地球同步轨道圆迹 SAR 三维分辨特性分析

汪丙南* 向茂生
(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

摘 要：针对地球同步轨道圆迹 SAR (GEOsynchronous Circular SAR, GEOCSAR)具有平台轨道高、斜椭圆形空间轨迹和椭球面成像区域等特点，需建立新的理论分析模型对其分辨特性进行评估。该文从建立观测目标与 SAR 平台的空间几何关系出发，推导出目标点与场景中心对应的斜距差与圆迹方位角的函数关系，进而给出 3 维点扩展函数表达式，并得出分辨函数受 sinc 函数和贝塞尔函数共同影响的结论。然后重点分析了 3 维分辨特性随地理位置、信号带宽、圆迹半径和孔径大小的变化规律，最后通过信号仿真实验进一步对理论建模进行了验证。

关键词：合成孔径雷达(SAR)；圆迹 SAR；分辨率；地球同步轨道
中图分类号： TN957.2 **文献标识码**： A **文章编号**： 2095-283X(2012)03-0314-09
DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20044

Three-dimensional Resolution Analysis for Geosynchronous Circular SAR

Wang Bing-nan Xiang Mao-sheng
(*National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract: GEOsynchronous Circular SAR (GEOCSAR), having a high orbit, operating in a slant ellipse, and imaging in spherical surface, should be newly modeled to assess the resolution performance. In this paper, starting from modeling geometry, a function of slant range difference and orientation angle is deduced. Then we can obtain the three dimensional point spread function and make a conclusion of resolution affected by both sinc function and bessel function of first kind. Lastly, resolution with the variation of location of target, bandwidth, radius of orbit, and integral time is analyzed detailedly. Finally raw signal simulations show the validity of theoretical model.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Circular SAR; Resolution; Geosynchronous orbit

1 引言

地球同步轨道 SAR[1−3](Geosynchronous SAR)是将 SAR 技术应用到地球同步轨道上，具备大面积区域成像、长时间定点观测和突发事件实时响应等优势。SAR 成像要求传感器与目标发生相对运动，但理想的地球静止轨道是不存在的，受地球质量分布不均、日月引力等因素均会导致地球同步卫星与地球发生相对运动。通过轨道参数设计可使得卫星围绕静止点做一些规则运动，地球同步轨道圆迹 SAR (GEOsynchronous Circular SAR, GEOCSAR)正是通过控制轨道倾角为偏心率 2 倍，近地点幅角为 90°或 270°，使得卫星运动轨迹为圆形的。1999 年，意大利的一个研究小组利用地球同步轨道通讯卫星进行了寄生 SAR 实验[4,5]，由于在实验中，同步轨道卫星运动轨迹正好为近似圆形，从而首次验证了近似圆形卫星孔径的 3 维成像原理。GEOCSAR 是将圆迹 SAR[6,7]应用到地球同步轨道上，不仅具备普通地球同步轨道 SAR 的特点，还拥有高分辨 3 维成像的优势[5,6]。

与常规圆迹 SAR 相比，GEOCSAR 具备平台高、斜椭圆形运动轨迹、椭球面成像等特点，因而现有针对常规圆迹 SAR 的信号模型已不再适用。文献[8–12]详细分析了一般圆迹 SAR 3 维分辨特性，SAR 平台主要针对的是机载或圆形转台，平台运动为标准的水平圆形轨迹。然而，对于 GEOCSAR 而言，平台高度达 3.6 万公里，卫星轨迹并非为标准水平圆形，场景中心不总是位于地球静止点，成像区域为球形表面，因而现有的信号模型已不再适用。文献[13]仅建立了 GEOCSAR 2 维成像模型，并通过子孔径的方法分析和仿真了 GEOCSAR 的 2 维分辨函数，未针对其 3 维分辨特性展开分析。可见当前研究主要针对常规的圆迹 SAR，对于地球同步轨

2012-05-30 收到，2012-08-29 改回；2012-09-05 网络优先出版
国家 973 项目(2009CB724003)资助课题
*通信作者： 汪丙南 wbn@mail.ie.ac.cn

道圆迹SAR需建立新的信号模型对其3维分辨特性进行分析。

本文通过理论建模和信号仿真两种方法对GEOCSAR 3维分辨特性进行分析和验证。第2节建立了3维分辨特性理论分析模型，分别给出了全孔径和部分孔径下3维分辨率函数，并引入场景中心位置，得到GEOCSAR 3维分辨率雷达观测区域内分布函数。第3节通过回波模拟和成像处理来验证上述模型的正确性，分别验证了轴分辨率随地理位置变化规律、随信号带宽变化规律和随孔径大小变化规律，实验验证了信号仿真结果与分析模型的一致性。针对理论分析和仿真验证的结果第4节做出了结论。

2　GEOCSAR 3维分辨率分析

2.1 空间几何模型

在分析3维成像信号模型之前，首先需建立地球同步轨道SAR空间几何模型。GEOCSAR对地观测示意图如图1所示，o_e是地球质心，x轴指向同步轨道卫星地球静止点 o_s(圆形或椭圆形轨迹的中心，位于赤道上方)，xo_ey平面为地球赤道面，z轴指向北极点。SAR平台位于 s，成像区域用网格表示，o点为场景中心，其地理纬度、经度为(ϕ ,Λ)。通过控制同步轨道卫星轨道参数(倾角，偏心率和升交点赤经)可使得平台达到圆形运动轨迹，SAR平台在 o_e-xyz 中的坐标可表示为[13]

$$\begin{cases} x_s \approx \sqrt{(a - R_g\cos\theta/2)^2 - R_g^2} \\ y_s \approx R_g\sin\theta \\ z_s \approx R_g\cos\theta \end{cases} \tag{1}$$

其中 $R_g = ai$， a 和 i 分别为轨道长半轴和轨道倾角，θ 为平近心角。可见平台轨迹在 yz 平面内的投影为半径 R_g 的圆。为便于分析3维分辨率，设置 T 为场景中心附近任意目标点。由于地球自身为一个球体，不能直接在 o_e-xyz 坐标系内讨论GEOCSAR 3维分辨率，因而建立了场景坐标系 o-$x'y'z'$。如图1所示，x'指向地理正南，y'指向地理正东，z'垂直地面向上。

2.2 3维成像信号模型

本节从空间几何模型出发，建立一般情形下卫星与任意目标点间斜距模型，再结合一般CSAR信号模型，推导出GEOCSAR 3维成像信号一般表达式。根据合成孔径的大小本节推导了全孔径和子孔径情形下GEOCSAR 3维信号分辨率函数。

2.2.1 全孔径3维成像信号模型　SAR图像的形成是基于平台路径的采样，然后对每个采样进行相干叠加获得。基于此，首先对SAR信号在距离向经过匹配滤波，然后沿路径进行相干累加。设雷达发射波长为λ、带宽为 B 的线性调频信号，那么全孔径SAR信号可表示为

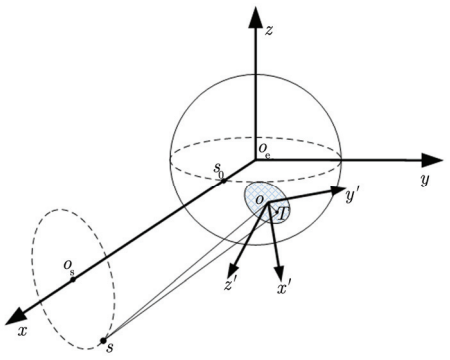


图1 GEOCSAR对地观测示意图

$$S = C_0\int_{-\pi}^{\pi}\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}\Delta R(\theta)\right)\exp\left(-j\frac{4\pi\Delta R(\theta)}{\lambda}\right)\mathrm{d}\theta \tag{2}$$

其中斜距差 $\Delta R(\theta) = R_t - R_0$， θ 为圆迹方位角(可以看成平近心角)，c 是光速，C_0 为常数。在讨论分辨率时，假设目标 T 位于场景中心 o 附近，因而sinc函数项在积分区间内变化较小，可提到积分号外面，式(2)变为

$$S = C_0\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}\Delta R(\theta)\right)\int_{-\pi}^{\pi}\exp\left(-j\frac{4\pi\Delta R(\theta)}{\lambda}\right)\mathrm{d}\theta \tag{3}$$

根据图1的几何关系，设卫星平台、场景中心和目标 T 的坐标分别为 (x_s,y_s,z_s)， (x_0,y_0,z_0)， $(x_0+d_x,y_0+d_y,z_0+d_z)$，那么目标 T 与场景中心对应的斜距差可表示为

$$\begin{aligned}\Delta R(\theta) &= |\,\mathbf{Ts}\,| - |\,\mathbf{os}\,| \approx \mathbf{oT}\cdot\mathbf{os}\,/\,|\,\mathbf{os}\,| \\ &= \frac{(x_s-x_0)d_x + (y_s-y_0)d_y + (z_s-z_0)d_z}{\sqrt{(x_s-x_0)^2+(y_s-y_0)^2+(z_s-z_0)^2}}\end{aligned} \tag{4}$$

将式(4)中的分母项采用1阶泰勒展开：

$$\begin{aligned}&1/\sqrt{(x_s-x_0)^2+(y_s-y_0)^2+(z_s-z_0)^2} \\ &\quad\approx (K_0+K_\theta)^{-1/2} \approx K_0^{-1/2} - \frac{1}{2}K_0^{-3/2}K_\theta\end{aligned} \tag{5}$$

其中

$$K_0 = R_g^2 + z_0^2 + y_0^2 + (D-x_0)^2$$

$$K_\theta = -2\left(R_g z_0 + \frac{1}{2}aR_g\left(1-\frac{x_0}{D}\right)\right)\cos\theta - 2R_g y_0\sin\theta$$

$$D = \sqrt{a^2 - R_g^2}$$

将式(5)代入到式(4)中，斜距差可进一步表示成轨道平近心角 θ 的余弦形式：

$$\Delta R(\theta) \approx \Delta R_0 + \left(R_g\Big/\sqrt{K_0}\right)d_p\cos(\theta+\varphi) \tag{6}$$

其中

$$\Delta R_0 \approx (D-x_0)\,d_x\Big/\sqrt{K_0}$$

$$d_{\mathrm{p}} = \frac{\sqrt{K_0}}{R_{\mathrm{g}}}\cdot\sqrt{\left(d_z + d_x\cdot\frac{R_x}{R_{\mathrm{g}}}\right)^2 + \left(d_y + y_0\,\frac{D-x_0}{K_0}\,d_x\right)^2}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{d_z + d_x R_x / R_{\mathrm{g}}}{d_y + y_0(D-x_0)d_x / K_0}\right)$$

$$R_x = -\frac{aR_{\mathrm{g}}}{2D} + \frac{(D-x_0)}{K_0}\left(R_{\mathrm{g}} z_0 + \frac{1}{2}aR_{\mathrm{g}}\left(1-\frac{x_0}{D}\right)\right)$$

将式(6)代入到式(3)中，SAR 信号模型可进一步简化为

$$S = C_1\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}\Delta R\right)\int_{-\pi}^{\pi}\exp\left(-j\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} d_{\mathrm{p}}\cos(\theta+\varphi)}{\lambda\sqrt{K_0}}\right)\mathrm{d}\theta$$
$$\approx C_2\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}\Delta R_0\right)J_0\left(\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} d_{\mathrm{p}}}{\lambda\sqrt{K_0}}\right) \tag{7}$$

其中 $J_0()$ 为零阶贝塞尔函数，C_2 为常数。由式(7)可知GEOCSAR信号的分辨率函数由sinc函数和零阶贝塞尔函数共同决定，2.3 节将详细地讨论其 3 维分辨特性。

2.2.2 子孔径 3 维成像信号模型 假设方位向成像处理的积分区间为$[\theta_{\min},\ \theta_{\max}]$，由式(7)可知 SAR 3 维信号模型：

$$S = C_1\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}\Delta R\right)\cdot\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}}\exp\left(-j\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} d_{\mathrm{p}}\cos(\theta+\varphi)}{\lambda\sqrt{K_0}}\right)\mathrm{d}\theta \tag{8}$$

采用 n 阶贝塞尔函数进行展开：

$$S = C_3\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}\Delta R(\theta)\right)\left[(\theta_{\max}-\theta_{\min})J_0\left(\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} d_{\mathrm{p}}}{\lambda\sqrt{K_0}}\right) + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{n}j^n J_n\left(\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} d_{\mathrm{p}}}{\lambda\sqrt{K_0}}\right)\sin n(\theta+\varphi)\,|_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}}\right] \tag{9}$$

其中 C_3 是常数，$J_n()$ 为 n 阶第 1 类贝塞尔函数。由上式可知，当采用部分孔径进行成像时，分辨率函数是多阶贝塞尔函数共同作用的结果，且分辨率函数与 φ 有关，这说明 GEOCSAR 的平面分辨率会随着目标相对波束中心的方位角变化而发生变化。由于不能给出定量化的分辨函数形式，第 3 节将通过信号仿真的方式说明部分孔径下的 3 维分辨特征。

2.3 3 维分辨特性分析

2.3.1 3 轴分辨率函数 前述 2.2 节的分析均是建立在地固坐标系 o_{e}-xyz 上，为了能在场景坐标系 o-$x'y'z'$ 中讨论 GEOCSAR 3 维分辨特性(参考 2.1 节)，需要将场景坐标系中尺度变换到地固坐标系中。设$(x,\ y,\ z)$，(x',y',z')分别为地固坐标系和场景坐标系中坐标，ϕ 是场景中心纬度，Λ 为场景中心经度，Λ_0 为同步卫星地球静止点经度。根据两坐标系的定义，场景坐标系尺度$(d_{x'},d_{y'},d_{z'})$和地固坐标系中尺度(d_x,d_y,d_z)具有如下的转换关系：

$$\begin{pmatrix}d_x\\ d_y\\ d_z\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}\cos\Lambda_0 & \sin\Lambda_0 & 0\\ -\sin\Lambda_0 & \cos\Lambda_0 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\Lambda & -\sin\Lambda & 0\\ \sin\Lambda & \cos\Lambda & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\sin\phi & 0 & \cos\phi\\ 0 & 1 & 0\\ -\cos\phi & 0 & \sin\phi\end{bmatrix}\begin{pmatrix}d_{x'}\\ d_{y'}\\ d_{z'}\end{pmatrix} \tag{10}$$

将式(10)代入到式(7)中，可得 GEOCSAR 信号在场景坐标系下 3 个坐标轴向的分辨率函数可表示为

$$S_x \approx C_2\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}k_{x1}d_{x'}\right)J_0\left(\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} k_{x2} d_{x'}}{\lambda\sqrt{K_0}}\right) \tag{11}$$

$$S_y \approx C_2\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}k_{y1}d_{y'}\right)J_0\left(\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} k_{y2} d_{y'}}{\lambda\sqrt{K_0}}\right) \tag{12}$$

$$S_z \approx C_2\,\mathrm{sinc}\left(\frac{2B}{c}k_{z1}d_{z'}\right)J_0\left(\frac{4\pi R_{\mathrm{g}} k_{z2} d_{z'}}{\lambda\sqrt{K_0}}\right) \tag{13}$$

其中

$$k_{x1} = (D-x_0)\cos(\Lambda_0-\Lambda)\sin\phi\,/\sqrt{K_0}$$

$$k_{x2} = \sqrt{(\sin\phi\cos(\Lambda_0-\Lambda)R_x / R_{\mathrm{g}} - \cos\phi)^2 + (-\sin\phi\sin(\Lambda_0-\Lambda) + \sin\phi\cos(\Lambda_0-\Lambda)y_0(D-x_0)/K_0)^2}$$

$$k_{y1} = (D-x_0)\sin(\Lambda_0-\Lambda)/\sqrt{K_0}$$

$$k_{y2} = \sqrt{\left(\sin(\Lambda_0-\Lambda)\frac{R_x}{R_{\mathrm{g}}}\right)^2 + \left(\cos(\Lambda_0-\Lambda) + \sin(\Lambda-\Lambda_0)\frac{y_0(D-x_0)}{K_0}\right)^2}$$

$$k_{z1} = (D-x_0)\cos\phi\cos(\Lambda_0-\Lambda)\Big/\sqrt{K_0}$$

$$k_{z2} = \sqrt{(\cos\phi\cos(\Lambda_0-\Lambda)R_x / R_{\mathrm{g}} + \sin\phi)^2 + (-\cos\phi\sin(\Lambda_0-\Lambda) + \cos\phi\cos(\Lambda_0-\Lambda)y_0(D-x_0)/K_0)^2}$$

由式(11)–式(13)可知，GEOCSAR 3 维分辨率受 sinc 函数和贝塞尔函数共同作用，与发射信号波长、发射信号带宽、圆周轨迹半径、场景中心地理位置等因素密切相关。当场景中心位于地球静止点时，系数 $k_{x1}\sim k_{z2}$ 满足：$k_{x1}k_{y1}=0$，$k_{x2}=1$，$k_{y2}=1$，$k_{z1}\neq 0$，$k_{z2}\neq 0$。这表明平面分辨率不受 sinc 函数

限制，完全由贝塞尔函数决定，且 xy 向的分辨率相等，GEOCSAR 的平面分辨率函数为圆形；高度向分辨率受 sinc 函数和贝塞尔函数共同影响。下面重点分析这几种因素对 3 维分辨特性的影响。

2.3.2 分辨率随场景中心地理位置变化　由式(11)-式(13)可知，分辨率由 sinc 函数和 J_0 函数共同决定。当 $\Lambda_0=\Lambda,\phi=0$ 时，场景中心位于地球静止点 S_0，$k_{x1}=0$ 和 $k_{y1}=0$，从而 xy 方向平面分辨率与 sinc 函数无关，平面分辨率完全由零阶贝塞尔函数决定，此时与文献[7]中的分析结果是一致的，这里不再赘述。然而当场景中心偏离地球静止点时，平面和高度维的分辨率均由两个函数共同决定。

(1) x 轴分辨率(平面)

如图 2 所示，x 轴分辨率随场景中心地理位置的变化情况，横轴为经度(70°～190°)，纵轴为地理纬度(−40°～40°)，发射信号波长 0.25 m，圆周轨迹半径 R_{g} =4216 km，分析了在不同带宽下的分辨率分布变化规律。如图 2(a)所示，当 sinc 函数提供的分辨率远低于贝塞尔函数提供的分辨率，即 $0.886c/2B \ll 2.3\lambda R_0/(4\pi R_{\mathrm{g}})$ (其中 0.886 和 2.3 分别为两函数 3 dB 宽度)，此时贝塞尔函数起决定性作用。因而随着纬度的增加，k_{x2} 逐渐减小，从而分辨率逐渐下降；当纬度 ϕ =0° 时，$k_{x2}=1$，此时 x 轴向分辨率基本不随经度的变化而变化。

另一方面，随着发射信号带宽的增加，sinc 函数对分辨率的影响越来越明显。sinc 函数提供的分辨率与 k_{x1} 密切相关，由式(11)可知，纬度越高，k_{x1} 值越大，因而等效带宽加大，分辨率将得到提升。如图 2(d)所示，在高纬度的地区分辨率已经高于赤道地区了。

两种函数共同作用的结果是：随着信号带宽的增加，沿着纬度方向分辨率先降低后提高。

(2) y 轴分辨率(平面)

y 轴分辨率同样受 sinc 函数和贝塞尔函数共同作用，分辨函数(公式(12))只与经度有关，而与纬度无关，因而 y 轴向的分辨率在纬度向基本上不发生变化，如图 3 所示。图 3(a)分辨率分布主要受贝塞尔函数的影响，因而随着经度差 $\Lambda-\Lambda_0$ 的增加，k_{y2} 中起决定作用的余弦项$(\cos(\Lambda-\Lambda_0))$逐渐减小，从而分辨率逐渐降低；随着信号带宽的增加，sinc 函数逐渐占主导地位，而系数 k_{y1} 受经度差的正弦$(\sin(\Lambda-\Lambda_0))$影响，会随着经度差的增大而增大，因此分辨率会随着经度差的增大逐渐提高，如图 3(d)所示。

两种函数共同作用的结果：从图 3(a)-3(d)沿纬度方向分辨率基本不变，经度方向呈现为随带宽的增大分辨率先降低后提高的变化规律。

(3) z 轴分辨率(高度向)

本节将通过改变平面分辨率的方法来讨论高度分辨特性。如图 4 所示，不同圆迹半径下高度向分辨率雷达观测区域内的分布情况。当圆周半径较小时(图 4(d))，贝塞尔函数提供的分辨率大于 sinc 函数提供分辨率，sinc 函数起决定性作用。考察 k_{z1} 可知，当 $\phi=0$，$\Lambda_0=\Lambda$ 时，k_{z1} 有最大值，因而位于同步轨道地球静止点时高度向分辨率最高，分辨率函数分布呈圆周形式分布从圆周内向外逐渐衰减(与余弦乘积 $\cos\phi\cos(\Lambda_0-\Lambda)$ 有关)；随着贝塞尔函数提供的分辨率的提高(圆迹半径加大)，贝塞尔函数开始对分辨率分布产生影响，贝塞尔函数的影响因子 k_{z2} 在地球静止点达到最小值，k_{z2} 的分布规律将导致分辨率呈圆周形式从内向外逐渐上升，如图 4(a)所示。

最终的分辨率分布形式依赖于两个函数共同作用，从图 4(a)- 4(d)，高度向分辨率经历了从静止点向外逐渐升高到逐渐降低的变化过程。

2.3.3 任意向平面分辨率函数　上述 2.3.2 节分析的平面分辨率是 3 维分辨函数在 x 轴(正南)和 y 轴(正东)向的投影，若要分析平面分辨率任意方向上的投影，引入平面方位角 γ，可对式(10)进行如下修正：

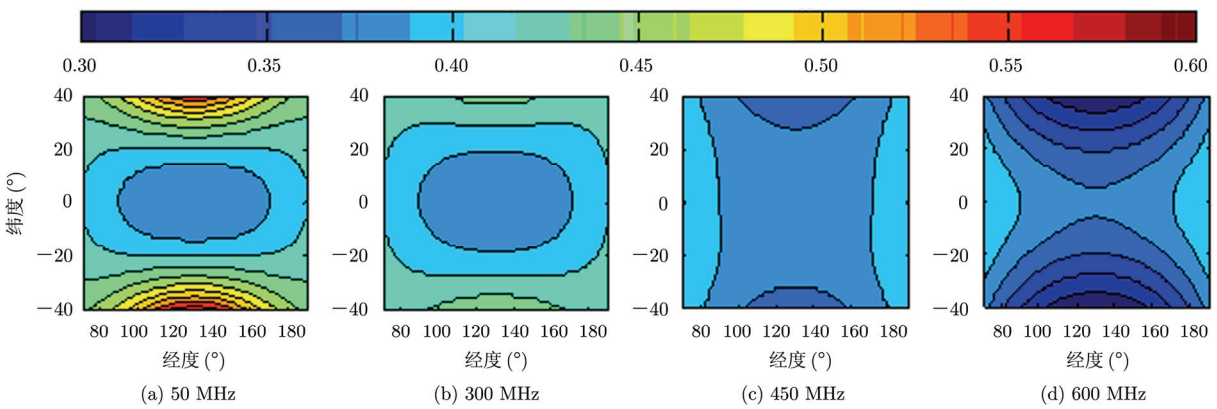


图 2 x 轴向分辨率分布

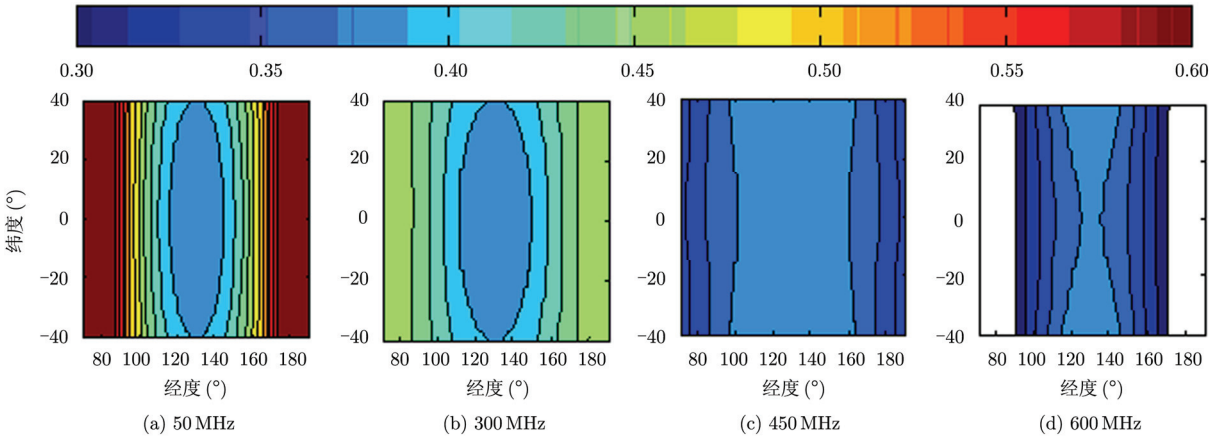


图 3 y 轴向分辨率分布

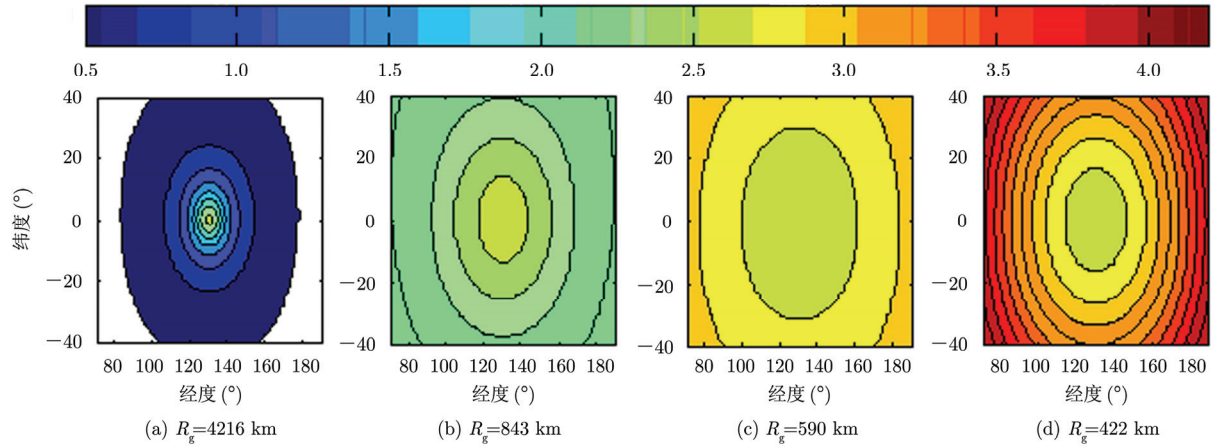


图 4 z 轴向分辨率分布

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Lambda_0 & \sin\Lambda_0 & 0 \\ -\sin\Lambda_0 & \cos\Lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\Lambda & -\sin\Lambda & 0 \\ \sin\Lambda & \cos\Lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\phi & 0 & \cos\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\phi & 0 & \sin\phi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d_{x'} \\ d_{y'} \\ d_{z'} \end{pmatrix} \tag{14}$$

其中 γ 是平面方位角，$\gamma=0$ 时，式(14)和式(10)相同。将式(14)代入式(11)-式(13)，可得任意方向点扩展函数。

下面进行定性分析：只考虑方位角 γ 有关的项，将其它项看成常数，并忽略数值较小项，由式(11)，式(12)可知：

$$\begin{cases} k_{x1} \propto \cos(\Lambda - \Lambda_0 + \gamma) \\ k_{x2} \propto \sin(\Lambda - \Lambda_0 + \gamma) \\ k_{y1} \propto \sin(\Lambda - \Lambda_0 + \gamma) \\ k_{y2} \propto \cos(\Lambda - \Lambda_0 + \gamma) \end{cases} \tag{15}$$

符号“$\propto$”表示“决定于”。由上式可知，sinc 函数和贝塞尔函数的因子分别决定于方位角 γ 的正弦和余弦，因而平面分辨函数包络将表现为椭圆的形式。

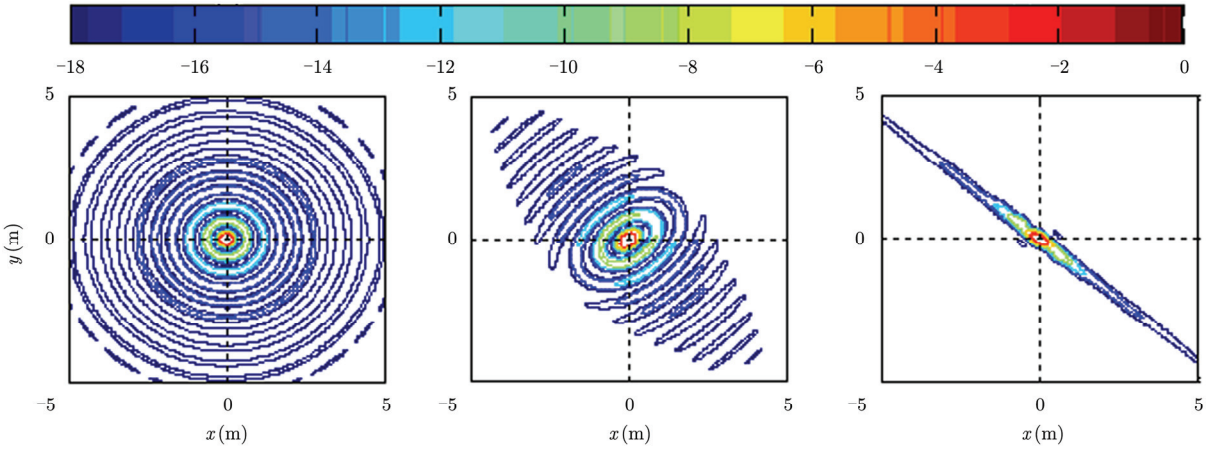
3 实验仿真

本节通过 SAR 信号仿真的方法验证 GEOCSAR 3 维分辨特性。仿真参数如表 1 所示，轨道倾角和偏心率保持 2 倍的关系，卫星运行在地

表 1 GEOCSAR 系统仿真参数

参数	数值	参数	数值
轨道长半轴(km)	42164	信号波长(m)	0.25
偏心率	0.05	信号带宽(MHz)	50
轨道倾角(rad)	0.1	采样率(MHz)	100
近地点幅角(°)	120	地球赤道半径(km)	6378.14
升交点赤经(°)	90	地球极半径(km)	6356.755

球同步轨道上。通过精确计算瞬时斜距，模拟点目标 SAR 原始回波信号，然后采用 BP 算法进行成像，从而获得 3 维点脉冲响应函数，如图 5，图 6 所示，分别为平面分辨率和高度向分辨率函数形式。由图 5 可知，当场景中心在地球静止点时，平面分辨率的点扩展函数为标准的圆形，其第 1 旁瓣为 −7.9 dB；当场景中心偏离地球静止点时，点扩展函数包络分布形式为椭圆，其投影到 x, y 轴上的分辨率均有所提高，这与 2.2.2 节的分析是一致的。然而分辨率在椭圆的长轴处达到最差，可见此时平面点扩展函数并不是圆对称的；当增加发射信号带宽时，sinc 函数对点扩展函数产生影响，分辨率进一步提高。图(6)为几种情况下高度向点扩展函数比较，由图可知，当场景中心偏离地球静止点时，高度向分辨率有所上升，若降低平面分辨率(减小圆迹半径)，贝塞尔函数将对 sinc 函数产生影响，分辨率有所展宽。



(a) 50 MHz带宽，场景中心(0°, 0°)　(b) 50 MHz带宽，场景中心(30°, 30°)　(c) 600 MHz带宽，场景中心(30°, 30°)

图 5　平面分辨函数包络图

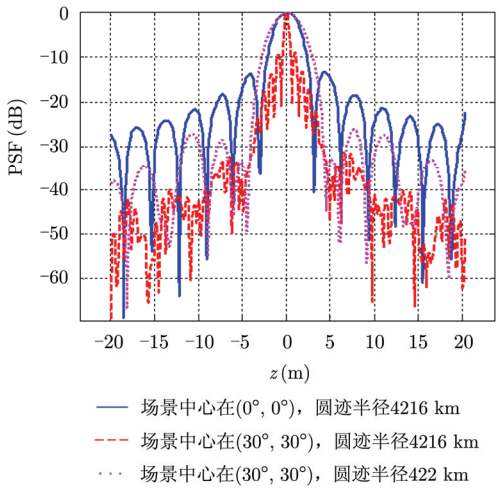


图 6　高度向点扩展函数

图 7 是采用信号仿真的方法计算分辨率与第 2 节理论分析模型计算结果比较情况。横轴表示 9 个信号仿真实验结果，场景中心纬度和经度差分别在 (40°, −60°), (40°, 0°), (40°, 60°), (0°, −60°), (0°, 0°), (0°, 60°), (−40°, −60°), (−40°, 0°), (−40°, 60°)。虽然模型计算值和真实模拟值具有一定的误差(＜0.05 m)，但是分辨率的变化规律基本是一致的，这进一步验证了第 2 节模型建立的正确性。

图 8 用于验证部分孔径分辨率形式，仿真了 $[0, \pi]$, $[-\pi/2, 0]$, $[-\pi/12, \pi/12]$, 3 种孔径情况下平面分辨函数和高度向扩展函数(PSF)。部分孔径情况下，总体上平面分辨率有所降低，2 维包络为椭圆，且合成孔径越小，分辨率越差，这和一般直线模式 SAR 是一样的。图 8(b)为高度向点扩展函数，分别仿真了(0°, 0°)和(30°, 30°)位置处上述 3 种孔径大小分辨率函数，由左图可知，静止点处高度向分辨函数不随孔径大小变化，这是由于此时分辨率函数只受 sinc 函数决定(带宽)；当场景中心偏离静止点，分辨函数受贝塞尔函数影响，因而孔径越小分辨率变得越差。

4　结论

本文对 GEOCSAR 3 维分辨函数进行了建模和仿真，分析结果表明：

(1) GEOCSAR 3 维分辨函数是 sinc 函数和贝塞尔函数的乘积，主要受场景中心位置、信号带宽、轨迹半径和孔径大小等因素的影响。

(2) 当场景中心位于地球静止点时，平面分辨率函数只受贝塞尔函数影响，表现为圆形，分辨率受圆迹半径有关，与发射信号波长无关。高度向分辨率函数受 sinc 函数和贝塞尔函数共同影响。

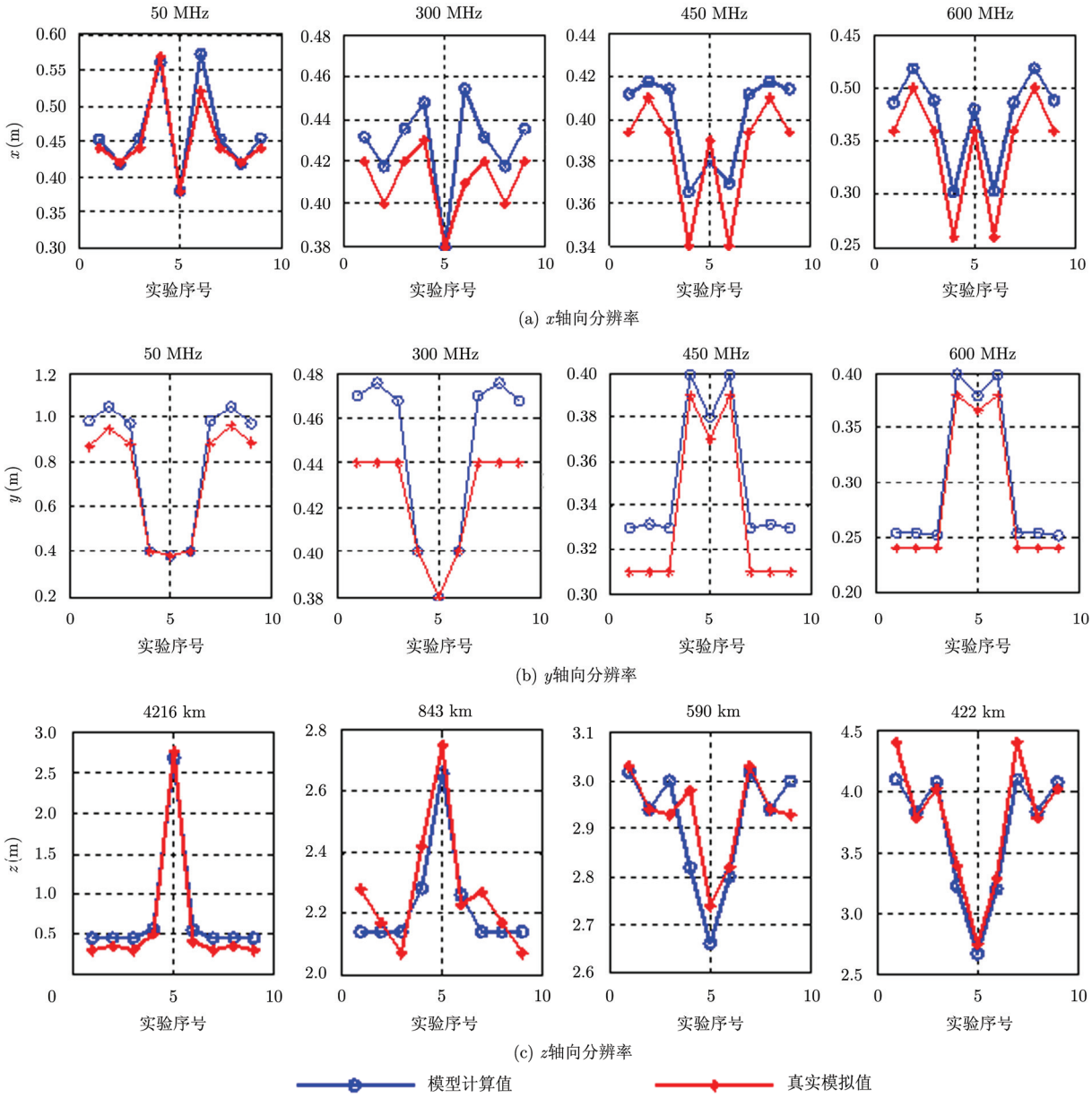
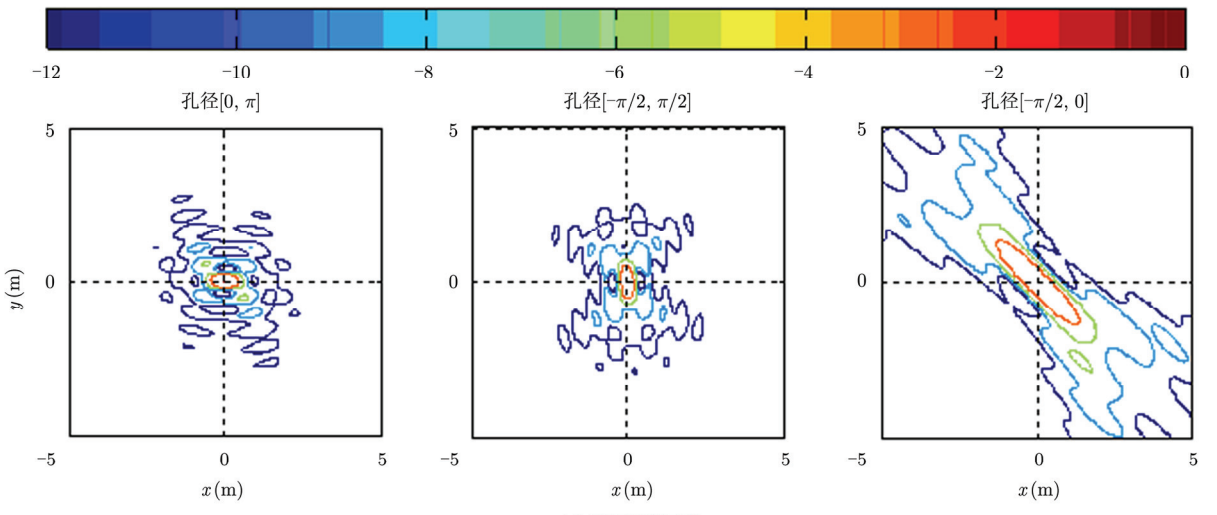
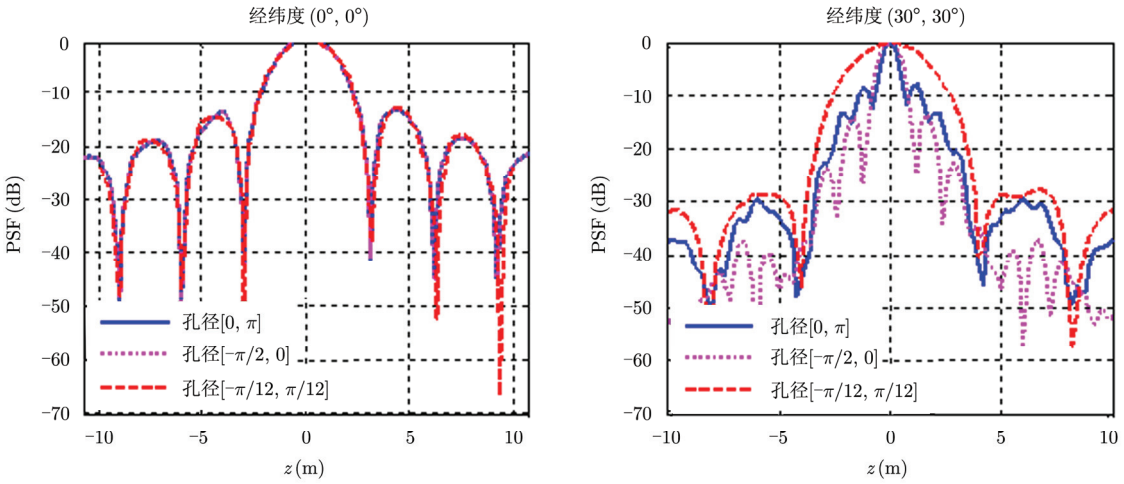


图 7 分辨率统计结果比较





(b) 高度向分辨函数

图 8　部分孔径点扩展函数

(3) 当场景中心不再位于地球静止点时，平面分辨率函数随着纬度和经度差的增加而有所降低，然而随着信号带宽的增加，sinc 函数开始发生作用，平面分辨率开始上升；高度向分辨率和圆迹半径有关，当圆迹半径提供的平面分辨率与 sinc 函数提供的分辨率相当时，场景中心越偏离地球静止点，分辨率越差。随着圆迹半径的增大，贝塞尔函数起主要作用，从而呈现分辨率从静止点中心向外越高的规律。

(4) 部分孔径情况下平面分辨率函数表现为椭圆，且分辨率有所降低。高度向分辨率在场景中心位于静止点时，随着孔径大小变化而不变，在偏离静止点处的分辨率会随着孔径长度减小而降低。

参 考 文 献

[1] Tomiyasu Kiyo. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, GE-21(3): 324–329.

[2] Tomiyasu K. Synthetic aperture radar in geosynchronous orbit[C]. IEEE Antennas and Propagation Symposium, New Mexico, USA, 1978: 42–45.

[3] Bruno D, Hobbs S E, and Ottavianelli G. Geosynchronous synthetic aperture radar: concept design, properties and possible applications[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59(1–5): 149–156.

[4] Colesanti C and Perissin D. A first experiment of 3D imaging with a ground based parasitic SAR[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, Colorado, 2006: 1192–1195.

[5] Cazzani L, Colesanti C, Leva D, *et al*.. A ground-based parasitic SAR experiment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2132–2141.

[6] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124–135.
Hong Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124–135.

[7] Ishimaru A, Chan T, and Kuga Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1524–1530.

[8] Majumder U K, Temple M A, Minardi M J, *et al*.. Three-dimensional point spread function characterization of a radially displaced scatterer[C]. Proceedings of SPIE, Orlando, USA, 2007: 65803.

[9] Morre L J and Potter L C. Three-dimensional resolution for circular synthetic aperture radar[C]. Proceedings of SPIE, Orlando, USA, 2007: 65804.

[10] Hu C, Zeng T, Zhu Y, *et al*.. The accurate resolution analysis in geosynchronous SAR[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 925–928.

[11] Hu Cheng, Long Teng, Zeng Tao, *et al*.. The accurate focusing and resolution analysis method in geosynchronous SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3548–3563.

[12] Kou Leilei, Wang Xiaoqing, Zhu Minhui, *et al*.. Resolution analysis of circular SAR with partial circular aperture measurements[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 665–668.

[13] Kou Leilei, Wang Xiaoqing, Xiang Maosheng, *et al*.. Effect of orbital errors on the geosynchronous circular synthetic

aperture radar imaging and interferometric processing[J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2011, 12(5): 404–416.

[14] Liu Qi, Wei-xian Tan, Yun Lin, *et al*.. SAR raw data 2-D imaging model and simulation of GEOCSAR[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 833–836.

作 者 简 介

汪丙南(1984–)，男，助理研究员，博士，研究方向为干涉合成孔径雷达信号仿真和处理。

E-mail: wbn@mail.ie.ac.cn

向茂生(1964–)，男，中国科学院电子学研究所研究员，博士生导师，研究方向为干涉合成孔径雷达系统技术和方法研究。

E-mail: xms@mail.ie.ac.cn