的运动测量 D^{-1}

首先对于一个成像区域进行干涉测量和反演成像,设该区域的亮温参数为

$$\hat{T}_b = [\hat{T}_{-N,b}, \hat{T}_{-N+1,b}, \dots, \hat{T}_{0,b}, \dots, \hat{T}_{N-1,b}, \hat{T}_{N,b}]^T \quad (14)$$

受互耦影响的反演结果为

$$\hat{T}'_b = D\hat{T}_b \quad (15)$$

然后依次在从对应 $t = -N\Delta t, -(N-1)\Delta t, \dots, 0, \dots, (N-1)\Delta t, N\Delta t$ 的分辨单元放置一亮温参数为 \hat{T}_μ 的点源,则在各个位置上,成像区域内的亮温参数为

$$\hat{T}_b^{-N} = [\hat{T}_\mu + \hat{T}_{-N,b}, \hat{T}_{-N+1,b}, \dots, \hat{T}_{0,b}, \dots, \hat{T}_{N-1,b}, \hat{T}_{N,b}]^T$$

$$\hat{T}_b^{-N+1} = [\hat{T}_{-N,b}, \hat{T}_\mu + \hat{T}_{-N+1,b}, \dots, \hat{T}_{0,b}, \dots, \hat{T}_{N-1,b}, \hat{T}_{N,b}]^T$$

.....

$$\hat{T}_b^N = [\hat{T}_{-N,b}, \hat{T}_{-N+1,b}, \dots, \hat{T}_{0,b}, \dots, \hat{T}_{N-1,b}, \hat{T}_\mu + \hat{T}_{N,b}]^T \quad (16)$$

对应的有互耦影响的反演结果为

$$\hat{T}'_b^n = D\hat{T}_b^n, n = -N, -N+1, \dots, 0, \dots, N-1, N \quad (17)$$

用有点源的反演结果减去无点源的反演结果可以得到

$$\Delta\hat{T}'_b = D \cdot \text{diag}[\hat{T}_\mu, \dots, \hat{T}_\mu] = \hat{T}_\mu D \quad (18)$$

从而

$$D^{-1} = \frac{1}{\hat{T}_\mu} \Delta\hat{T}'_b \quad (19)$$

5 数值算例

本节给出一个简单的例子.考虑一个6单元稀疏天线阵综合孔径微波辐射计观察空间点源.图2是观测的几何关系.

图3所示为天线阵的布局,单元之间的最小间距为 $\Delta u = \lambda/2$.

对于图2所示点源,设其亮温为 T_0 ,则有辐射源的空间分布为

$$T(\theta) = T_0\delta(\theta) \quad (20)$$

不考虑天线单元之间的耦合,可见度函数为

$$V(l) = \hat{T}(0) = AT_0 \quad (21)$$

式中:A是一个常数.

用 Fourier 变换得到理想情况下的反演结果,与原亮温分布一致,只是分辨率受到天线阵长度的限制.对于图3所示的稀疏阵,天线阵长度为 10λ ,相应的角度分辨率为 11.5° .如果考虑到互耦引起的可见度函数的测量误差,仍根据理想反演方法计算,则得到的亮温反演的精度和分辨率都会下降,对点辐射源而言,表现为点响应函数主瓣的下降和副瓣的增大(图中虚线所示).进一步根据天线之间的耦合系数和基线的组合

形式,可以计算出基线的关联矩阵,采用本文给出的修正方法,则在互耦条件下仍可以得到理想的反演结果.图4给出了数值计算的结果.

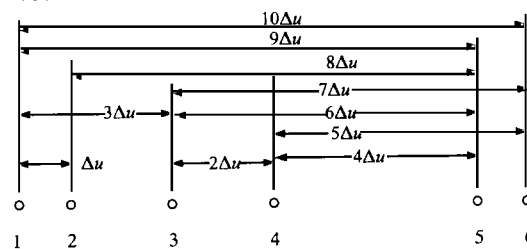


图3 6单元11基线稀疏天线阵布局和基线组合

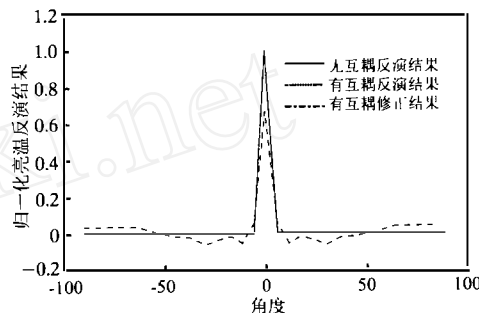


图4 综合孔径辐射计对点源的观测和反演

6 结论

本文建立了干涉式综合孔径微波辐射计稀疏天线阵阵元之间的互耦作用对可见度函数采样的影响的理论模型,将互耦作用对综合孔径成像的影响归结为成像系统点响应函数主瓣的降低和副瓣的增加,从而造成反演成像精度和分辨率的下降.本文给出一种基于互耦补偿的修正方法,可以有效地克服互耦对成像精度和分辨率的影响.数值模拟的结果表明所给算法的有效性.根据对成像算法点响应过程的分析,本文还给出了一种对干涉式综合孔径微波辐射计进行校准的直接实验方法.

参考文献:

- [1] Ruf C S, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth [J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens, 1988, 26(5): 598 - 611.
- [2] Peichl M, et al. Microwave imaging of the brightness temperature distribution of extended areas in the near and far field using two-dimensional aperture synthesis with high spatial resolution [J]. Radio Science, 1998, 33(3): 781 - 801.
- [3] Thompson A R, et al. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [4] 中国国防科学技术报告. 高分辨率微波辐射计关键技术研究 [R]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 1999.
- [5] Oppenheim A V, et al. (黄建国, 刘树棠译). 离散时间信号处理 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 王国荣. 矩阵与算子的广义逆 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.