



# 分布式 GEO SAR:编队构型设计及性能分析

## 摘要

地球同步轨道合成孔径雷达(GEO SAR)具有短重访周期、大覆盖范围的优势,在防灾减灾方面具有重大潜力.本文提出包含远近编队的伴随分布式 GEO SAR 系统,在单星 GEO SAR 基础上,通过增加仅接收信号的从星伴随飞行,形成多个相位中心,具有功能丰富、成本低的优点;但不同功能对编队的空间基线要求不同.本文针对近距编队构型,提出基于坐标旋转的相对运动方程修正方法,可获得地球自转影响下空间基线解析计算方法;进一步提出基于半长轴修正的线性时变基线设计方法,可应用于 SAR 层析任务.针对远距编队,提出全局可测约束下最小定位精度系数准则,可实现具有最佳视角组合的远距编队设计,实现三维形变反演任务.最后,仿真并分析了伴随分布式 GEO SAR 编队各功能的系统性能,包括基线的日变化、高度向分辨率和典型观测区域的三维形变反演精度等.

## 关键词

分布式 GEO SAR;编队构型设计;地球自转;形变反演;SAR 层析

中图分类号 V443;TN958

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-22

资助项目 国家自然科学基金(6196206009, 61971039);国家重大科研仪器研制项目(31727901)

## 作者简介

胡程,男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为雷达信号处理.cchchb@163.com

## 0 引言

地球同步轨道合成孔径雷达(Geosynchronous Synthetic Aperture Radar, GEO SAR)是运行在约 36 000 km 地球同步轨道高度上的星载 SAR 系统<sup>[1]</sup>,与传统低轨 SAR(Low Earth Orbit SAR, LEO SAR)相比具有重访周期短(数小时到 1 天)、覆盖范围大(成像幅宽超过 2 000 km)等优点,因此在防灾减灾包括洪涝灾害、地质灾害等方面具有显著的应用潜力<sup>[2]</sup>.

1983 年,美国国家航空航天局(NASA)的 Tomiyasu 等首次提出 GEO SAR 概念<sup>[3]</sup>.随后,各国纷纷展开了对 GEO SAR 从应用需求、系统设计到成像算法等多方面的研究.其中,以英国、意大利、西班牙为代表的研究团队主要研究近零倾角的方案<sup>[4-5]</sup>,而以美国和中国为代表的研究团队致力于中、高倾角 GEO SAR 方案的研究<sup>[6]</sup>.近 10 年来,中国在倾斜轨道 GEO SAR 系统的分析与设计、成像处理算法等方面开展了大量的研究,提出了分辨率设计方法<sup>[7]</sup>、姿态控制方法<sup>[8]</sup>、NCS 等多种成像算法<sup>[9]</sup>.目前, GEO SAR 已被列入国家民用空间基础设施中长期规划,成为当前星载 SAR 领域的研究热点.

2003 年, NASA 提出了全球地震卫星系统方案(Global Earthquake Satellite System, GESS)<sup>[10]</sup>,采用 10 颗卫星分成 5 组构成星座,实现对全球地壳形变的连续观测.2006 年,英国 Cranfield 大学的 Hobbs 提出包含 3 组共 12 颗卫星的星座,分别对全球 3 块主要大陆进行观测<sup>[11]</sup>,实现全球陆地的覆盖.但这些星座各卫星独立工作,不涉及星间信号的同步.2012 年,意大利米兰理工大学提出了“干涉和成像地球监测地球同步轨道合成孔径雷达”(Geosynchronous SAR for Earth Monitoring by Interferometry and Imaging, GEMINI)系统<sup>[12]</sup>,利用一对或多对卫星形成干涉编队,实现地表形变灾害分析和预防.2015 年,意大利米兰理工大学又提出了一种基于多输入多输出思想的新 GEO SAR 方案 ARGOS,利用多颗 GEO SAR 卫星同时发射和接收卫星信号,形成双多基地配置,可有效估计大气相位屏,实现成像和干涉处理<sup>[13]</sup>.然而这两个系统位于准静止轨道,无法形成灵活基线,功能受限.以上研究也均未涉及编队设计.

本文在单星 GEO SAR 基础上,提出一种伴随分布式 GEO SAR,通过增加仅接收信号的从星,构成伴随式星座,形成多个相位中心,具有功能丰富、成本低的优点.但不同功能对编队的基线要求不同.本

1 北京理工大学 信息与电子学院雷达技术研究所,北京,100081

2 卫星导航电子信息教育部重点实验室(北京理工大学),北京,100081

文针对近距编队和远距编队展开构型设计、性能分析和同步成像的研究.针对近距编队构型,提出基于坐标旋转的相对运动方程修正方法,可实现地球自转影响下基线的解析计算;进一步提出基于修正半长轴的线性基线设计方法,可实现基线均匀变化的近距编队,实现 SAR 层析(SAR Tomography, TomoSAR)任务.针对远距编队,提出全局可测约束下的最小定位精度系数(PDOP, Position Dilution of Precision)准则,可获得具有最佳视角组合的远距编队,实现三维形变反演任务.最后,仿真并分析了所设计伴随分布式 GEO SAR 的系统性能,包括基线的日变化、高度向分辨率和典型点目标的三维形变反演精度等.

## 1 分布式 GEO SAR 编队构型设计

### 1.1 分布式 GEO SAR 几何构型

分布式 GEO SAR 的系统构型如图 1 所示,由一颗主星发射信号、多颗从星伴随飞行组成.主星具备收发能力,而从星仅被动接收信号.按照与主星的距离,从星可以划分为近距从星(如图 1 中的从星 1)和远距从星(如图 1 中的从星 2~N).近距从星与主星可形成多种编队构型,例如 TanDEM-X 的 Helix 构型<sup>[14]</sup>.

本文中近距从星用于实现相干 SAR 层析<sup>[15]</sup>,相干层析利用编队卫星同时获得信号传播路径消除大气和场景去相关,可提高相干系数;而远距从星可用于形成多角度观测,实现三维形变反演.

具有倾角的 GEO SAR 常见星下点轨迹是一个“8”字形,按照“8”字形的大小,我们可将轨道类型分为“大 8”和“小 8”,分别由高倾角和低倾角实现.两种轨道类型的轨道根数如表 1 所示,星下点轨迹见图 1b 的 GEO\_Large8 及 GEO-1.本文研究的分布式 GEO SAR 为“小 8”类型,主星轨道根数如表 1,星

下点轨迹如图 1b 所示,包含 GEO-1、GEO-2(几乎与 GEO-1 重合)、GEO-3,其中 GEO-1 为主星,GEO-2 与 GEO-1 近距飞行,构成用于 SAR 层析的编队.由于“小 8”构型在东西方向难以形成多角度<sup>[16]</sup>,因此我们通过增加远距从星 GEO-3,以增加观测角度.编队构型设计的目标就是设计 GEO-2 和 GEO-3 的 6 个轨道根数(轨道要素),本文将以 SAR 层析和三维形变反演为任务需求分别设计近距和远距编队构型.

表 1 “大 8”和“小 8”轨道根数

Table 1 Orbital elements of GEO SAR nadir-point tracks

轨道根数	小 8	大 8
半长轴/km	42 164	42 164
倾角/deg	16	53
近地点幅角/deg	0	270
离心率	0	0.07
升交点经度/(°E)	88	113
真近点角/deg	0	0

### 1.2 SAR 层析编队构型设计

#### 1.2.1 近距编队构型传统设计方法

SAR 层析任务要求主从星近距飞行,描述近距编队主从星相对运动的典型方法是相对运动运动学方程<sup>[17]</sup>(下称“相对运动方程”),该方程描述的是任意时刻从星相对主星的空间位置,用  $X$ - $Y$ - $Z$  三个分量表示,可以视为空间基线在  $X$ - $Y$ - $Z$  三个方向的投影. $X$ - $Y$ - $Z$  三个方向构成的坐标系被称为航天器轨道坐标系(下称“轨道坐标系”),如图 2a 所示.该坐标系以主星为原点, $X$  轴为地心到卫星的连线. $X$ - $Y$  平面为轨道面且  $Y$  轴指向主星速度一侧. $Z$  轴为垂直轨道面,且  $X$ - $Y$ - $Z$  构成右手坐标系.

相对运动方程中, $X$ - $Y$ - $Z$  三个分量随卫星运行时间  $t$  周期性变化,周期与轨道周期一致.三个分量可以表示为

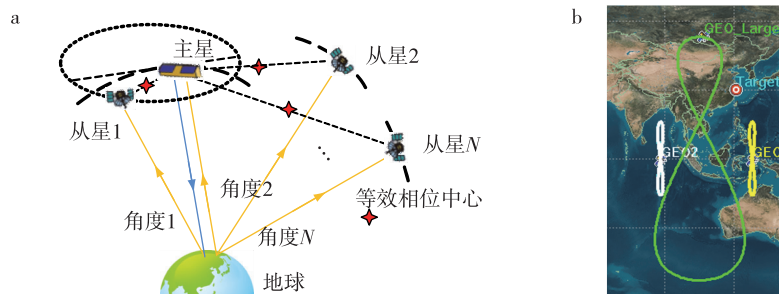


图 1 分布式 GEO SAR 示意 a.构型示意;b.编队及“大 8”构型的星下点轨迹

Fig. 1 Sketch map of distributed GEO SAR, (a) configuration, (b) nadir-point tracks of the formation and configuration

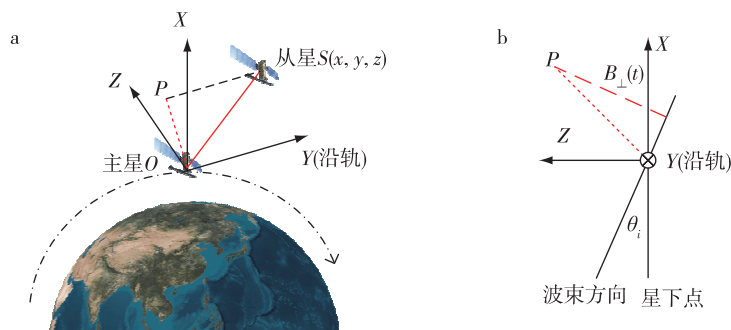


图2 轨道坐标系及垂直基线示意 a.轨道坐标系;b.垂直基线计算示意

Fig. 2 Orbital coordinate system (a) and perpendicular baseline calculation (b)

$$\begin{cases} x(t) = -A \cos(nt + \alpha_1), \\ y(t) = 2A \sin(nt + \alpha_1) + l, \\ z(t) = B \cos(nt + \alpha_2), \end{cases} \quad (1)$$

其中  $n$  表示轨道角速度,通常主从星半长轴一致,因此轨道角速度是相同的。 $A, \alpha_1, l, B, \alpha_2$  与主从星轨道根数有关,具体表达式见文献[17]。从式(1)可以看出从星相对主星的运动具有明显的几何意义,在轨道平面(即  $X$ - $Y$  平面)内,从星相对主星做椭圆运动,椭圆中心在沿轨方向,与主星相距  $l$ ,椭圆长轴:短轴 = 2:1;在垂直轨道平面方向(即  $Z$  方向)做简谐运动。

值得注意的是,通常卫星的离心率很小,因此  $Y$  轴正向与速度方向恰好重合。所以空间基线在  $Y$  方向的投影等于沿轨基线,即  $B_{AT}(t) = |y(t)|$ ,而垂直基线可以用  $X$ - $Z$  平面的分量以及下视角  $\theta_d$  表示,即  $B_{\perp}(t) = |z(t) \cos \theta_d - x(t) \sin \theta_d|$ 。

由于主星轨道根数通常是确定的,因此根据相对运动方程,可以获得沿轨基线、垂直基线与从星轨道根数的关系,并可据此通过设计合理的从星轨道根数,获得满足任务需求的空间基线。这个过程就是近距编队构型的传统设计方法。

### 1.2.2 地球自转影响下的 SAR 层析编队构型设计

#### 1) 地球自转对基线计算的影响

在相对运动方程中,  $Y$  轴正向与速度方向是重合的。此速度是卫星在地心惯性坐标系 (ECI, Earth Centered Inertial) 中的速度  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$ 。但实际上, SAR 成像卫星的有效速度是卫星相对场景的速度,即地心固定坐标系 (ECF, Earth Centered Fixed) 中的速度  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$ 。因此,沿轨基线、垂直基线的计算应当以  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  为依据,空间基线在  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  方向的投影是沿轨基线,垂直基线以垂直  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  的分量以及下视角共同决定。 $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  与  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  的关系如下所示:

$$\mathbf{v}_{ECF}(t) = \mathbf{v}_{ECI}(t) - \underbrace{\mathbf{n}_E \times \mathbf{r}(t)}_{\text{地球自转项}}, \quad (2)$$

其中  $\mathbf{n}_E$  表示地球自转角速度,  $\mathbf{r}(t)$  为地心到卫星的矢径。

以  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  为依据计算基线对低轨 SAR 和 GEO SAR 都是精确的。值得注意的是,在低轨 SAR 中,由于  $\|\mathbf{r}(t)\|$  相对较小,  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  与  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  之间在大小和方向上非常接近,即地球自转的影响可以忽略,因此使用  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  计算基线并进行编队构型设计便已足够精确。但 GEO SAR 轨道半长轴提升两个数量级,  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  与  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  差异大,尤其是方向,因此地球自转不可忽略。

GEO SAR 中  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  与  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  方向的差异导致以  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  为依据计算的基线误差大。这一点从星下点轨迹可以得到佐证,如图 3a 所示,赤道处  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  与赤道夹角等于倾角,但地球自转导致有效速度  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  发生了巨大的变化,几乎与  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  垂直。此时,如果沿赤道方向排列两个卫星 S1、S2,可以看出用两个速度分别投影得到的沿轨基线差异非常大。图 3b、3c 分别显示了低轨 SAR 和 GEO SAR 中  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  与  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  计算垂直基线的结果。我们分别设置了两颗卫星,除升交点赤经相差  $0.5^\circ$  以外,其余轨道根数一致。低轨 SAR 的其余根数采用 TerraSAR-X<sup>[14]</sup>, GEO SAR 采用“小 8”构型。可以看出,对于低轨 SAR 来说,  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  与  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  对计算结果的差异几乎可以忽略,但对于 GEO SAR 而言,大约存在 3.6 倍的关系,可见使用  $\mathbf{v}_{ECI}(t)$  无法正确计算基线分量。为了获得精确的基线分量,需要考虑地球自转,对相对运动方程进行修正,进而进行 SAR 层析编队设计。

#### 2) 基于坐标旋转的相对运动方程修正及编队设计

为了正确计算地球自转影响下的基线分量,可

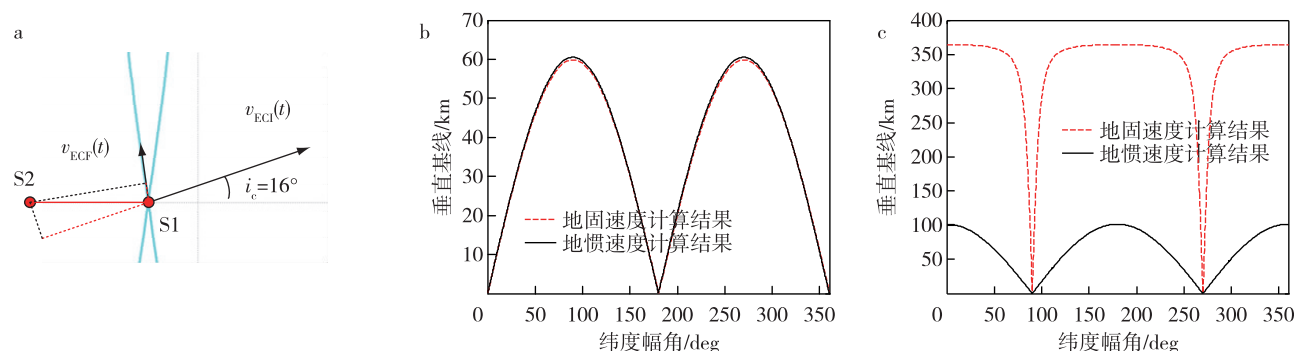


图3 地球自转对 GEO SAR 基线计算的影响 a.“小8”位于赤道处的速度;b.低轨 SAR 垂直基线;c.GEO SAR 垂直基线  
Fig.3 Effects of earth rotation on perpendicular baseline in GEO SAR,(a) satellite velocity above the equator,  
(b) perpendicular baseline of LEO SAR,and (c) perpendicular baseline of GEO SAR

以  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  为坐标轴建立一个修正的坐标系  $O-X'Y'Z'$ ,  $Y'$  轴正向与  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  重合. 在修正坐标系中, 空间基线在  $Y'$  轴的分量即为考虑地球自转后的沿轨基线. 由于修正坐标系与轨道坐标系具有共同的原点, 因此两个坐标系的关系可以用旋转矩阵来表示. 求解旋转矩阵, 就可以得到空间基线在  $O-X'Y'Z'$  坐标系中的表示.

值得注意的是,  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  仍在轨道坐标系的  $Y-Z$  平面内, 也就是说这两个坐标系中  $X'$  与  $X$  轴是重合的. 我们可以计算  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  与  $X$  轴的内积得到此结论. 令  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$  分别代表  $X, Y, Z$  轴的单位矢量, 则  $\langle \mathbf{v}_{ECF}(t), \hat{x} \rangle = \langle \mathbf{v}_{ECI}(t) \cdot \hat{y} - \mathbf{n}_E \times \hat{x} \cdot \mathbf{r}(t), \hat{x} \rangle = 0$ , 其中  $\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle$  表示矢量  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{b}$  的内积. 内积为 0 表明  $\mathbf{v}_{ECF}(t)$  在  $X$  轴方向上没有分量, 所以仍在  $Y-Z$  平面内. 因此, 两个坐标系的关系可以用绕  $X$  轴的旋转矩阵来表示, 即:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $\theta$  为旋转角, 大小可以用如下公式确定:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \langle \mathbf{v}_{ECF}(t), \hat{y}(t) \rangle / \|\mathbf{v}_{ECF}(t)\|, \\ \sin \theta &= \langle \mathbf{v}_{ECF}(t), \hat{z}(t) \rangle / \|\mathbf{v}_{ECF}(t)\|. \end{aligned} \quad (4)$$

为了简便计算, 我们建立一个如图 4 所示的辅助坐标系  $O-X_a Y_a Z_a$ . 该坐标系以卫星轨道平面为  $X_a-Y_a$  平面,  $X_a$  穿过卫星升交点,  $Z_a$  与轨道角速度方向一致.  $\mathbf{n}_s$  为卫星的角速度, 对于 GEO SAR 而言,  $\mathbf{n}_s = \mathbf{n}_E = n \cdot t$  时刻主星纬度幅角可表示为

$$\alpha(t) = nt + M_c + \omega_c, \quad (5)$$

其中  $M_c, \omega_c$  分别为主星的平近点角和近地点幅角.

考虑到相对运动方程适用于小离心率的卫星轨道, 卫星轨道高度的变化可以忽略, 因此在辅助坐标

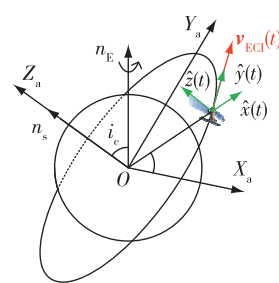


图4 卫星运动辅助坐标系  
Fig.4 Auxiliary coordinate for satellite motion

系中,  $\mathbf{r}(t) \approx r, \hat{x}(t) = (\cos \alpha(t), \sin \alpha(t), 0), \hat{y}(t) = (-\sin \alpha(t), \cos \alpha(t), 0), \hat{z}(t) = (0, 0, 1), \mathbf{n}_E = (0, n \sin i_c, n \cos i_c)$ , 可得  $\mathbf{v}_{ECF}(t) = nr(-\sin \alpha(t)(1 - \cos i_c), \cos \alpha(t)(1 - \cos i_c), \cos \alpha(t) \sin i_c)$ , 从而可计算得到:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{(1 - \cos i_c)}{\sqrt{(1 - \cos i_c)^2 + [\cos \alpha(t) \sin i_c]^2}}, \\ \sin \theta &= \frac{\cos \alpha(t) \sin i_c}{\sqrt{(1 - \cos i_c)^2 + [\cos \alpha(t) \sin i_c]^2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

至此, 可得修正后的相对运动方程为

$$[\hat{x}(t), \hat{y}(t), \hat{z}(t)]^T = \mathbf{R} \cdot [x(t), y(t), z(t)]^T \quad (7)$$

其中上标 T 表示转置. 将式(1)、(3)、(5)、(6)代入式(7)可以得到更加详细的公式, 这里不加以展开.

根据修正后的相对运动方程, 分布式 GEO SAR 编队的垂直基线和沿轨基线分别可以表示为

$$\begin{aligned} B_{\perp}(t) &= |\hat{z}(t) \cos \theta_d - \hat{x}(t) \sin \theta_d| \approx |\hat{z}(t)|, \\ B_{AT}(t) &= |\hat{y}(t)|, \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\theta_d$  表示下视角. 约等号成立的原因是在 GEO SAR 中, 下视角通常很小,  $\theta_d = 1.5^\circ \sim 7.5^\circ$ , 因此垂直基线几乎由  $|\hat{z}(t)|$  决定. 式(7)所示的修正相对

运动方程已经不再具备显著的几何特征,而式(8)所示的基线公式十分复杂,因此难以形成从基线需求到从星轨道根数的显式表达式。

我们可以通过数值优化的方法来设计基线.对于特定的应用,通常要求尽可能稳定的沿轨基线和垂直基线.假设目标垂直基线和沿轨基线分别为  $B_{0\perp}, B_{0AT}$ ,构造如下代价函数:

$$C = \int_0^T [(B_{\perp}(t) - B_{0\perp})^2 + (B_{AT}(t) - B_{0AT})^2] dt, \quad (9)$$

其中  $T = \frac{2\pi}{n}$  表示轨道周期,也等于地球自转周期.通过数值优化使代价函数最小,可以得到从星的轨道根数。

### 3) 基于修正半长轴的线性基线设计

相对运动方程的假设前提是主从星的半长轴是一致的,这样的主从星具有相同的轨道周期,编队可以保持稳定的构型.但为了实现 SAR 层析,空间基线需随时间序列而变化.由于 GEO SAR 重轨观测时间为 1 d,因此分布式 GEO SAR 的从星与主星之间的基线随天数均匀变化.满足该要求的一个方式是令从星的半长轴与主星有所差异<sup>[17]</sup>,当半长轴差异  $\Delta a > 0$  时,卫星向西漂移, $\Delta a < 0$  时,卫星向东漂移。

假设完成一组 SAR 层析数组采集的时间为  $K$  天,以临界基线  $B_c$  为最大基线,假设基线从小到大变化,则初始基线为  $B_c/K$ ,基线的日变化量为  $\Delta B = B_c/K$ .临界基线的计算方式如下<sup>[6]</sup>:

$$B_c = B_w \cdot \lambda R_0 \tan \theta_i / c, \quad (10)$$

其中  $B_w$  为信号带宽, $\lambda$  为信号波长, $\theta_i$  为入射角, $R_0$  为斜距, $c$  为光速。

由于“小 8”轨道在大多数轨道位置内速度的南北分量远大于东西分量,因此可以近似认为升交点的日变化量等于基线的日变化量,可得到升交点经度的日变化量为  $\Delta \Omega_d = \Delta B/a$ .因此从星与主星角速度差异为  $\Delta n = \Delta \Omega_d/T$ ,从而可计算半长轴之差:

$$\Delta a = -\frac{2}{3} \frac{\Delta n}{n} a = -\frac{\Delta B}{3\pi}, \quad (11)$$

可以看出半长轴之差与基线日变化量成正比.以初始基线为目标垂直基线,通过优化式(9)所示的代价函数可以得到除半长轴以外的从星轨道根数,结合式(11)确定半长轴,即可得到从星完整参数。

## 1.3 基于全局可测约束下最小 PDOP 准则的三维形变编队设计

三维形变反演需要从至少 3 个角度观测同一个场景,反演精度与 3 个角度的差异有关.假设各个角度的 D-InSAR 形变测量精度相同,那么当 3 个角度互相正交时反演精度最佳.“小 8”构型 GEO SAR 可以提供南北方向的角度差异,但轨道狭长的特点决定了东西方向多角度性能的不足(如图 1 所示).为了解决这个问题,一个方法是在与主星经度差异较大的位置布置一颗具有相同星下点形状的从星,以增加东西方向的观测角度差异.为了使从星也能够提供南北方向的多角度,任意时刻从星应当具有与主星相同的纬度幅角,因此只需要对该从星的升交点经度进行设计。

三维形变反演精度与 3 个观测角度的关系可以用定位精度系数 (PDOP, Position Dilution of Precision) 来衡量<sup>[16]</sup>.在卫星导航理论中,用户的精确定位至少需要 4 颗卫星,几何精度系数决定了定位精度.几何精度系数与用户到卫星的单位矢量  $e_1, e_2, e_3, e_4$  有关,当这些矢量末端组成的四面体体积最大时,几何精度系数最小.类似地,在主从星轨迹中选取 3 个观测位置,我们可以用地面目标到这 3 个位置的单位矢量  $e_1, e_2, e_3$  末端组成的三角形来优化 PDOP,当三角形面积最大时,PDOP 最小,三维形变反演精度也最佳。

通过对比从星不同升交点经度得到的构型的最小 PDOP,可以得到最优的解.另一方面,为了使从星对我国所有地区都可观测,从星的升交点经度也不能任意变化.SAR 成像入射角的约束范围为  $\theta_i = 10^\circ \sim 60^\circ$ ,对于我国任意位置,应当都能在从星轨道上找到满足入射角约束的位置.为此,可以选取包括我国领土四周的一些代表性城市,构成集合  $O = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ ,用以评估入射角.此外,选取我国大陆中心点(经纬度中点)  $P_0$ ,用以评估末端三角形的面积.假设  $S_1, S_2$  为主星轨迹上的观测位置, $S_3(\Omega_d)$  为主从星构成的相位中心轨迹上的观测位置,相位中心取主从星中点,则从星的升交点经度可以通过求解如下优化问题得到:

$$\begin{aligned} \Omega_d = \arg \max S(e_1, e_2, e_3(\Omega_d)), \\ \text{s.t. } e_n = (S_n - P_0) / \|S_n - P_0\|, n = 1, 2, 3, \\ \exists \theta_i(P_k, S_3(\Omega_d)) \in [10^\circ, 60^\circ], \forall P_k \in O, \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $S(e_1, e_2, e_3(\Omega_d))$  表示以  $e_1, e_2, e_3(\Omega_d)$  3 个矢

量末端构成的三角形的面积。

## 2 编队设计结果及性能分析

### 2.1 编队设计实例

我们使用表 1 的主星轨道根数对编队构型进行设计,载荷参数如表 2 所示。我们分别需要对 SAR 层析的近距离从星及三维形变反演的远距离从星轨道根数进行设计。

表 2 仿真载荷参数

参数	取值	参数	取值
带宽/MHz	60	波长/m	0.24
天线直径/m	30	下视角/(°)	1.5~7.5
方位角/(°)	-70~70		

由式(10)可知临界基线与入射角有关,这里选取典型值  $\theta_i = 30^\circ$ ,可以得到临界基线  $B_c = 998$  km。假设 SAR 层析数据采集天数  $K = 30$  d,得到初始垂直基线  $B_c/K = 33.27$  km,基线日变化量  $\Delta B = 33.27$  km。构造目标沿轨基线  $B_{0AT} = 0, B_{0\perp} = 33.27$  km,通过优化式(9)所示的代价函数,可以得到用于 SAR 层析的从星的轨道根数。根据式(11)修正从星的半长轴,最终从星的轨道根数如表 3 中的从星 1 所示。

为了设计三维形变反演的从星升交点经度,首先需要选取我国的代表性城市,保证城市集合中任意一个点都能在从星全轨中找到入射角满足要求的位置。选取的结果如图 5 所示,各点的经纬度已标示在图中。此外,选取大陆经纬度中点  $P_0$  用以评估三维形变反演的 PDOP。进一步,根据式(12)所示的优化问题,我们可以获得从星的升交点经度  $\Omega_d = 127.8^\circ$ ,因此用于三维形变的从星轨道根数如表 3 中的从星 2 所示。

表 3 从星轨道根数设计结果

轨道根数	从星 1(GEO-2)	从星 2(GEO-3)
半长轴/km	42 160.46	42 164
倾角/deg	16	16
近地点幅角/deg	0	0
离心率	0	0
升交点经度/(°E)	88.045 6	127.8
真近点角/deg	0	0

### 2.2 性能仿真与分析

我们借助 STK(Satellite Tool Kit)对表 3 所示的从星轨道根数进行性能仿真与分析,从理论和回波数据分别仿真 SAR 层析基线变化、高度向分辨率,



图 5 我国领土边缘点选取结果

Fig. 5 Selection of representative points in China's border

并选取典型城市仿真三维形变反演的精度.

2.2.1 理论性能指标仿真

主星与从星 2 组成的 SAR 层析编队的基线变化如图 6 所示.半长轴修正前,主从星半长轴一致,编队基线理论上服从相对运动方程.从图 6a 可以看出,在一定的轨道根数下,由于传统方法未考虑地球自转,因此预期结果与设计严重不符,仅为设计要求 33.27 km 的 27.8%.而 STK 获取的实际结果与设计非常接近.从图 6b 可以看出,在 30 d 内基线的线性非常高,初始基线 33.74 km 与理论值 33.27 km 误差为 1.4%,第 30 天基线 990.9 km 与理论值 998 km 误差为 0.71%.随着编队长时间运行,编队线性程度下降,这是由于卫星摄动的影响导致卫星轨道根数发生变化.仿真结果证明了修正相对运动方程以及均匀变化基线的设计方法的有效性.

为了评估 SAR 层析高度分辨率及三维形变反演各方向精度,选取北京(40°N, 116°E)、广州(23°N, 113°E)、西安(34°N, 108°E) 3 个典型城市作为点目标,考察这些点目标的 SAR 层析高度分辨率及形变反演精度.

SAR 层析的高度向分辨率可以表示为  $\rho_h =$

$\lambda R_0 \sin\theta_i / (2L_B)^{[18]}$ , 其中  $L_B$  为高程向基线.本文以临界基线作为最大基线,此外,由于双基地配置,等效基线为临界基线的一半,即  $L_B = B_c / 2$ .图 7 给出了典型目标在全轨的高度分辨率,由于天线照射范围有限(参数见表 2),因此部分轨道位置波束无法覆盖到目标.对同一个目标的入射角随轨道位置而变化,引起了高度分辨率的波动.在有效照射区内,3 个地方的最差分辨率分别为 7.0、6.3 和 7.0 m.

在三维形变反演方面,由于点目标可观测轨道位置较多,我们可以采用最小 PDOP 的准则选取最佳观测角度组合,然后将 3 个观测角度得到的形变精度根据误差传播理论反演到东西、南北和高度 3 个正交的方向上.具体反演方法见文献[16],这里不进行赘述.图 8 给出了 3 个点目标位置处的理论最佳三维形变反演结果,并与单星“大 8”构型、单星“小 8”构型进行对比.轨道根数见表 1.此处我们假设滤波后单幅干涉图的相关系数为 0.95<sup>[16]</sup>.可以看出,使用编队反演的形变精度达到 1 cm 左右,并且 3 个方向的精度较为接近.东西方向的形变精度、编队性能最佳,“大 8”次之,“小 8”最差,编队相对“小 8”轨道在东西方向的反演精度提高了一个数量级.

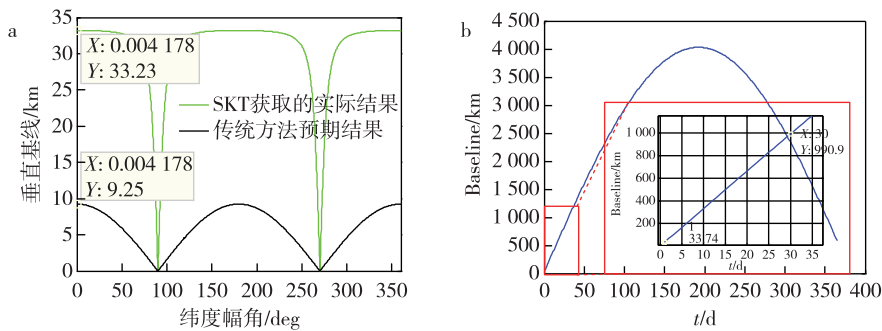


图 6 SAR 层析编队基线变化 a.半长轴修正前,第一天内随纬度幅角变化情况;b.半长轴修正后,一年内变化情况

Fig. 6 Baseline variation of GEO TomoSAR, (a) variation with respect to (w.r.t.) argument of latitude with one day before semi-major axis modification, (b) daily variation within one year after semi-major axis modification

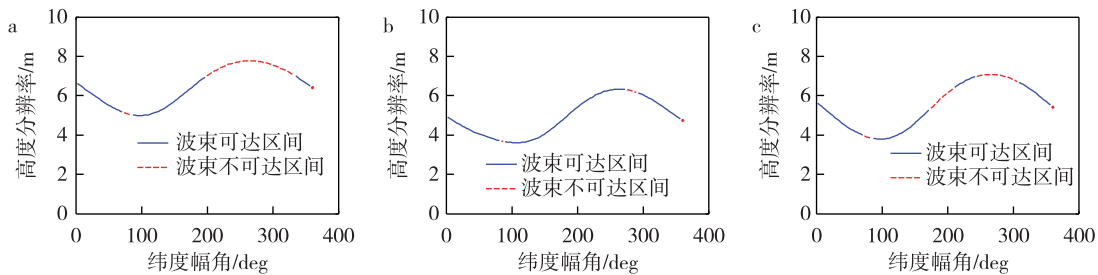


图 7 典型位置点目标高度分辨率 a.北京;b.广州;c.西安

Fig. 7 Height resolution of typical points, (a) Beijing, (b) Guangzhou, and (c) Xi'an

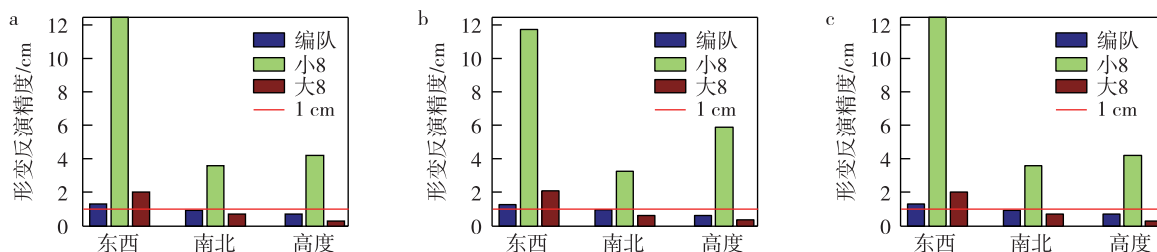


图 8 典型位置点目标的三维形变反演精度 a.北京;b.广州;c.西安

Fig. 8 The 3D deformation retrieval accuracy of typical points, (a) Beijing, (b) Guangzhou, and (c) Xi'an

### 2.2.2 基于回波数据的性能仿真

为了验证所设计分布式 GEO SAR 的三维形变反演和层析性能,我们设置场景目标,并进行计算机仿真实验.仿真设置一个大小为  $3.5 \text{ km} \times 3.5 \text{ km}$  的场景,场景中间包含一个底座为  $1.6 \text{ km} \times 1.6 \text{ km}$ 、高度为  $100 \text{ m}$  的金字塔.仿真以广州为观测目标,雷达脉冲宽度为  $10 \mu\text{s}$ ,采样率为  $80 \text{ MHz}$ .

对 SAR 层析和三维形变反演的场景设置有所区别.在 SAR 层析仿真中,金字塔不存在形变量.观测的时间为  $31 \text{ d}$ .由于 SAR 层析可观测轨道位置较多,我们选取  $100^\circ$  纬度幅角处对目标进行层析处理.在三维形变反演仿真中,我们对金字塔设置形变量,塔顶具有  $5 \text{ cm}$  的高度向形变量.从金字塔顶点到塔底存在沿着金字塔地形变化梯度方向线性下降的形变量.时间基线设置为  $1 \text{ d}$ .首先依据最小 PDOP 准则选取最佳的 3 个观测视角,然后在这 3 个视角对应的轨道位置对场景进行差分干涉处理,最后反演三维形变.

SAR 层析和三维形变反演的结果分别如图 9 和图 10 所示.在 SAR 层析仿真结果中, $31 \text{ d}$  内基线均匀程度非常高,证明了编队的轨道根数能够实现随

时间线性变化的基线.方位-高度的层析结果中可以明显看出金字塔的轮廓,高度向的平均分辨率为  $6.32 \text{ m}$ ,与理论分辨率  $6.19 \text{ m}$  的误差为  $2.1\%$ ,证明了本文所提的 SAR 层析编队设计方法的有效性.在三维形变反演结果里,可以看出高度向具有明显的形变,这与我们仅设置了高度向形变是一致的.南北、东西、高度向形变量与设置值的均方根误差分别为  $9.2$ 、 $10.1$  和  $7.2 \text{ mm}$ ,证明了所设计的远距编队具有  $1 \text{ cm}$  左右的形变反演精度.

### 3 结束语

本文提出伴随分布式 GEO SAR 系统,并分别根据相对运动方程和全局可测约束下的最小 PDOP 准则设计了近距编队和远距编队.近距编队可实现基线随运行时间线性变化,远距编队与主星具有较大的升交点经度差异.仿真表明,设计得到的近距编队基线与设计要求误差在  $1.4\%$  以内,对典型区域层析的高度向瑞利分辨率可达  $7 \text{ m}$ .编队可实现  $1 \text{ cm}$  左右的形变反演精度,且与“大 8”、“小 8”相比,东西方向的形变反演精度得到提高.场景仿真结果验证了三维形变反演精度和 SAR 层析的高度向分辨率.

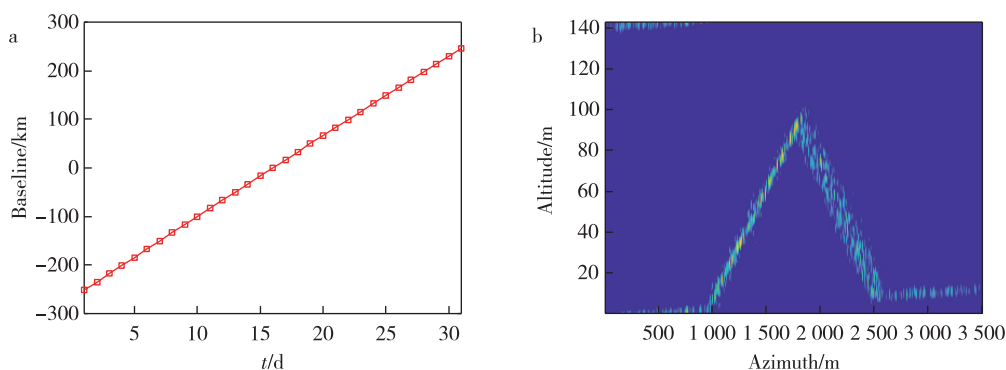


图 9 基线变化及 SAR 层析结果 a.基线变化;b.层析结果

Fig. 9 Baseline variation (a) and SAR tomography results (b)



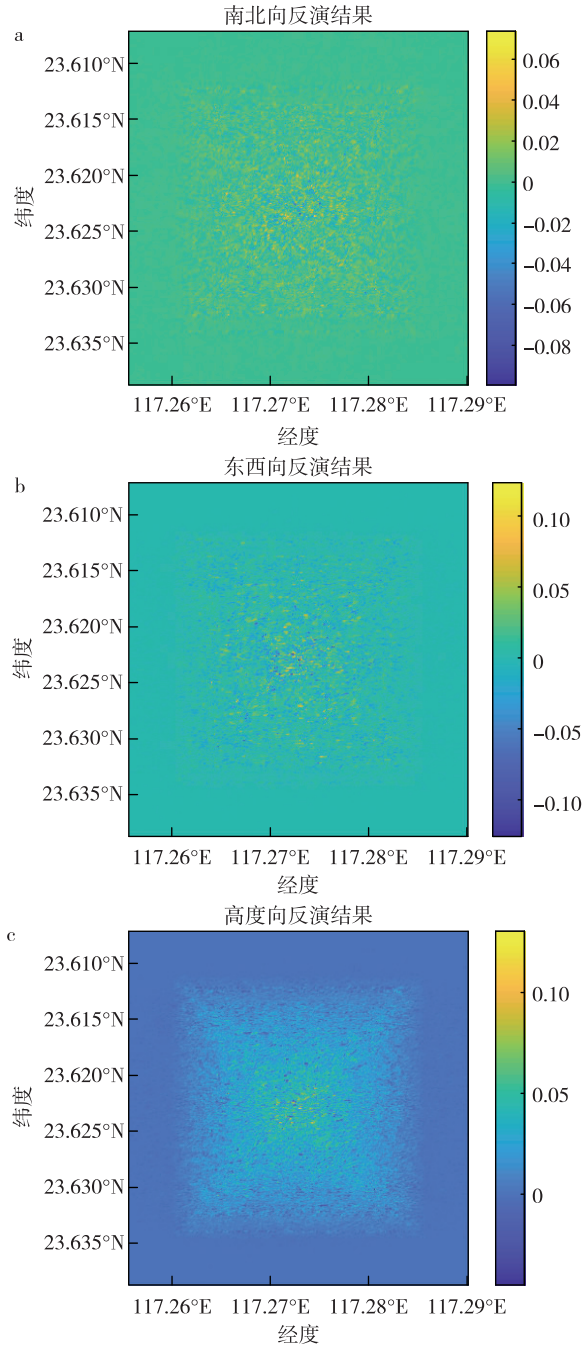


图 10 三维形变反演结果(单位:m)

a.南北方向;b.东西方向;c.高度方向

Fig. 10 The 3D deformation retrieval results (unit:m),

(a) north-south direction, (b) east-west direction, and (c) vertical direction

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Long T, Hu C, Ding Z, et al. Geosynchronous SAR: system and signal processing [ M ]. Springer, 2018
- [ 2 ] 张薇, 杨思全, 范一大, 等. 高轨 SAR 卫星在综合减灾中的应用潜力和工作模式需求 [ J ]. 航天器工程, 2017, 26(1) : 127-131
- [ 3 ] ZHANG Wei, YANG Siqian, FAN Yida, et al. Application potential and working mode requirements of GEO SAR satellite for comprehensive disaster reduction [ J ]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(1) : 127-131
- [ 4 ] Tomiyasu K, Pacelli J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1983, GE-21(3) : 324-329
- [ 5 ] Prati C, Rocca F, Giancola D, et al. Passive geosynchronous SAR system reusing backscattered digital audio broadcasting signals [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(6) : 1973-1976
- [ 6 ] Hobbs S E, Monti-Guarnieri A. Geosynchronous continental land-atmosphere sensing system ( G-class ): persistent radar imaging for earth science [ C ] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018 : 8621-8624
- [ 7 ] Hu C, Zhang B, Dong X C, et al. Geosynchronous SAR tomography: theory and first experimental verification using Beidou IGSO satellite [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9) : 6591-6607
- [ 8 ] Hu C, Long T, Zeng T, 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
- [ 9 ] Zhang Q, Yin W, Ding Z, et al. An optimal resolution steering method for geosynchronous orbit SAR [ J ]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10) : 1732-1736
- [ 10 ] Zhang T Y, Ding Z G, Tian W M, et al. A 2-D nonlinear chirp scaling algorithm for high squint GEO SAR imaging based on optimal azimuth polynomial compensation [ J ]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(12) : 5724-5735
- [ 11 ] NASA J P L. Global earthquake satellite system: a 20-year plan to enable earthquake prediction [ J ]. Technology Report JPL, 2003 : 400-1069
- [ 12 ] Hobbs S. GeoSAR: summary of the group design project MSc in astronautics and space engineering 2005/06 [ M ]. Cranfield University, Bedford, UK, College of Aeronautics Rep, 2006
- [ 13 ] Guarnieri A M, Tebaldini S, Rocca F, et al. GEMINI: geosynchronous SAR for earth monitoring by interferometry and imaging [ C ] // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2012 : 210-213
- [ 14 ] Monti Guarnieri A, Broquetas A, Recchia A, et al. Advanced radar geosynchronous observation system: AR-GOS [ J ]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7) : 1406-1410
- [ 15 ] Krieger G, Hajnsek I, Papathanassiou KP, et al. Interferometric synthetic aperture radar ( SAR ) missions employing formation flying [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5) : 816-843
- [ 16 ] Nannini M, Martone M, Rizzoli P, et al. Coherence-based SAR tomography for spaceborne applications [ J ]. Remote Sensing of Environment, 2019, 225 : 107-114

- [16] Hu C, Li Y H, Dong X C, et al. Optimal 3D deformation measuring in inclined geosynchronous orbit SAR differential interferometry [J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(6):060303
- [17] 杨嘉墀. 航天器轨道动力学与控制[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2001
- YANG Jiachi. Spacecraft orbit dynamics and control[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2001
- [18] Zhu X X, Bamler R. Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4296-4308

## Formation design and performance analysis for distributed geosynchronous SAR

HU Cheng<sup>1,2</sup> CHEN Zhiyang<sup>1</sup> DONG Xichao<sup>1</sup>

1 Radar Research Lab, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

2 Key Laboratory of Electronic Information Technology in Satellite Navigation

(Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081

**Abstract** Geosynchronous Synthetic Aperture Radar (GEO SAR) has the advantages of short revisit period and wide coverage, and has great potential in disaster prevention and mitigation. In this paper, a distributed GEO SAR system containing both close and sparse formation is proposed. On the basis of monostatic GEO SAR, multiple phase centers are formed by adding companion satellites only receiving signals, which has the advantages of rich tasks and low cost. However, different tasks require different spatial baselines for formation. Aiming at the configuration of close formation, this paper proposes a method of correcting the relative motion equation based on coordinate rotation, through which the analytical expression of spatial baseline under the influence of earth rotation can be obtained; furthermore, a method of linear time-varying baseline design based on semi-major axis correction is proposed, which can be applied to SAR tomography. For sparse formation, the minimum Position Dilution of Precision criterion under the measurable constraints of global scene is proposed, which can realize the design of sparse formation with the best combination of line of sight (LOS) thus can achieve the best three-dimensional (3D) deformation retrieval performance. Finally, the system performances of the designed distributed GEO SAR formation are simulated and analyzed, including the diurnal variation of baseline, the resolution in altitude direction and the 3D deformation retrieval accuracy in typical observation areas.

**Key words** distributed GEO SAR; formation design; earth rotation; deformation retrieval; SAR tomography