

# 二维综合孔径微波辐射计成像理论与方法研究

黄永辉, 吴 季

(中科院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

**摘 要:** 本文在顺轨方向孔径综合技术的理论研究的基础之上,对星载二维成像综合孔径微波辐射计的成像理论进行了分析,讨论了二种不同的基线结构方案,并对相应的可见度函数采样方案和成像反演算法进行了讨论.最后通过数值模拟说明了本文提出的成像理论和基线结构方案具有可行性.

**关键词:** 综合孔径; 二维成像; 微波辐射计

**中图分类号:** P412.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)05-0697-05

## Study on Image Theory of High Resolution Two-Dimensional Synthetic Aperture Microwave Radiometer

HUANG Yong-hui, WU Ji

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The study on image theory of two-dimensional synthetic aperture microwave radiometer is presented. It is based on the aperture synthesis theory in both along track and cross track directions. Using the present theory, two different space borne baseline configurations are discussed together with their sampling schemes of the visibility function and the algorithm of retrieving the original brightness temperature. Numerical simulated results show that the theory presented is feasible.

**Key words:** synthetic aperture; interferometry; microwave radiometer

### 1 引言

微波辐射计作为被动的微波遥感器具有体积小、重量轻、功耗低的特点,并能够进行全天时、全天候的观测,特别适合于星载应用,因而在遥感技术领域中正占有越来越重要的地位.但是,它与有源微波遥感器,如合成孔径雷达相比有一个缺点,就是受天线系统物理口径的限制,空间分辨率较低.特别是在微波频段的低端,如L波段,太阳同步轨道上的微波辐射计的地面分辨率一般在100公里以上,而地球同步轨道上的卫星的地面分辨率则更低,这使得其在许多应用领域都无法达到基本的使用需要,严重制约了辐射计的发展.近年来,射电天文学中的孔径综合技术被引入到被动微波遥感领域<sup>[1]</sup>,为有效的提高辐射计的空间分辨率提供了一个可行的解决方案.首先是80年代末期,NASA和Massachusetts州立大学的微波遥感实验室(MIRSL)在机载微波辐射计上进行了垂直于飞行方向(交轨方向)上的一维综合孔径辐射计(ESTAR)的研制工作<sup>[2,3]</sup>,并成功的进行了飞行实验.此外,Edelsohn于1984年,Komiyama于1991年提出了利用沿飞行方向(顺轨方向)基线和目标之间空间位置的变化,对二元干涉仪输出的瞬时频率进行匹配滤波的孔径综合方法<sup>[4,5]</sup>.这两种方法基本上代表了两种截然不同的干涉成像方法.以后出现的各种一维和二维的成像方法都是上述两种方法的发展和延续.

由于顺轨方向的孔径综合可以极大的减少干涉天线单元和相关器的数量,因此具有很大的应用前景.我们在<sup>[4,5]</sup>工作的基础上,着重分析了二元干涉仪的空间频率输出特性,提出了不用匹配滤波的成像方法<sup>[6]</sup>.这一方法的优点在于:第一,使得可见度函数的采样的区间得到限制,可以根据应用需求加以选择;第二,将交轨方向的算法与顺轨方向的算法统一,便于上述两种方法在二维成像方案中同时使用.

实际的遥感应用针对的至少是二维地物.采用实口径天线的二维辐射计往往通过机械扫描结合平台移动实现二维成像.当空间分辨率需求提高,天线物理口径加大,波束在每一个分辨像元的驻留时间的减少和机械扫描给平台稳定带来的影响都将成成为限制.因此,利用综合孔径技术实现二维成像就成为重要技术途径.欧空局最近提出的SMOS计划中的二维综合孔径辐射计(MIRAS)就是一个很好的尝试.MIRAS在垂直与飞行两个方向上都采用了类似ESTAR的孔径综合方法<sup>[7]</sup>.由于是二维成像,其干涉单元数和相关器的数量都非常大,使系统非常复杂.

考虑到上述系统的各自优势与不足,本文拟将利用两种方案的优势,并将其结合,甚至与合理的机械扫描相结合,提出了不同以往的二种二维综合孔径辐射计方案,推导出成像理论和算法,并通过数值模拟说明所提出方案的可行性.

## 2 理论分析

本文叙述的基础是一种将两个接收天线之间的间距拉开一定距离,并将其各自信道的输出相乘的二元干涉仪,如图 1 所示.其中两个天线之间的距离矢量  $D$  称为基线,移相器用于调整信道的时延,使得当在垂直于基线方向有一点源时,干涉仪两信道输出同相.相关器对两个信道经过与公共本振混频后的中频信号完成乘法运算.相关器的输出经低通滤波器后,沿用射电天文学的名称被称为可视度函数(Visibility Function)  $V$ .

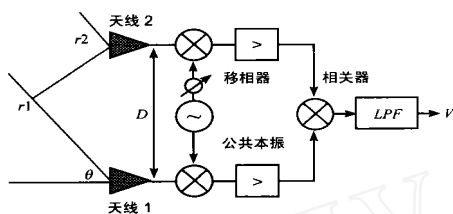


图 1 二元干涉仪原理图

二元干涉仪为综合孔径辐射计的基本测量单元.考虑星载平台一般情况,一任意指向的基线以及被测量区域的几何关系如图 2 所示.

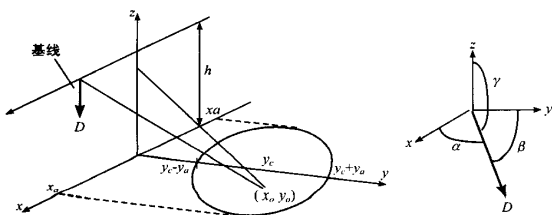


图 2 任意指向的基线与被测量区域的几何关系

现考虑相关器对位于远场的被测区域的可视度函数的测量输出:

$$\begin{aligned}
 V(D, x, y_c) &= \int_{y_c - y_a}^{y_c + y_a} \int_{x_a - x_c}^{x_a + x_c} v_1(x_0, y_0) v_2^*(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \\
 &= \int_{y_c - y_a}^{y_c + y_a} \int_{x_a - x_c}^{x_a + x_c} f_1(x_0, y_0) f_2^*(x_0, y_0) |E_1(x_0, y_0)| \\
 &\quad |E_2(x_0, y_0)| e^{-jkR} dx_0 dy_0 \\
 &= C \int_{y_c - y_a}^{y_c + y_a} \int_{x_a - x_c}^{x_a + x_c} f(x_0, y_0) B(x_0, y_0) e^{-jkR} dx_0 dy_0 \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中  $v_1$ 、 $v_2$  分别为天线 1 和天线 2 的输出电压,  $f(x, y) = f_1(x, y) f_2^*(x, y)$  为两个天线的方向图函数的乘积,  $E_1(x_0, y_0)$ 、 $E_2(x_0, y_0)$  分别为被测区域中  $(x_0, y_0)$  点到达天线 1 和天线 2

的场强,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $R = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y_0^2 + h^2}$ ,  $D$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  分别为该基线

的长度和三个方向角,由于测量实时进行,因此实际上  $E_1$  和  $E_2$  的幅度相等并可将其乘积表示为被测目标的辐射量温  $B$

$(x_0, y_0)$ ,  $C$  为与信道增益、被测区辐射功率到辐射亮温的转换因子等因素相关的常数.

为简化该表达式,假设  $C=1, f(x, y) = 1$ , 则式(1)可写成卷积形式:

$$V(x, y_c) = B(x, y_c) * e^{j\phi(x, y_c)} \quad (2)$$

其中  $\phi(x, y_c) = \frac{2D(x \cos \alpha - y_c \cos \beta + h \cos \gamma)}{\sqrt{x^2 + y_c^2 + h^2}}$  为相位项,令其分别对  $x$ 、 $y_c$  求导,得到如下表达式:

$$f_x = \frac{D(y_c \cos \beta - h \cos \gamma)}{(x^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$f_y = \frac{D(x \cos \alpha + h \cos \gamma)}{(x^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2}} \quad (4)$$

定义  $f_x, f_y$  为二维空间频率,表示单位距离上目标强度变化的周期数.两个方向上的空间分辨率分别与其最大空间频率对应,为:

$$x = 1/2f_{x \max}, \quad y = 1/2f_{y \max} \quad (5)$$

据此,可以由应用所需要的最高空间分辨率确定最大空间频率,由成像区域和最大空间频率确定可见度函数的最大采样间隔,或最小采样点数.但是,由于空间平台的移动和基线的变化,采样点在空间频率域对应的分布并不一定是均匀的.因此基线长度、方向和其组合设计的目标为:在能够得到同样的空间频率覆盖的情况下,采用尽量少的基线数量(对应尽量少的干涉天线单元和相关器)和尽量短的基线(对应天线展开孔径的减小).在进行设计优化时,还要考虑方案的物理可实现性,即星载平台应用中的技术约束条件.

当运载以及卫星平台对基线的长度存在上限约束时,对基线的方向的优化就显得首当其冲了.先考虑基线方向对顺轨方向的空间频率  $f_x$  的影响.顺轨方向的孔径综合是利用平台运动过程中产生的相位信息来反亮温.为了最大限度的提高基线利用率,应尽量使  $f_x$  在成像区间  $(-x_a, x_a)$  产生最大变化,而在该区间内

$$f_x = \frac{2D(y_c \cos \beta - h \cos \gamma)}{(x_a^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2}} \quad (6)$$

如选  $\gamma$  作为变量,使其最大的  $f_x$  应该满足  $\frac{\partial}{\partial \gamma} (y_c \cos \beta - h \cos \gamma) = 0$ , 考虑方向角及空间关系,可以得到

$$\cos \gamma = \sin \alpha \sin \beta \quad (7)$$

其中  $\sin \alpha = \frac{y_c}{\sqrt{y_c^2 + h^2}}$ ,  $\alpha$  为天线在  $x=0$  处对成像区域中心

的入射角.式(7)说明,当基线长度一定时,为了得到最大的空间频率覆盖,基线应该在平台飞行轨迹与目标中心所确定的入射平面内.可以证明,如选  $\beta$  作为变量,可以得到同样结果.由此可知,如果基线不在此平面内,那么基线的利用率将降低;也即对同样的空间频率,将需要采用比平面内的基线较长的基线来获得,其效率等于该基线在入射平面上的投影基线的效率.将式(7)代入式(6)得到该基线在采样区间内的最大空间频率覆盖,

$$f_x = \frac{2D \sin \alpha \cdot x_a \cdot \sqrt{y_c^2 + h^2}}{(x_a^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2}} \quad (8)$$

这一频段段的起始与终止点由基线与  $x$  轴的夹角 以及采样区间的起止点来确定。

再来考虑基线方向对交轨方向的空间频率  $f_y$  的影响. 由上述分析可知, 获得顺轨方向空间频率  $f_x$  的最佳基线方向应该使基线在入射面内, 由于交轨方向的空间频率  $f_y$  与顺轨方向空间频率  $f_x$  正交, 因此获得交轨方向空间频率  $f_y$  的最佳基线方向应该使基线与入射面垂直. 由于  $x$  轴在入射面内, 因此与入射面垂直将同时与  $x$  轴垂直, 得  $\theta = 90$  度. 代入 (4) 式,

$$f_y = \frac{D[h \cos \theta \cdot y_c + (x^2 + h^2) \cos \theta]}{(x^2 + y_c^2 + h^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{D}{\sqrt{y_c^2 + h^2}} \frac{h}{\sqrt{x^2 + y_c^2 + h^2}} \quad (9)$$

当  $x^2 \ll y_c^2 + h^2$  时, 平台移动对  $f_y$  影响不大,  $f_y$  主要由基线长度确定. 与分析顺轨方向空间频率情况相同, 对于方向不与入射面垂直的基线, 其  $f_y$  由该基线在此方向上的投影长度决定. 可见, 为取得需要的  $f_y$  的频率覆盖, 至少要采用与采样点数量相同的基线来测量。

对于二维成像, 要分别测量  $(f_x, 0)$  和  $(0, f_y)$ , 而且还要测量  $(f_x, f_y)$ , 也即所有的采样点应该布满空间频域图, 如图 3。

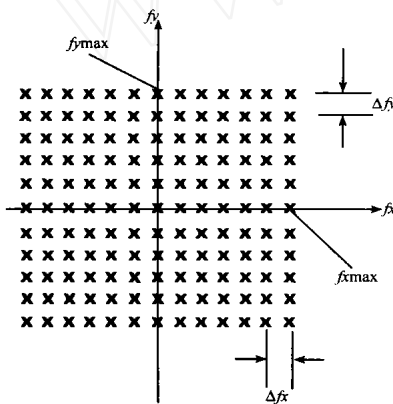


图 3 理想的采样点空间频域覆盖图

图 3 中的  $f_{x,max}$  由最长基线在入射面上的投影长度决定;  $f_{y,max}$  由最长基线在入射面法线上的投影长度决定, 再通过式 (5) 可以得到相应的空间分辨率, 或称分辨像元.  $f_x$  由整个成像区域在  $x$  轴方向上能够排列几个分辨像元决定, 其像元数应该等于沿  $x$  方向上的采样点数;  $f_y$  的物理意义与  $f_x$  相同, 但表示  $y$  轴方向的情况。

另外需要说明的是, 同射电天文的反演理论一样, 可视度函数  $V(f_x, f_y)$  和辐射亮温  $B(x, y)$  在远场区满足傅里叶变换的关系. 由于其共轭对称性, 实际测量只需要完成两个相邻的象限即可, 如 1、4 象限, 或 1、2 象限. 另外两个象限通过其共轭对称性得到。

### 3 基线结构设计方案讨论

根据上面分析, 为取得二维成像需要的  $f_{xy}$  的频率覆盖, 不但需要在入射面和其法线方向上进行干涉测量, 还需要在其他方向上进行干涉测量, 因此需要对基线的空间结构进行

优化设计. 基线结构优化设计的基本原则是,

(1) 在能够获得同样空间分辨率的情况下, 使基线长度尽量短, 以减小阵列孔径;

(2) 在不特别影响采样点均匀度的情况下, 使基线数量尽量少, 以减少单元天线数量和天线复杂程度, 从而也可以减少相关器的数量;

第二条中我们并未要求采样点一定要落在网格点上, 这是因为采用数值算法, 比如 BG 算法<sup>[6]</sup>, 进行数值反演, 只要要求采样点能够尽量均匀的分布在要求的空间频率区域间就可以了。

下面针对平台高度 800km, 成像区域中心偏离星下点 400km, 成像区域 180 × 200km, 平台在飞行过程中的采样区间为 - 80 ~ 80km, 像元分辨率为 10km 的初始要求, 讨论 2 种基线结构设计方案. 根据需求, 应该在成像区域中反演出 19 × 21 个像元的亮温, 因而需要 9 × 21 + 10 + 1 个空间频率域的采样值, 它们在频域的分布情况是: +  $f_x$  区域有 9 × 21 个, +  $f_y$  轴有 10 个, 还有 1 个零频。

#### 方案 1

该方案基线结构为“T”型, 如图 4(a) 所示. 在入射面的法线方向上天线为满阵, 有 21 个等间隔的相同天线 (标号分别为 1 .. 11 .. 21), 间隔由最大空间频率及采样点数确定. 基线总长度为 100 个波长, 相邻天线间隔为 5 个波长. 在入射面顺轨方向上采用三基线组合的孔径综合<sup>[6]</sup>, 3 个天线单元分别标为 a、b、c, 其方向图覆盖测试区域. 干涉测量在 a 与所有交轨天线单元、b 与所有交轨天线单元、c 与所有交轨天线单元之间进行, 类似 3 个“T”型. 在平台的飞行过程当中, 上述测量分别在  $x = - 80, 0, 80$ km 处各进行一次。

采样点在空间频率域的覆盖情况如图 4(b) 所示, 达到了对需要的空间频率域的近似均匀覆盖. 用 BG 法反演出目标的亮温分布, 数值模拟情况如图 5. 上面两幅是反演的和原始的亮温的三维图, 下面两幅是对应的亮温的等位线图。

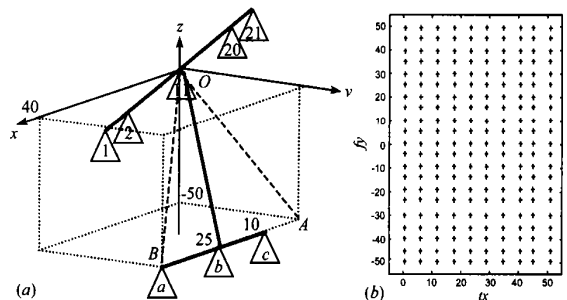


图 4 三个 T 型结构的基线设计方案与空间频域覆盖 (单位为波长)

采用数值算法, 主要的计算量是空间结构参数的获取, 这些结构参数可以事先计算好并存储起来. 实际测量时, 由可见度函数采样直到地物亮温的反演仅仅是简单的代数运算, 因此可以做到快速实时成像. 这个方案的缺陷是交轨方向天线为满阵, 天线单元多, 相关器数量也就很多, 如果不分时测量, 共需要 3 × 21 = 63 个. 这对于进一步增长基线长度, 提高空间

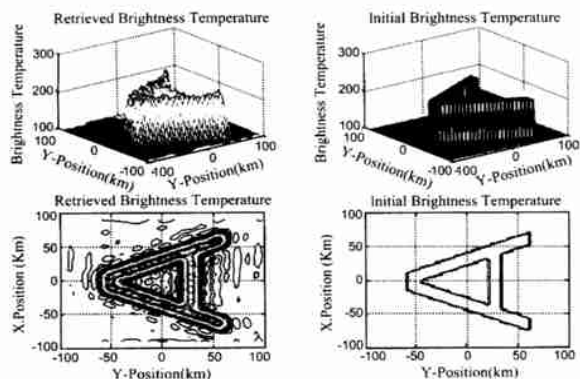


图5 方案一的数值模拟反演结果

分辨率不利,因而,有必要考虑进一步优化交轨方向阵列的结构,进一步有效降低天线单元和相关器的数量的途径。

### 方案2

为了进一步提高空间分辨率,现考虑一综合孔径与机械扫描相结合的方案.基线和天线单元结构如图6(a)所示.交轨方向采用两个水平极化对称振子天线 $a$ 、 $b$ 在与平台运动轨迹垂直的平面内以卫星平台为圆心作机械旋转;顺轨方向只用一个固定天线 $c$ ,其极化与 $a$ 、 $b$ 相同,波束在测量过程中始终指向成像中心并决定了成像区域.这时的成像中心将不再在 $y$ 轴上,而是向前(或向后)移动了80km.当天线 $a$ 、 $b$ 旋转时,天线 $c$ 与其中一个交轨天线构成的基线在整个采样区间将覆盖空间频率域的全部 $+f_x$ 区域,即除 $f_y$ 轴以外的1、4象限;交轨天线 $a$ 、 $b$ 之间构成的基线在入射面法线方向上的投影将伴随 $a$ 、 $b$ 的旋转而变化,覆盖频域图的 $f_y$ 轴.这样,适当的选取采样点,就可以通过 $ac$ 之间、 $bc$ 之间和 $ab$ 之间的三个相关器获得需要的所有空间频率采样,如图6(b)所示.这时交轨天线的旋转半径为140个波长,顺轨天线 $c$ 距卫星平台旋转中心的距离是25个波长.

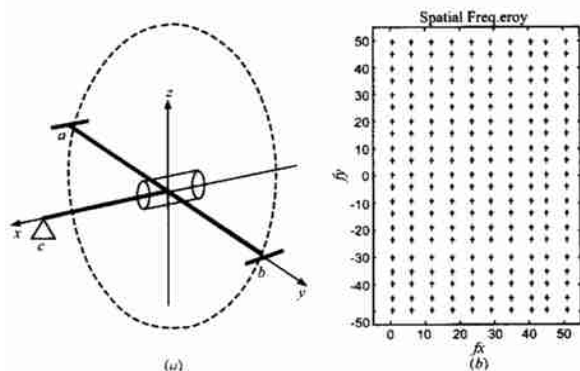


图6 方案二的天线单元、扫描系统和空间频率覆盖

图7是数值模拟的反演结果,可以看出比方案一的结果稍差一些,主要原因是由于采样点位置不对称造成的,因为所有的频域分析都是针对成像区域中心,在对称采样结构时误差小,但在不对称采样结构时误差就显现出来了.如果进

一步对基线设计和采样方案进行优化,反演精度有可能进一步提高。

对实际应用,必须考虑机械旋转的角速度和平台移动速度对采样的影响.通常近地轨道卫星的移动速度约为7.8km/s,通过160km采样区间用时20.5s,如完成9次对于 $f_x$ 的采样,则旋转4.5周,需要的交轨方向两个天线的旋转角速率为0.22周/秒,目前这样的旋转速率在技术上可实现,因而,该采样方案应该是可行的。

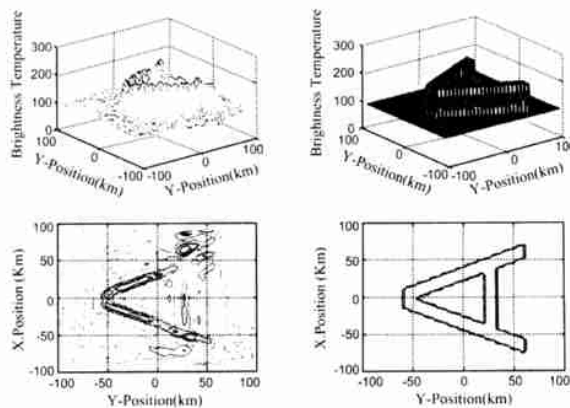


图7 方案二的数值模拟反演结果

下面讨论一下此方案的工程实现问题.如果用长臂伸杆支撑天线 $c$ ,工程上可实现的基线长度会受到限制.如果用子、母星结构则可以解决这一问题.而交轨方向的两个天线可以通过在旋转中逐渐释放的线缆连接方式来连接载有对称振子天线和前端放大器的两个子星.这一方案对纳卫星的应用提供了适当用武之地。

## 4 结论

通过理论分析与计算,本文初步讨论了二维综合孔径成像微波辐射计的基线结构的优化设计问题以及可见度函数的采样方案.由理论分析和数值模拟的结果可得出如下结论:

- (1) 利用卫星平台的移动,可以在顺轨方向上减少干涉基线的数量,稀疏天线单元
- (2) 将机械扫描和干涉测量相结合,可以进一步稀疏天线单元,实现更高的空间分辨率
- (3) 采用数值反演方法,可以在一定程度内容忍空间频率覆盖中的不均匀问题

总之,干涉式的综合孔径微波辐射计可以极大的稀疏天线孔径,并通过折叠甚至子母星,在星载应用中实现比传统辐射计更高的空间分辨率。

下一步还需要深入考虑:辐射测量灵敏度;长基线干涉测量的模糊性;辐射定标等问题.由于空间分辨率是限制星载微波辐射计发展的主要因素,相信在上述问题进一步突破的基础上,综合孔径微波辐射计将会成为新一代的星载高分辨率成像遥感器,并在土壤湿度测量、海水含盐度测量、大气成像、农业、气象等众多应用领域中大显身手。

## 参考文献:

- [ 1 ] Thompson A R, J M Moran, G W Swenson Jr. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy [M]. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994.
- [ 2 ] Ruf C S, C T Swift, A B Tanner, 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, A Griffis. Initial results in the development of a synthetic aperture microwave radiometer [J]. IEEE Trans GRS, 1990, 28: 614 - 619.
- [ 4 ] Edelson, et al. Interferometric radiometer [P]. US Patent: 4,990,925, 1984.
- [ 5 ] Koniyama K. High resolution imaging by supersynthesis (SSR) for the passive microwave remote sensing of the earth [J]. Electronic Letters, 1991, 27: 389 - 390.
- [ 6 ] 黄永辉, 吴季, 董晓龙. 综合孔径微波辐射计顺轨方向亮温反演算法的研究 [J]. 电子学报, 2000, 12.
- [ 7 ] Borges A, et al. The MIRAS demonstrator pilot project [C]. Proceedings of IGARSS 2000.

## 作者简介:



黄永辉 男, 1974 年 4 月生于辽宁鞍山, 清华大学电子工程系毕业, 中科院空间中心空间飞行器设计专业硕士, 攻读硕士学位期间从事微波辐射机理及综合孔径微波辐射计成像机理和算法的研究, 研制成功可以实时显示的成像算法并用于工程实际, 现为大唐电信 WCDMA 事业部工程师, 从事 Node B 子系统的研发工作。



吴季 男, 1958 年 4 月出生于北京, 北京邮电大学电磁场与微波技术专业硕士, 丹麦技术大学电磁所博士, 现为中科院空间中心研究员, 中国空间科学学会理事, 中国地球物理学会理事, 中国电子学会微波分会微波遥感专业委员会副主任委员, IEEE 高级会员, 主要从事微波遥感机理与技术研究, 微波辐射成像技术研究, 综合孔径微波辐射计理论与技术研究, 2001 年负责研制成功我国第一台 C 波段综合孔径微波辐射计, 同时还承担利用微波遥感进行土壤湿度的测量, 天线与电波传播, 空间探测技术与卫星工程等方面的研究工作。