

# 一种实用的抗混叠星形天线阵列布局

赵 锋<sup>1,2</sup>, 苗俊刚<sup>2</sup>, 万国龙<sup>2</sup>, 胡岸勇<sup>2</sup>, 薛 永<sup>2</sup>

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 8mm 毫米波段综合孔径微波辐射计成像时, 由于接收机尺寸的限制, 基线最小间距过大, 没有不混叠区域. 背景对消法能消除小尺寸可移动物体成像中的混叠问题. 而对于不可移动物体成像时, 不能使用背景对消法来消除混叠. 为了解决这种情况的混叠问题, 本文提出了一种带子 Y 阵列的星形天线布局, 这种布局能够将最小间距减小一半, 因此能减少混叠程度. 通过比较这种布局与 Y 形布局的仿真结果, 表明此星形天线布局混叠较小, 成像质量较高.

**关键词:** 综合孔径微波辐射计; 天线布阵; 可视度平面; 星形阵列; Y 形阵列; 基线

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0678-05

## A Practical Anti-Aliasing Starlike Array in 2D Aperture Synthesis Microwave Radiometer

ZHAO Feng<sup>1,2</sup>, MIAO Jun-gang<sup>2</sup>, WAN Guo-long<sup>2</sup>, HU An-yong<sup>2</sup>, XUE Yong<sup>2</sup>

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** There is no alias-free FOV when the least space is more than 3.07 wavelength because of bigger receiver size in 8mm aperture synthesis microwave radiometers. Background cancellation method which can eliminate aliasing in removable object's imaging is no useful when the scene cannot move. This paper give a new starlike array whose visibility samples is half of receiver size, so there is no severity aliasing problem in the new starlike array. The result of the emulate experiment show the imaging quality of starlike array is more higher than the quality of Y array.

**Key words:** aperture synthesis microwave radiometers; array; visibility samples; starlike array; Y array; baseline

### 1 引言

综合孔径微波辐射计通过不同基线干涉测量的复相关值进行处理从而反演被观察区域的亮温分布, 这些干涉测量的复相关值就是所谓的可视度函数.

在远场且忽略条纹洗涤函数的影响条件下, 可视度函数  $V(u_{mn}, v_{mn})$  与修正亮温分布  $\hat{T}(\xi, \eta)$  互为傅立叶变换关系<sup>[1-3]</sup>:

$$\hat{T}(\xi, \eta) \stackrel{\text{FFT}}{\leftrightarrow} V(u, v)$$

其中:  $(\xi, \eta) = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi)$  为方向余弦坐标;  $(u_{mn}, v_{mn}) = (x_m - x_n, y_m - y_n)/\lambda$  是归一化的基线;  $\hat{T}(\xi, \eta) = T(\xi, \eta)F_m(\xi, \eta)F_n^*(\xi, \eta)/\sqrt{1-\xi^2-\eta^2}$  为修正亮温分布;  $T(\xi, \eta)$  是场景亮温分布;  $F_{m,n}(\xi, \eta)$  是  $m$  通道与  $n$  通道的归一化天线方向图; 由于方向余弦坐标  $(\xi, \eta)$  取值受限在  $[-1, 1]$  区域且  $\xi^2 + \eta^2 \leq 1$ , 因此在无限大  $uv$  面上采样间隔为半波长的矩形网格上(六

变形采样为  $1/\sqrt{3}$  倍波长的六边形网格)的可视度函数值就可恢复修正亮温分布. 一般扩展场景相关系数(由天线亮温归一化的可视度函数)随基线长度迅速下降(图 1), 从几倍波长到几十倍波长基线的相关系数数量级为  $10^{-3}$  到  $10^{-4}$ <sup>[4]</sup>. 当基线长度为大于 5 倍波长时, 通道间相关系数一般小于 0.01, 只有基线长度小于 3 倍波长时, 相关系数才大于 0.1(即修正亮温的能量主要集中在 3 倍波长内低频). 然而对于 8mm 波段(BHU-2D 为 8.8mm), 由于接收机尺寸的限制, 最小间隔大于 27mm (3.07 倍波长), 使得混叠很严重. 如果最小间距减半, 天线就必须用较长的波导与接收机连接, 物理安装结构复杂, 要安装下所有接收机需要很长的波导, 而且大大提高了辐射计噪声系数. 本文提出了一种带一个子 Y 阵列的星形天线布局, 其中包括 6N 个天线组成的星形加上由 4 个天线构成的子 Y 阵列. 星形阵列的天线最小间距都不小于接收机尺寸, 因此天线能与接收机直接连

接.对于子 Y 阵列,天线数目较小,使用很短的波导就可实现与接收机连接.对于两种方向图进行了仿真,结果表明混叠很小,相对于同等天线个数的 3.07 倍波长 Y 阵列,很大程度上提高了成像质量.

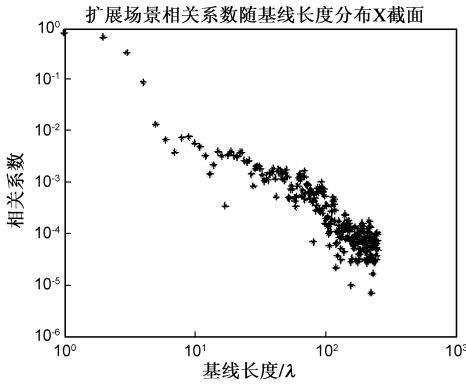


图1 扩展场景相关系数(由天线亮温归一化的可视度函数)分布

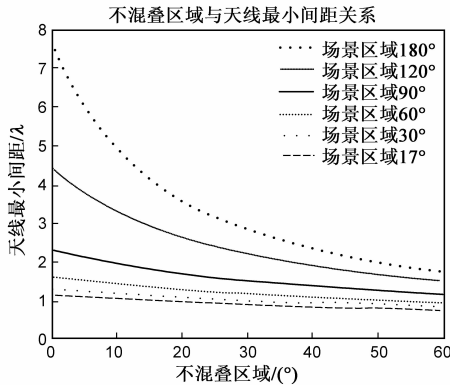


图2 不混叠区域与天线最小间距的关系

## 2 背景对消法来消除混叠

为了增加不混叠区域, BHU-2D 采用 24 单元交错 Y 形阵列<sup>[5]</sup>(Y 形阵列的不混叠区域是 T 形阵列的  $2/\sqrt{3}$  倍),这时不混叠区域与天线最小间距的关系如图 2 所示,对于全视场场景,当最小间距大于 1.15 倍波长 (10.1mm)时无不混叠区域,对于 T 形阵列,当最小间距大于 1 倍波长 (8.8mm)时无不混叠区域.因为 BHU-2D 的接收机远大于这两个临界值,因此无不混叠区域.

采用先对背景成像得可视度样本  $V_0(u, v)$ , 移入需要成像的物体后再次成像得可视度样本  $V_1(u, v)$ , 用  $V(u, v) = V_1(u, v) - V_0(u, v)$  作为反演成像的可视度函数.这样既可消除辐射计的固有相关偏置,又可消除背景对移入物体的混叠.

对于最小间距小于  $3.07\lambda$  的 Y 形或 T 形阵列,背景对消后,  $\pm 11^\circ$  内移入物体成像,不发生混叠.最后反演得到的亮温分布是移入物体与背景亮温差.对于同步轨道卫星成像时,由于地球受限在  $\pm 8.5^\circ$  视场内,当宇宙背景亮温已知时,可用减除宇宙背景来消除混叠.

BHU-2D 原理样机采用 T 形阵列,每臂 3 个天线,共 10 个天线,天线间最小间距为  $2.84\lambda$ ,背景对消后,  $\pm 11^\circ$  内移入物体成像,不发生混叠.对加热的 U 形管成像结果如图 3 所示.

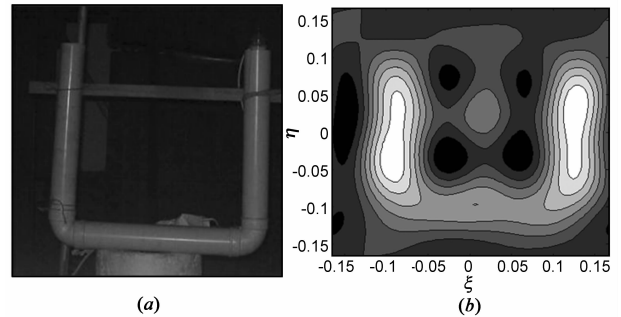
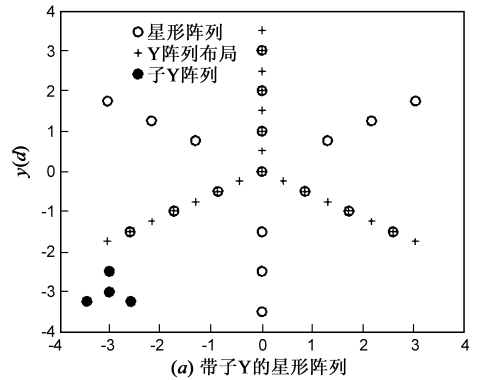


图3 加热的U形管背景对消成像结果

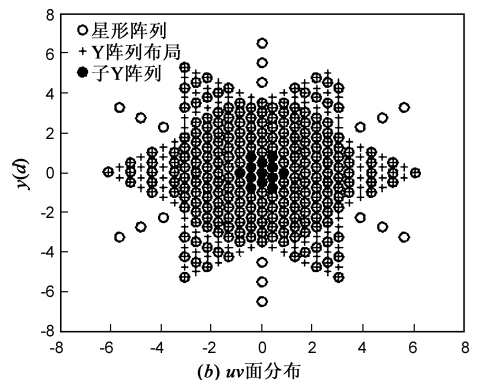
## 3 带子 Y 的星形天线阵列布局

在地球环境遥感、军事侦察等实际应用中,背景对消法常常无法适用.降低混叠的方法只有减小天线间距或减小天线方向图波束宽度来解决.由于接收机尺寸限制,最小间距不小于 3.07 倍波长.这样的 Y 形阵列要求方向图在  $\pm 30^\circ$  外小于  $-30\text{dB}$ ,完全依靠减小天线方向图波束宽度不可能实现.采用带子 Y 的形星形阵列布局则可缓解这一难题.带子 Y 的星形阵列布局如



(a) 带子 Y 的星形阵列

(臂 1,2,3 相邻天线间隔为  $d$ ; 臂 4,5,6 第一个天线离中心间隔  $1.5d$ ,以后相邻天线间隔为  $d$ ; 子 Y 阵列间隔为  $0.5d$ )



(b) uv 面分布

(十字为理想 Y 形阵列可视度采样,圆圈为星形阵列可视度采样,其中实心圆为子 Y 的可视度采样)

图4 带子 Y 的星形阵列及其 UV 面分布

图 4(a)所示. 臂 1,2,3, 相邻天线间隔为  $d$  (其中  $d$  为接收机尺寸); 臂 4,5,6, 第一个天线离中心间隔  $1.5d$ , 以后相邻天线间隔为  $d$ ; 子 Y 阵列间隔为  $0.5d$ . 其可视度采样面除六角外等同于间隔为  $0.5d$  的 Y 形天线阵列 (六个角隔行漏采了可视度样本, 中间完全相同), 如图 4(b)所示. 由于星形阵列中天线间距较大, 因此天线可与接收机直接相连. 子 Y 天线与接收机相连时需要较长波导, 天线数目较小, 设计较为简单. 这样就能用最小间距大于  $d$  的星形 Y 阵列基本实现最小间距  $d/2$  的 Y 阵列可视度采样, 从而减少了混叠.

带子 Y 的星形阵列比最小间距  $d/2$  的 Y 阵列天线总数多一个. 当带子 Y 的星形阵列天线总数为  $3N + 2$ , 其中  $N$  为星形阵中每条直线的天线数目, 则所有基线数为  $4.5N^2 + 6N + 1$ , 有冗余的基线数为  $6N - 9$  个, 因此冗余度只比 Y 形阵列稍高.

### 4 仿真结果

BHU-2D 系统采用的是抛物面天线, 其天线方向性图如图 5 所示.

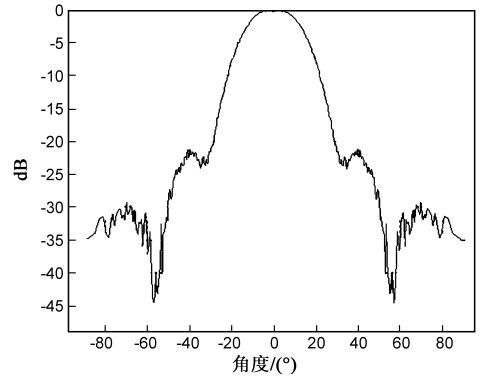


图 5 成像仿真所用天线方向图

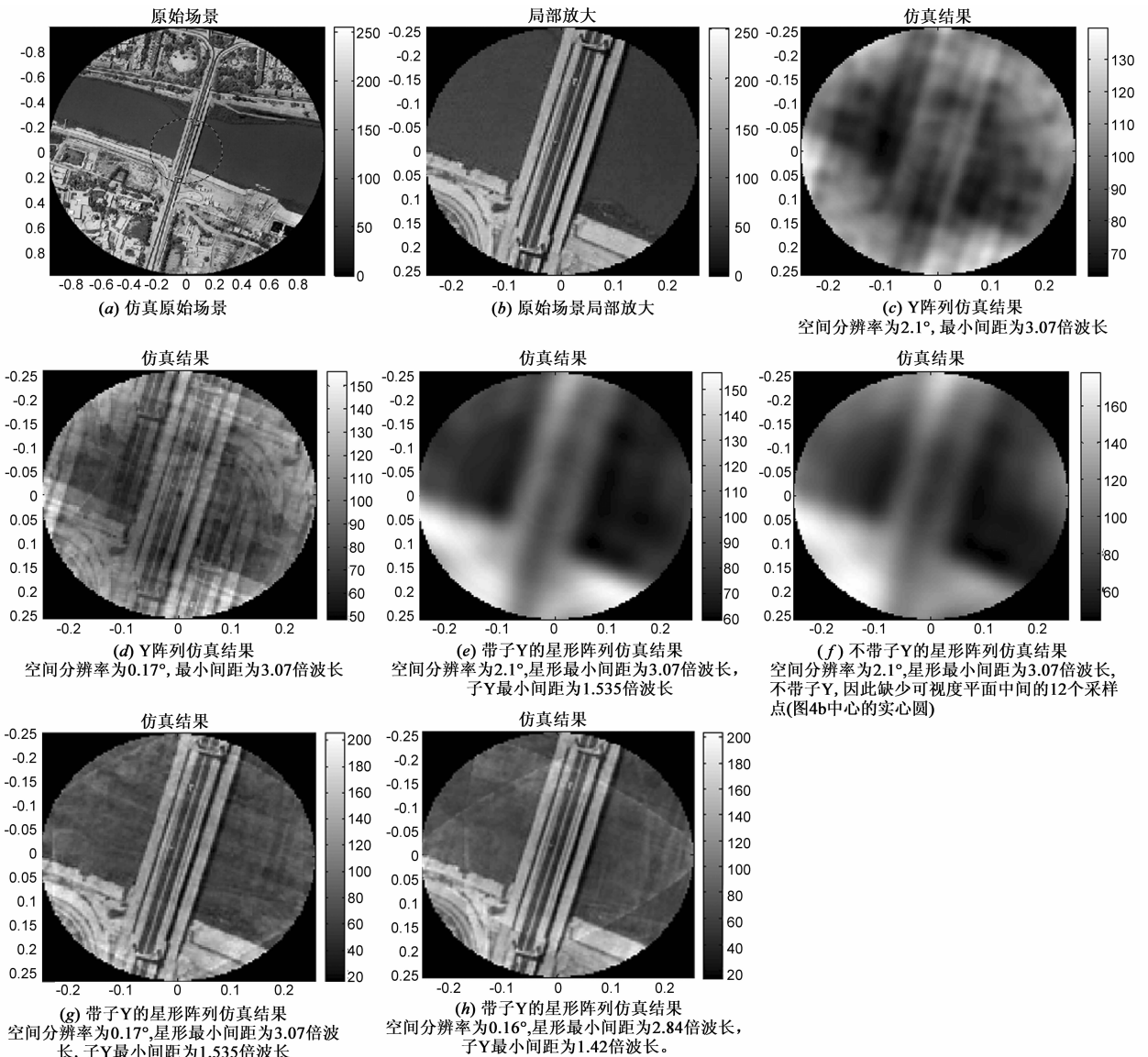


图 6 星形阵列与 Y 阵列成像仿真结果

在两种空间分辨率条件下进行了仿真,仿真结果如图 6 所示,可以看出采用带子 Y 的星形阵列可减少混叠,极大的提高成像质量,如图 6(e)、6(g)相对于 6(c)、6(d).当天线数目多达 302 个时,基本恢复原始场景,达到较好的成像效果,如图 6(g).反演成像时,子 Y 的空间低频分量可以用 Flat-G 矩阵成像<sup>[6]</sup>,星形的空间高频分量用 FFT 成像,然后两者相加得反演图像.对于某些应用,关注的信息主要是空间较高频分量,则可以用不带子 Y 的星形阵列,如图 6(f).这样就可以增大星形阵列中的天线尺寸来达到较大的天线实际接收面积.

### 5 主瓣混叠与边界混叠的折衷

从图 6(g)及 6(h)可以看出,反演亮温有几条亮温较高的线混入了 30°反演视场.一种更明显的情况为当最小间距为 1.15 倍波长时,中心为一亮点(实际为六条亮线在中心相交),如图 7 所示.以下分析这些现象产生的原因以及合适选择最小间距来折衷边界混叠与主瓣混叠.

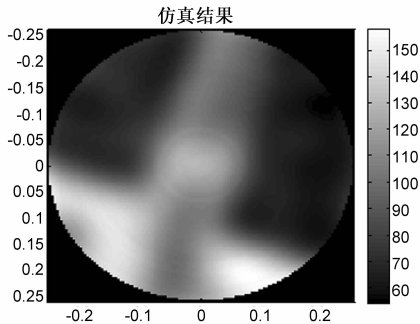


图7 最小间距为1.15倍波长时星形阵列成像仿真结果

在忽略条纹洗涤函数时,修正亮温与可视度函数互为傅立叶变换关系.而修正亮温与原始亮温关系为:

$$\hat{T}(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) F_m(\xi, \eta) F_n^*(\xi, \eta) / \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}$$

其中 $\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}$ 称倾斜因子, $F_{m,n}(\xi, \eta)$ 为归一化天线方向图,比例系数 $F_m(\xi, \eta) F_n^*(\xi, \eta) / \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}$ 称天线方向图因子.当最小间距大于 0.91 倍波长时,无不混叠区域,必有场景混入 30°反演视场,因此应尽量减

小混叠影响.对于 BHU-2D 系统采用的抛物面天线而言,由于接收机尺寸的限制,即使采用带子 Y 的星形阵列,这个最小值也只能达到 20dB.具体分析如下: BHU-2D 系统采用的抛物面天线方向图如图 5 所示,其天线方向图因子如图 8 所示.天线方向图因子大于 20dB 的方向余弦区域有主瓣区域 $[-0.48, 0.48]$ 及边界区域 $(-1, -0.98], [0.98, 1)$ ,如图 8 所示.当子 Y 最小间距小于 1.56 倍波长(即星形最小间距小于 3.12 倍波长)时,主瓣区域在 30°视场内混叠小于 20dB.

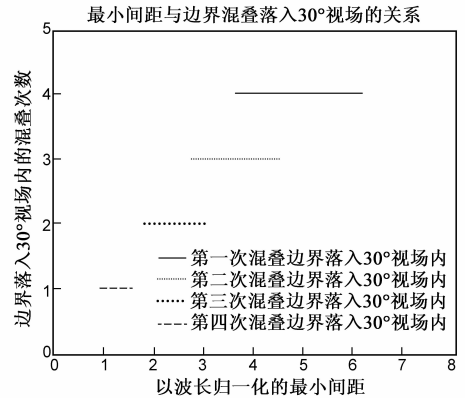


图9 最小间距与边界落入视场关系

从图 9 可看出在子 Y 最小间距介于 1.56 与 1.83 倍波长之间时,边界区域在 30°视场内混叠小于 20dB.因此最优最小子 Y 间距为 1.56 倍波长,当小于此值但大于 1.15 倍波长时,边界区域在 30°视场内有混叠问题(同时主瓣区域混叠减小),如图 7 及图 6(g);当大于此值但小于 1.83 倍波长,主瓣区域混叠增大(边界区域基本无混叠问题).因此对于方向图为图 5 的抛物面天线最优的子 Y 最小间距为 1.56 倍波长,星形最小间距为 3.12 倍波长,最大混进 30°视场区域的混叠信号为 -20dB.由于边界混叠只增加几条亮线(实际应用中,一般±1 边界附近为冷空,是地面平均亮温的 -20dB 以下,因此边界区域约为 $(-1, -0.997], [0.997, 1)$ ,边界的混叠仅为几条更细的线),因此若在图像后处理能去除其影响时,方向图为图 5 的抛物面天线的子 Y 最小

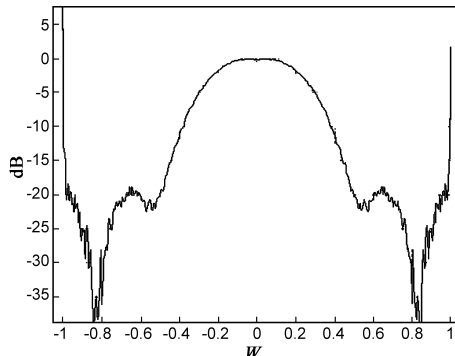


图8 天线方向图因子(即 $F_m(\xi, \eta) F_n^*(\xi, \eta) / \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}$ ,其中 $w = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ )

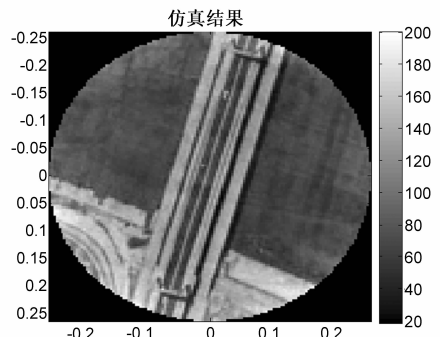


图10 带子Y的星形阵列仿真结果(星形最小间距为3.12倍波长,子Y最小间距为1.56倍波长)

间距可设为 1.52 倍波长,星形最小间距为 3.04 倍波长,这时最大混进  $30^\circ$  视场区域的主瓣区域为 21dB. 图 10 为星形最小间距为 3.12 倍波长,子 Y 最小间距为 1.56 倍波长,空间分辨率为  $0.17^\circ$ ,相对于图 6(g)没有明显的边界混叠.

## 6 结论

本文给出了一种带子 Y 的星形天线阵列布局. 此星形天线阵列中的天线间距均大于接收机尺寸,子 Y 阵列相邻天线为接收机尺寸一半,需要用长波导连接天线与接收机. 整个天线阵列的可视度采样面比最小间隔为接收机尺寸的 Y 形天线阵列的可视度采样频率增加一倍,因此很大程度上减少了混叠. 同时分析了在此星形布局下主瓣混叠与边界混叠的折衷,得出最优的子 Y 最小间距为 1.56 倍波长,星形最小间距为 3.12 倍波长. 用实际 BHU-2D 天线的方向图进行“桥”场景成像仿真,仿真结果表明混叠很小.

### 参考文献:

- [1] A Camps, I Corbella, M Vall-Ilossera, N Duffo, F Marcos, F Martinez-Fadrique, M Greiner. The SMOS end-to-end performance simulator: description and scientific applications [A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003(IGARSS 2003)[C]. Toulouse, France: IEEE, 2003. 13 - 15.
- [2] 赵锋,苗俊刚,万国龙,薛永. 接收机的非理想性对复相关值测量的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 896 - 900.  
Zhao Feng, Miao Jun-gang, Wan Guo-long, Xue Yong. Impacts of imperfect receivers on complex correlation of 2D aperture

synthesis microwave radiometer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(8): 896 - 900. (in Chinese)

- [3] B Lambrigtsen, W Wilson, A Tanner, T Gaier, C Ruf, J Piepmeyer. GeoSTAR—A microwave sounder for geostationary satellites[A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004 (IGARSS 2004) [C]. Alaska: IEEE, 2004. 777 - 780.
- [4] F Torres, A B Tanner, S T Brown, B H Lambrigsten. Robust array configuration for a microwave interferometric radiometer: application to the GeoSTAR project[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2007, 4(1): 97 - 101.
- [5] A Camps, J Bara, F Torres, I Corbella. Extension of the CLEAN technique to the microwave imaging of continuous thermal sources by means of aperture synthesis radiometers [J]. Progress In Electromagnetics Research, 1998, 2(18): 67 - 83.
- [6] A Tanner, W Wilson, B Lambrigsten. Initial result of the Geostationary synthetic thinned array radiometer (GeoSTAR) demonstrator instrument [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2007, 45(7): 1947 - 1957.

### 作者简介:

赵 锋 男, 1972 年 2 月生于新疆, 江苏徐州人, 博士, 研究方向为微波遥感, 微波毫米波成像, 微波测量系统.  
E-mail: zhao\_xiang\_feng@tom.com.

苗俊刚 男, 1963 年 7 月生于河北, 德国理学博士, 教授, 博士生导师, 长江学者, 国家杰出青年科学基金获得者, 主要研究方向包括: 电磁辐射与散射测量, 微波遥感, 微波毫米波成像, 微波天线, 微波测量系统.