

文章编号: 1007-4619 (2004)05-0409-05

利用 BG 算法提高微波辐射计空间分辨率

李靖, 王涛, 张升伟, 姜景山

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 国家 863 计划微波遥感技术实验室, 北京 100080)

摘要: 将 BG 算法应用于增强微波辐射计空间分辨率, BG 算法的基本原理是, 如果测量密度大于仪器本身的分辨率, 便可找到周围测量点的线性组合而得到一幅较高分辨率的图像, 此原理同样适合其它遥感仪器。借鉴 Stogryn 的研究成果, 在应用 BG 算法的同时, 引入可调参数, 它能够调整空间分辨率和系统的灵敏度之间的约束关系, 使增强后的图像能够进行折衷处理, 而不至于因为过分增强分辨率而使图像的斑点噪声增大, 降低图像的质量。应用 BG 算法, 对 20、50 和 90GHz 的微波仿真图像进行了图像增强处理, 结果表明图像分辨率得到了增强, 空间分辨率提高的倍数依赖于数据采样密度。

关键词: BG 算法; 微波辐射计

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

微波辐射计在海洋、大气研究等方面的应用已经众所周知, 但是微波辐射计也有其本身系统的局限性, 即其空间分辨率低。提高微波辐射计的空间分辨率有几种方法, 一是增大天线口径, 但对星载应用来说天线口径不可能太大; 二是提高微波辐射计的工作频率, 但不同频率对不同参数的敏感程度不一样, 所以还不是单纯提高工作频率那么简单; 三是采取合成孔径技术, 带来的问题是相关器数量的增加, 使仪器的体积和重量暂时无法降低, 但随着技术的发展, 合成孔径技术将有广阔的应用前景; 四是通过软件方法实现, 在扫描成像时进行过采样, 然后通过对图像的重建^[1-5]或天线方向图的反卷积^[6]等方法来提高微波辐射计的空间分辨率, 本文研究的 BG 算法就是其中的一种方法。

2 BG 算法在微波辐射计分辨率增强中的应用

由于星载仪器天线尺寸的限制及地球一大气系

统的微弱辐射, 因此需要星载仪器有较大的视场或较大的有效天线口径, 以保证有足够大的信噪比。考虑一个星载辐射计系统, 如图 1, 轨道高度为 h , 指向为 \hat{s}_0 , 则天线测量的立体角 $d\Omega$ 为 $d\Omega = (-\hat{s} \cdot \rho/s^2) \cdot dA$, ρ 为地心指向面元 dA 的单位矢量, \hat{s} 为天线指向 dA 的单位矢量, s 为天线到面元 dA 的距离。天线的亮度温度 T_A 是天线的增益函数 G 和被测地物亮温 T_B 乘积的积分, 即

$$T_A(\hat{s}_0) = \int_E G(\hat{s}_0, \hat{s}) T_B(\rho, \hat{s}) (-\hat{s} \cdot \rho/s^2) dA \quad (1)$$

E 为卫星对地观测区域。

应该注意到在整个测量不是瞬间完成的, 而是要有一段时间, 一方面是测量仪器的扫描过程, 另一方面是卫星本身的运动。可以对 (1) 式在积分时间内取平均来解决, 即

$$T_A = \frac{1}{\tau} \int_{t_i - \tau/2}^{t_i + \tau/2} \int_E G(\hat{s}_0(t), \hat{s}(t)) T_B(\rho, \hat{s}(t)) \times (-\hat{s}(t) \cdot \rho/s^2(t)) dA dt \quad (2)$$

一般被测目标的亮度温度在短时间内基本上无变化 (一般积分时间小于几十毫秒), 则第 i 个测量点天

收稿日期: 2003-02-10; 修订日期: 2003-04-01

基金项目: 本项目得到国防科技跨行业预研基金支持 (GF 编号: 00J7.2.9.ZK2401)。

作者简介: 李靖 (1967—) 男, 博士、研究员, 辽宁省沈阳市人。1990 年毕业于吉林大学, 获无线电专业理学学士学位; 1994 年于中国科学院长春地理研究所, 获地图学与遥感专业硕士学位; 1997 年于中国科学院电子学研究所, 获通讯与电子系统专业工学博士学位; 之后在中国科学院空间科学与应用研究中心作博士后研究工作, 现在德国科隆大学物理系作高级访问学者。获两项专利, 发表论文近 40 篇。主要从事微波、毫米波辐射计的分析与设计, 微波辐射计定标及定标源研究, 微波遥感理论研究及毫米波天线近场测量研究等。

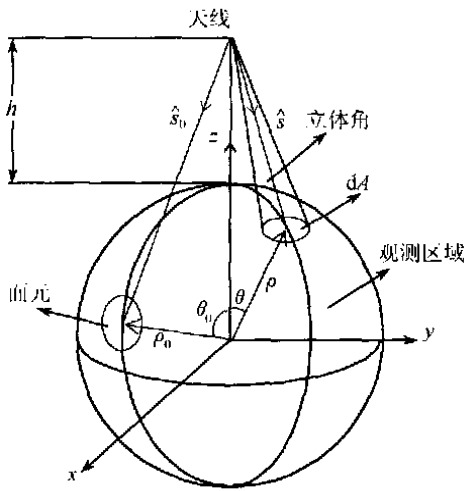


图 1 星载微波辐射计测量示意图

Fig. 1 Measurement illustration of spaceborne microwave radiometer

线接收的平均亮度温度为:

$$T_{Ai} = \int_E G_i(\rho) T_B(\rho) dA \quad (3)$$

其中

$$G_i(\rho) = \frac{1}{\tau} \int_{t_i - \tau/2}^{t_i + \tau/2} G(\hat{s}_0(t), \hat{s}(t)) \times (-\hat{s}(t) \cdot \rho / s^2(t)) dt \quad (4)$$

用 N 个有重叠的测量点的数据来反演地球上的某点 ρ_0 处的亮度温度, 这个问题在数学上就是典型的 Backus-Gilbert 问题, 即利用 N 个测量点的线性组合来求解 $T_B(\rho_0)$,

$$T_B(\rho_0) = \sum_{i=1}^N c_i T_{Ai} = \int_E \left[\sum_{i=1}^N c_i G_i(\rho) \right] T_B(\rho) dA \quad (5)$$

公式中 T_{Ai} 由(3)给出。不可能有一组合适的 c_i 来求得 $T_B(\rho_0)$ 的完全解, 所以问题就转化为寻找一组 c_i 使其线性组合的结果最接近 $T_B(\rho_0)$ 。

考虑一组积分方程

$$Q_R = \int \left[\sum_{i=1}^N c_i G_i - F(\rho, \rho_0) \right]^2 J(\rho, \rho_0) dA \quad (6)$$

以及归一化约束条件

$$\int \sum_{i=1}^N c_i G_i dA = 1 \quad (7)$$

选择合适的 F 和 J , 可使 Q_R 达到最小, 根据应用目的不同, F 和 J 有不同的选择。比如, 如果天线的旁瓣电平很大, 则可通过选取合适的 J 来降低副瓣电平的影响。一般选取 $J = 1$, F 在 A_0 区内为 $1/A_0$, 在 A_0 区外则为 0, 这种选择方法加上使(6)式最小, 便

可以最好的估计 A_0 区的亮度温度, 当然根据应用目的不同, 也有其它的选择方法。这种处理方法的负面影响是仪器的噪声会传递到求解的亮度温度之中, 随机噪声为 $(\Delta T_{ms})^2$, 求解的亮度温度误差为:

$$Q_N = c^T \bar{E} c \quad (8)$$

矢量 c 的元素为 c_i , \bar{E} 为误差矩阵。这里所涉及的噪声基本上是随机噪声, 因此在测量期间互不相关, \bar{E} 为对角矩阵, 对角线上的元素为 $(\Delta T_{ms})^2$, 为了使噪声传递最小, 利用(7)式的归一化条件使(8)式最小。如果简单地使用 BG 算法, 则在分辨率得到提高的同时, 也放大了系统的噪声, 使图像出现“斑点”。

Stogryn 研究了一种方法, 使其在分辨率和噪声之间进行平衡, 即将 Q_R 和 Q_N 联系在一起, 有如下关系式:

$$Q = Q_R \cos \gamma + \omega Q_N \sin \gamma \quad (9)$$

ω 使 Q_R 和 Q_N 的量纲保持一致, γ 为调整参数, 取值范围为 $0 - \pi/2$, 根据分辨率和噪声考虑的侧重点不同, 来选取不同的 γ 值。如果 $\gamma = 0$, 则意味着只考虑增强空间分辨率, 而不考虑系统噪声放大带来的副作用。

假设 \bar{G} 为 $N \times N$ 矩阵,

$$G_{ij} = \int G_i(\rho) G_j(\rho) dA \quad (10)$$

考虑(7)式的约束条件, 利用拉格朗日乘数法求极值,

$$H(c_i) = \cos \gamma \int \left[\sum_{i=1}^N c_i G_i - F(\rho, \rho_0) \right]^2 J(\rho, \rho_0) dA + \omega \sin \gamma \sum_{i=1}^N c_i^2 \varepsilon^2 - \lambda \left[\int \sum_{i=1}^N c_i G_i dA - 1 \right] \quad (11)$$

利用 $\frac{\partial H}{\partial c_i} = 0$, 可得:

$$c = z^{-1} \left[\cos \gamma v + \frac{1 - \cos \gamma u^T z^{-1} v}{u^T z^{-1} u} u \right] \quad (12)$$

其中:

$$u_i = \int G_i dA, v_i = \int \frac{1}{A_0} G_i dA, z \cos \gamma \bar{G} + \omega \sin \gamma \bar{E}$$

3 BG 算法的模拟仿真研究

由于现在国内还没有星载的微波辐射图像资料可以用来检验 BG 算法, 对于国外的资料, 我们又缺少遥感器硬件方面的信息, 如天线的增益函数等, 国外的资料也暂时不能使用。因此我们模拟生成一个微波辐射图像, 并用来作仿真, 检验 BG 算法的正确

性。模拟资料生成及处理过程大致如下:

- 构造一个分辨率较高的模拟图像;
- 构造天线增益函数;
- 利用增益函数对模拟图像进行取样,加入噪声,形成取样图像;

• 利用公式(5)计算每个像素点的亮度温度,形成微波辐射计增强图像。

下面详细介绍处理过程:

(1) 生成原始图像。如图2,图像大小为 300×300 个像素点,图中黑十字代表河流,并且宽度不一样,上半部分的宽度为 $1/L$,下半部分的宽度为 $2/L$,中间的河流的宽度为 L ,有3个亮的物体,两个小方块和一个圆,代表强辐射的隐身多目标,其中圆的直径为20个像素点。

(2) 读取增益函数。天线方向图如图3,从 -20° 到 $+20^\circ$,每隔 0.1° 取一个天线增益的数值,并存入天线增益的数据文件,以便将来用于计算。角度读取的范围的确定有一定的原则,一般选取增益下降 -15dB 或 -20dB 。

(3) 利用上面的天线,对图2的目标进行扫描成像,然后再加入噪声,获得取样图像,图4中的第一列图形便是各个频率通道取得的取样图像,即没有经过增强处理。

(4) 利用公式(5)对各个频率的取样图像进行

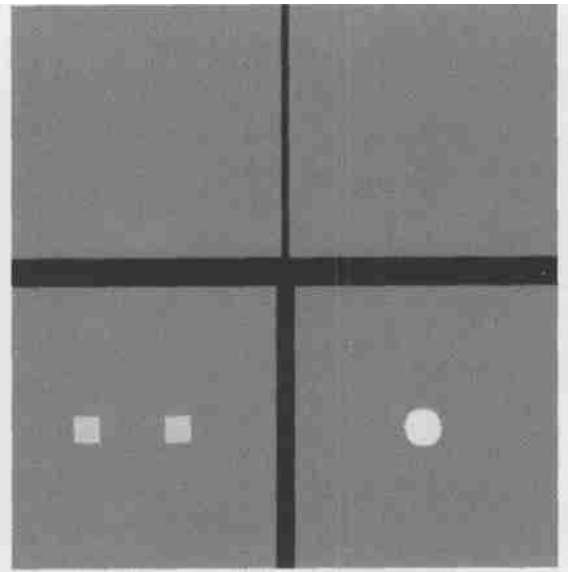


图2 原始仿真图像

Fig.2 Initial image for imitation

处理增强处理,结果如图4,处理时选取不同的调整参数 γ ,以便对比。 γ 越小图像的分辨率越高,但图像的斑点噪声也就越大。对不同应用,可以选取不同的 γ 值,来达到比较满意的结果。从 20GHz 、 50GHz 和 90GHz 的图像处理的结果可以看出,BG 算法对低频通道的分辨率增强效果明显,这也是我们所希望达到的预期结果。

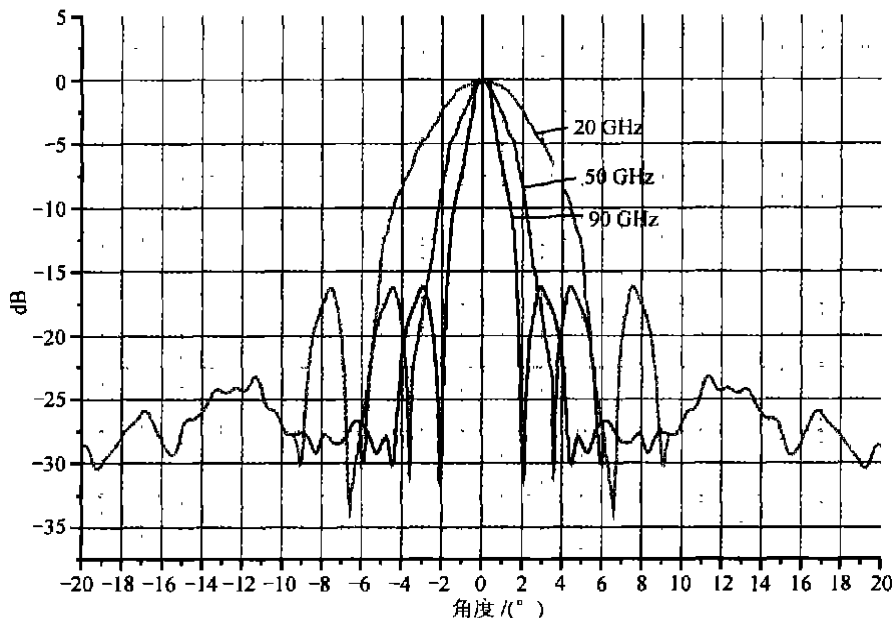


图3 天线方向图

Fig.3 Antenna pattern

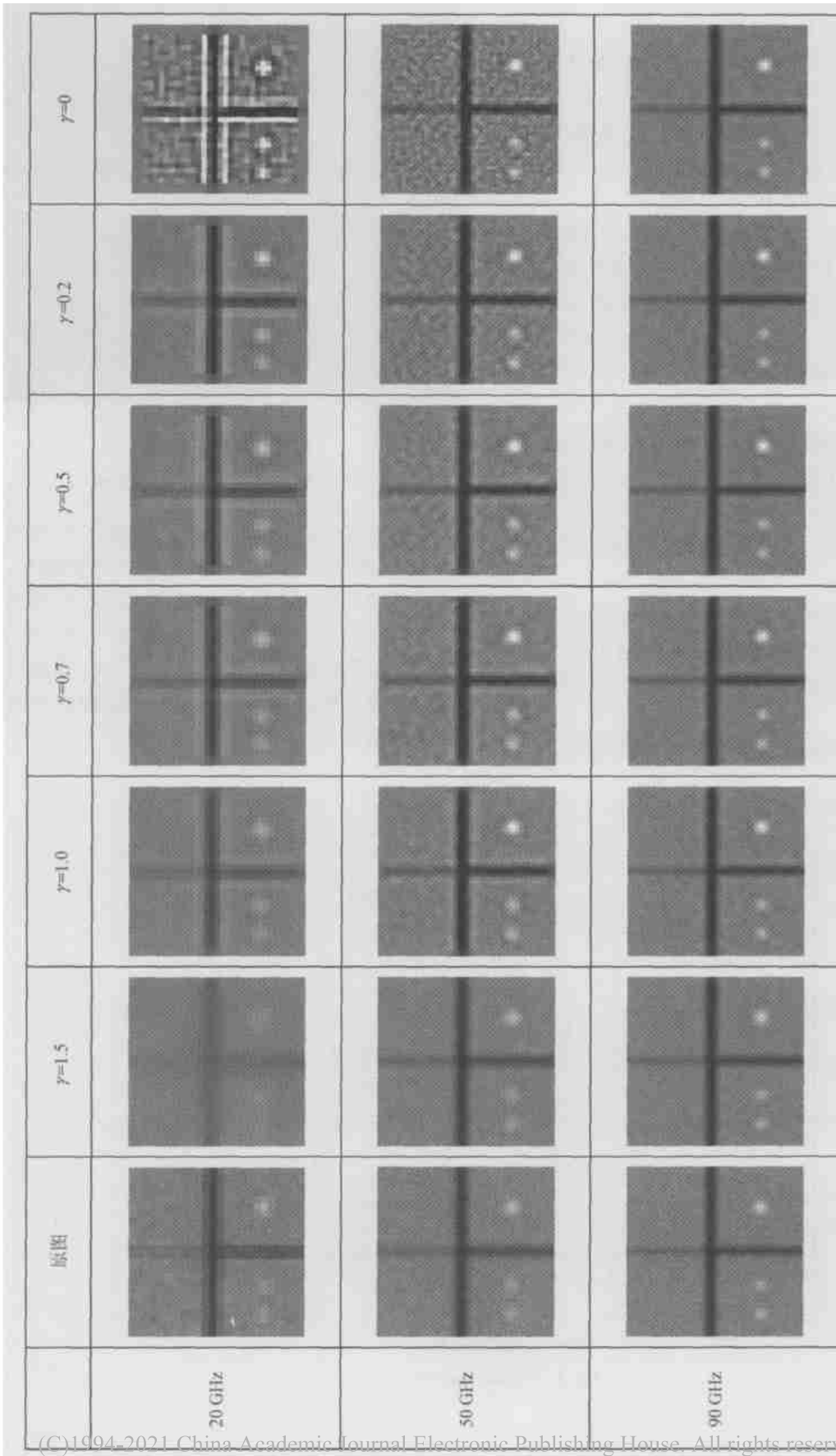


图 4 不同频率微波辐射图像增强处理结果
Fig. 4 The results of image enhancement at different frequency

4 结 论

本文详细阐述了BG算法的原理,并将此原理应用到增强微波辐射计空间分辨率,并借鉴Stogryn的研究,在应用BG算法的同时,引入可调参数,它能够调整空间分辨率和系统的灵敏度之间的约束关系,使增强后的图像能够进行折衷处理,而不至于因为过分增强分辨率而使图像的斑点噪声增大,降低图像的质量。人们可以根据不同需要,来调整可调参数。

利用以上原理,对仿真图像进行了图像增强处理,能够看出,随着可调参数的取值不同,图像的分辨率和“斑点”也不同,从通道上来看,BG算法对低频通道的图像增强处理效果明显。图像空间分辨率提高的倍数依赖于数据采样密度,采样密度越高,图像分辨率提高得越多。

参 考 文 献 (References)

[1] Early D S, Long D G. Image Reconstruction and Enhanced

Resolution Imaging from Irregular Samples[J]. *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(2):291—302.

[2] Long David G, Hardin Perry J, Whiting Peter T. Resolution Enhancement of Spaceborne Scatterometer Data[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(3):700—715.

[3] Robinson Wayne D, Kummerow Christian, Olson William S. A Technique for Enhancing and Matching the Resolution of Microwave Measurement from the SSM/I Instrument [J], *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(3):419—429.

[4] Long David G, Daum Douglas L. Spatial Resolution Enhancement of SSM/I Data [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(2):407—417.

[5] Sethmann Richard, Burns Barbara A, Heygster Georg C. Spatial Resolution Improvement of SSM/I Data with Image Restoration Techniques [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(6):1144—1151.

[6] Farrar Michael R, Smith Eric A. Spatial Resolution Enhancement of Terrestrial Features Using Deconvolved SSM/I Microwave Brightness Temperature [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **20**(2):349—355.

Spatial Resolution Enhancement of Microwave Radiometer Using BG Algorithm

LI Jing, WANG Tao, ZHANG Shengwei, JIANG Jingshan

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences,
National Microwave Remote Sensing Laboratory, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, a BG algorithm to enhance the spatial resolution of microwave radiometer is introduced. The main principle of the BG algorithm is as follows. A higher resolution image can be obtained using the linear combination of the adjacent measurements if the density of the measurement is larger than that of the instrument. The principle is also suitable for other microwave remote sensing sensors. The tunable parameter referenced from the study of Stogryn is introduced in this paper, which it can balance the tradeoff between the spatial resolution and the system sensitivity, and prevent increasing the flicker noise of the image too serious when high spatial resolution is pursued. Simulated images of microwave radiometer at 20, 50, and 90GHz were enhanced. The rate of spatial resolution enhancement depends on the density of the sampling.

Key words: BG algorithm; microwave radiometer