

分布式卫星编队的误差校正方法及运动目标检测性能分析

刘颖 廖桂生 张涛麟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 卫星基线误差及幅相误差的存在使得地面杂波对消和动目标测速及定位的性能都会严重下降。对于编队卫星基线的测量, 仅仅利用测量仪器通常只能达到分米级的测量精度, 可以利用信号处理的方法进一步估计并校正阵列误差。该文介绍了一种新的阵列误差校正方法, 并着重分析在该方法估计精度的基础上, 利用空时二维自适应处理的方法进行运动目标检测的性能, 最后通过仿真实验验证了分析结果。

关键词: 运动目标检测; 误差校正; 空时二维自适应处理

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2333-04

Error Estimation and Performance Analysis of the Distributed Satellite Formation for Moving Target Detection

Liu Ying Liao Gui-sheng Zhang Tao-lin

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The baseline error and gain and phase error of satellites have a great influence on the clutter cancellation and moving target relocation. As for the measurement of satellite baselines, only an order of decimeter precision can be obtained just by instruments. Fortunately, the error can be estimated and corrected by signal processing. In this paper, a new estimation method is proposed. The performance of moving target detection by space-time adaptive processing is analyzed on the basis of the precision offered by this estimation method. Finally, its validity is illustrated through computer simulations.

Key words: Ground moving target detection; Error estimation; Space-time adaptive processing

1 引言

星载GMTI能够从高空实现广域监视, 及时发现高价值的军事目标, 具有特别重要的军事意义。传统的单星地基雷达由于受到基线长度的限制, 严重制约了GMTI的性能。而如果把多个接收天线分别放置在编队飞行的小卫星上, 其分开的距离可以较大且灵活可变, 从而大大提高GMTI的性能(即减小最小可检测速度MDV), 而且随着卫星技术的迅速发展, 小卫星具有重量轻、体积小, 研制周期短、成本低, 发射灵活等一系列优点^[1-4], 因此用小卫星组成星座的成本与可靠性会优于一颗大卫星。如果仅仅实现二维SAR成像和GMTI功能, 则最佳星座构形为沿航向的直线分布。然而当卫星之间的基线存在误差时, 地面杂波对消的性能将会严重下降, 进而直接影响到动目标检测的性能。对于卫星基线的测量, 仅仅利用测量仪器和控制设备通常只能达到分米级的测量精度, 这很难满足实用中对基线精度的要求(对于3cm的工作波长, 要求基线精度达到毫米级甚至更高)。文献[5]提到利用差分GPS和扩展的Kalman滤波可以达到很高的位置估计精度。但该方法严重依赖于GPS且处理时间过长。利用高精度激光测距仪和毫米波雷达可以获得较高的精度, 但如何在分布式小卫星上实现以及可获得多大精度, 目前还没

有进一步的结论。除基线误差外, 各卫星雷达接收通道的幅相误差也必须加以估计与补偿。

对于直接利用雷达回波数据实现分布式卫星阵列误差的估计与补偿, 已有的阵列误差估计方法^[6-8]都很难直接应用, 主要原因是雷达接收的地面回波信号是连片的散射点, 而且卫星的高速运动使得地面目标点到卫星的导向矢量的变化很快, 很难获得足够的样本。文献[9]结合阵列信号处理与SAR成像的部分理论, 提出了一种高速运动小卫星阵列的校正方法, 但该方法基于地面放置的角反射体数据, 限制了方法的实用性。本文首先介绍一种分布式卫星编队误差估计的新方法, 该方法利用回波的多普勒信息得到卫星的位置误差和幅相误差的估计, 并通过仿真实验验证了此方法的估计精度; 在此基础上, 利用空时二维联合自适应处理的方法, 针对分布式和伴随式两种卫星编队形式进行了分析, 得出了在该误差估计方法所能达到的估计精度下进行动目标检测的性能。

2 信号模型及误差校正方法

2.1 信号模型

为方便讨论, 图1给出分布式小卫星编队坐标示意图。X轴为沿航向或方位向, Y轴和Z轴为垂直航向或径向, 三者构成右手法则。设卫星的准确位置坐标分别为 $(x_m +$

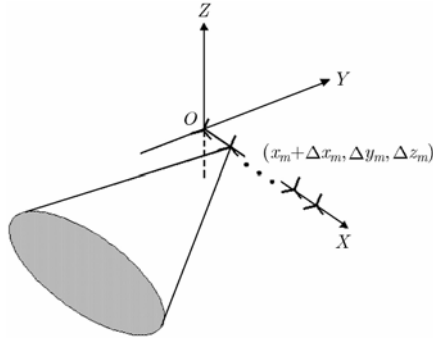


图 1 分布式小卫星坐标示意图

$\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m, m = 1, \dots, N$, 其中 x_m 为卫星的沿航向位置坐标的测量值(由轨道控制/测量设备提供), Δx_m 为测量值与标称值之间的误差, $\Delta y_m, \Delta z_m$ 分别为第 m 颗卫星在垂直航向的位置误差, 一般可控制在分米数量级。所有卫星分布在垂直于 YOZ 平面的直线上并沿 X 轴方向运动, 且工作于正侧视状态。

以第一颗卫星为参考, 在 t 时刻第 m 颗卫星接收到的坐标为 $(x, y, z)dxdy$ 的地面散射单元的回波信号为:

$$x_m(t, \tau) = \gamma_m e^{j\phi_m} \iint \sigma(x, y, z) h \left(\tau - \frac{2r_m(x, y, z, t)}{c} \right) \cdot g \left(t - \frac{x - x_m}{v_s} \right) e^{-j \frac{4\pi r_m(x, y, z, t)}{\lambda}} dxdy \quad (1)$$

其中 t 表示方位慢时间, τ 表示距离快时间。 $\gamma_m e^{j\phi_m}$ 为第 m 颗卫星雷达通道的幅相误差(设 $\gamma_1 e^{j\phi_1} = 1$), $\sigma(x, y, z)$ 表示面散射单元 $(x, y, z)dxdy$ 的反射系数, $g(t)$ 表示雷达的增益及传播时变特性, 本文假定其对不同卫星是相同的, $h(t)$ 为复发射信号, c 为光速, $r_m(x, y, z, t)$ 为地面散射单元 $(x, y, z)dxdy$ 到第 m 颗卫星的距离:

$$r_m(x, y, z, t) = \sqrt{(x - x_m - \Delta x_m - v_s t)^2 + (y - \Delta y_m)^2 + (z - \Delta z_m)^2} \quad (2)$$

2.2 阵列误差估计

对第 m 颗卫星的接收信号做方位傅里叶变换, 将其变换到多普勒域:

$$x_m(f_d, \tau) = \gamma_m e^{j\phi_m} e^{j \frac{2\pi}{v_s} f_d (x_m + \Delta x_m)} \cdot e^{j \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta y_m \cos \theta_m(x, y, z, f_d) \sin \varphi_m(x, y, z) + \Delta z_m \cos \varphi_m(x, y, z))} \cdot \iint Y_m(f_d) dxdy \quad (3)$$

其中

$$Y_m(f_d) = \sigma(x, y, z) h \left(\tau - \frac{2r_m(x, y, z, f_d)}{c} \right) \cdot G(f_d) e^{-j \left(\frac{4\pi \sqrt{y^2 + z^2}}{\lambda} - \frac{\pi \lambda \sqrt{y^2 + z^2} f_d^2}{2v_s^2} + 2\pi f_d \frac{x}{v_s} \right)}$$

$$r_m(x, y, z, t) \approx \sqrt{y^2 + z^2} + \frac{(x - x_m - \Delta x_m - v_s t)^2}{2\sqrt{y^2 + z^2}} - \Delta y_m \cos \theta_m(x, y, z, t) \sin \varphi_m(x, y, z) - \Delta z_m \cos \varphi_m(x, y, z)$$

$\theta_m(x, y, z), \varphi_m(x, y, z)$ 分别定义为坐标为 (x, y, z) 的地面固定场景对第 m 颗卫星雷达的瞬时方位角和仰角。对于斜距大约为 1000 km 而垂直基线非常小的阵列(沿航向分布的线阵)来讲, 可近似认为当瞬时多普勒相同时同一地面反射单元相对于不同卫星具有相同的方位角, 同理也可以认为对应的仰角也相同。 $G(m, f_d)$ 为 $g(t)$ 的傅里叶变换, 这里假定各卫星都相同。 $r_m(x, y, z, f_d)$ 表示在瞬时多普勒频率为 f_d 时, 地面散射单元 $(x, y, z)dxdy$ 到第 m 颗卫星的距离, 对于不同的卫星 $r_m(x, y, z, f_d)$ 是不相同的, 这一点可能会导致同一地面散射单元对于不同阵元分别落入到不同的距离单元中, 但由于垂直基线误差较小, 而 φ 和 $\theta(x, y, z, f_d)$ 在波束照射范围内变化不大(俯仰波束宽度为 0.03rad, 方位波束宽度为 0.015rad), 只要对第 m 颗卫星接收回波数据在距离上移动 $\Delta y_m \cos \theta_0 \sin \varphi_0 + \Delta z_m \cos \varphi_0$ (θ_0 和 φ_0 分别为波束中心的方位角和入射角)后就能与参考阵元 ($m = 1$) 的回波数据包配准了, 此时可以认为 $Y_1(f_d) = \dots = Y_M(f_d) \triangleq Y(f_d)$ 。

整个卫星阵列输出的信号可以用矩阵的形式表示如下:

$$\mathbf{X}(f_d, \varphi_0) = \mathbf{\Gamma}' \mathbf{a}(f_d, x) \iint Y(f_d) dxdy + \mathbf{N}(f_d, \varphi_0) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{\Gamma}'$ 为耦合的阵列幅相误差矩阵,

$$\gamma'_m = \gamma_m e^{j\phi_m} e^{j \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta y_m \cos \theta_0 \sin \varphi_0 + \Delta z_m \cos \varphi_0)}$$

该式中 θ_m, φ_m 用 θ_0, φ_0 代替了, 由此引起的相位误差小于 $(1.2 \times 10^{-4})^\circ$ 。 $\mathbf{a}(f_d, x)$ 定义为阵列在多普勒为 f_d 时的导向矢量, 它是卫星沿航向位置的函数:

$$\mathbf{a}(f_d, x) = \left[1, e^{j \frac{2\pi}{v_s} f_d (x_2 + \Delta x_2)}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{v_s} f_d (x_M + \Delta x_M)} \right]^T \quad (5)$$

由于方位多普勒与方位角具有一一对应的关系(距离单元确定以后), 所以可以把多普勒为 f_d 单元的输出看成是与之对应的方位角入射的信号源, 可以利用这一点来估计沿航向位置误差。

首先估计多普勒为 f_{d1} 时阵列的协方差矩阵, 利用不同距离单元的同多普勒输出作为样本, 对其进行特征分解可得最大特征值所对应的归一化特征矢量 $\mathbf{V}^1 = (1, v_2^1, \dots, v_N^1)^T$, 其相角:

$$\psi_m^1 = \text{Arg}(v_m^1) + 2l\pi = \phi_m + \frac{2\pi}{v_s} f_{d1} \Delta x_m + \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta y_m \cos \theta_0 \sin \varphi_{00} + \Delta z_m \cos \varphi_{00}) \quad (6)$$

其中 $\text{Arg}(\cdot)$ 表示取相角运算, l 为整数, 是 2π 模糊项, φ_{00} 为要估计的距离单元对应的波束中心的俯仰角。同理, 可以估计多普勒为 f_{d2} 时阵列的协方差矩阵, 并得其第 m 个元素的相角为 ψ_m^2 , 由两次估计的相位差就可以得到沿航向位置误差的估计:

$$\begin{aligned} \Delta\psi_m &= \psi_m^2 - \psi_m^1 = \text{Arg}(v_m^2) - \text{Arg}(v_m^1) + 2(k-l)\pi \\ &= \frac{2\pi}{v_s} \Delta x_m (f_{d2} - f_{d1}), \quad m = 2, 3, \dots, M \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $|\Delta x_m| \leq 1\text{m}$, 且两次估计选取的多普勒频率差小于脉冲重复频率 prf (为避免距离模糊文中设为 1400Hz), 所以两次估计的相位差小于 π , 故有 $k = l$ 。可以看出用该式估计沿航向位置误差不会存在模糊问题。

将估计的沿航向位置误差代回到式(6), 可以由下式估计出垂直航向误差和通道相位误差耦合到一起的相位:

$$\begin{aligned} &\phi_m + \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta y_m \cos \theta_0 \sin \varphi_{00} + \Delta z_m \cos \varphi_{00}) \\ &= \frac{1}{2} \left(\psi_m^1 - \frac{2\pi}{v_s} f_{d1} \Delta \hat{x}_m + \psi_m^2 - \frac{2\pi}{v_s} f_{d2} \Delta \hat{x}_m \right) \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 仿真结果

仿真中用到的参数如下: 卫星阵列由 6 颗星组成, 卫星速度 $v = 7000\text{m/s}$, 卫星到地面的高度 $h = 800\text{km}$, 观测距离 $R = 1000\text{km}$ 。雷达工作在 X 波段, $\lambda = 0.03\text{m}$, 脉冲重复频率 $f_r = 1400\text{Hz}$ 。方位向用 34 点的数据做傅里叶变换。各卫星位置的测量值及误差如表 1。图 2(a)为第 3 颗卫星沿航向位置误差估计的均方根误差随信噪比(SNR)的变化曲线。图 2(b)所示为相位误差估计的均方根误差随信噪比的变化曲线。

表 1 卫星位置及误差(m)

卫星	x_m	Δx_m	Δy_m	Δz_m
1	0	0	0	0
2	544	0.13	0.32	-0.38
3	1093	-0.21	0.14	0.11
4	1432	-0.36	-0.29	0.43
5	1976	-0.27	-0.11	0.26
6	2580	-0.44	0.27	-0.09

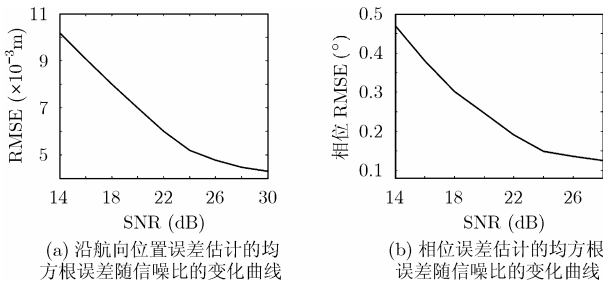


图 2

从仿真结果可以看出, 在信噪比不是很低的情况下, 本文的误差估计方法对沿航向基线误差的估计可以达到毫米级的精度, 对由垂直航向误差和通道相位误差耦合到一起的相位误差的估计可以达到 0.5° 的估计精度。

3 动目标检测性能分析

由上述的阵列误差估计方法可以看出, 用信号处理的方法可以对卫星测量位置进行进一步的估计与补偿, 使其精度大大提高, 下面将针对分布式和伴随式两种卫星编队形式着重分析在这样的基线估计精度下的动目标检测的性能。

空时自适应处理(STAP)技术能大大提高雷达在杂波下检测目标的性能, 已成为雷达界热门的研究方向。本文将利用多通道联合自适应处理^[10]的方法(5DT)来分析动目标检测的性能, 主要原因是该方法在处理维数降低的情况下仍具有较强的时域自适应能力, 可以有效地抑制大量的杂波, 尤其是当杂波进入多普勒主瓣时, 其性能接近最优。

3.1 分布式卫星编队

在应用STAP方法进行动目标检测之前, 首先需要确定分布式卫星编队的最优阵列构形。由于分布式卫星在空间超稀疏分布, 即使利用大阵变小阵技术^[11](最小可将超大稀疏阵列的沿航向孔径压缩到 $v_s T_r$ 内)之后, 对于波长为 3cm 的 X 波段来说仍然是超稀疏的, 所以空间方向图会有大量的栅瓣或高旁瓣出现, 在本文的仿真中设卫星数为 6 颗, 卫星间距为 2m(大阵变小阵之后), 如上节仿真中的卫星沿航向位置即可满足条件。

至于相干积累脉冲数的选取, 要满足相干积累的条件, 即 $\Delta R \leq \lambda/8$, 其中 ΔR 为脉冲积累期间卫星到所观测地面的最大波程差, 经计算, 在本文所设的参数情况下, 满足相干积累的脉冲数最多可以达到 34 个, 本文选为 30。

图 3 给出了在上述阵列构形情况下的空时二维杂波谱, 仿真中用到的其它参数同 2.3 节。从图中可以看出, 由于脉冲重复频率选的比较低, 而且阵列又是在空间超稀疏分布的, 所以杂波的空时二维谱出现了大量的模糊分量。

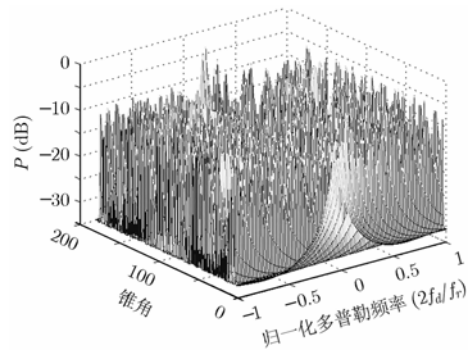


图 3 有多普勒模糊时的空时二维杂波谱

图 4 给出不存在误差情况下 3 种方法(最优处理 OPT、常规处理 CST 和 5DT)的杂波相消性能(以改善因子 IF 来衡量), 其中 $\text{CNR} = 60\text{dB}$, $\psi_0 = 0^\circ$, 从图中可以看出当多普勒存在严重模糊的情况下 5DT 方法的杂波抑制也可以达到较好的性能(最大改善因子为 $N \times K \times \text{CNR} = 83\text{dB}$), 而常

规处理方法的性能则很差。图 5 所示为在上文所述的误差估计方法的估计精度下杂波相消的性能,从图中可以看出,当直接利用测量仪器提供的卫星参数进行动目标检测时,地杂波的相消性能很差,而通过上述的估计方法对阵列误差进行估计并补偿之后,地杂波相消性能比补偿之前有了很大程度的提高。

3.2 伴随式卫星编队

此外,对于伴随式卫星编队,即一颗大卫星发射信号伴随两颗小卫星接收信号的情况下的动目标检测性能也进行了分析,这时仍将阵列孔径设为 10m,而卫星两两间隔 5m(大阵变小阵之后),相干积累脉冲数同样取为 30, $CNR=60\text{dB}$ 。图 6 给出了不存在误差情况下 3 种方法的杂波相消性能,从图中可以看出,由于空间自由度的减少,杂波相消性能略微有所下降,但由于此时杂波在多普勒主瓣内不存在模糊,所以常规空时处理方法的性能有了很大改善(最大改善因子为 $N \times K \times CNR = 80\text{dB}$)。图 7 所示为存在误差情况下 5DT 方法的性能比较,可以看出在上文所述的误差估计方法的估计精度下杂波相消的性能比误差补偿前有明显提高。

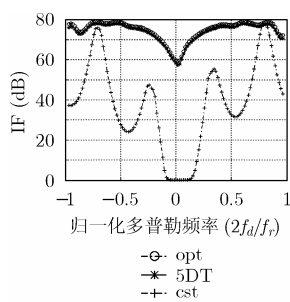


图 4 卫星间距为 2m 时的性能比较

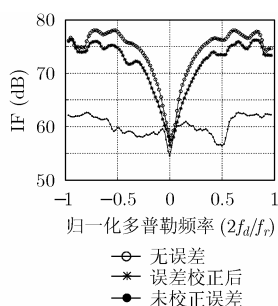


图 5 存在位置误差和幅相误差情况下的性能比较

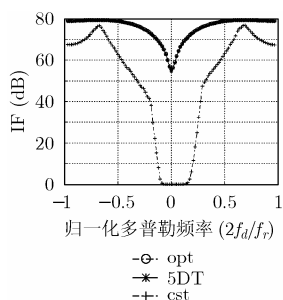


图 6 伴随式卫星系统的动目标检测性能

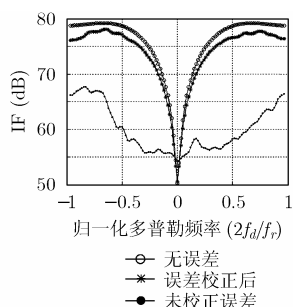


图 7 存在误差时 5DT 方法的性能比较

4 结束语

本文针对星载运动目标检测这一应用,研究了一种在存在卫星基线误差以及幅相误差情况下的阵列误差估计方法,并着重分析了在该方法所能达到的估计精度下进行动目标检测的性能,通过分析发现,在厘米级以下的基线估计, 1° 以内的幅相误差估计精度下,利用空时二维联合自适应处理

的方法来对消地杂波可以达到很好的性能。

参考文献

- [1] Kim Luu, *et al.* University nanosatellite distributed satellite capabilities to support TechSat 21[C]. USA:13th AIAA/USU Conference on Small Satellites (SSC99-III-3), 1999: 1-9.
- [2] Ramongasie S, Phalippou L, Thouvenot E, and Massonnet D. Preliminary design of the payload for the interferometric CarWheel[C]. Proc. of IGARSS, Honolulu, 2000: 24-28.
- [3] Massonnet D. The interferometric cartwheel: A constellation of passive satellites to produce radar images to coherently combined[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2413-2430.
- [4] 林来兴. 小卫星编队飞行及其轨道构成[J]. *中国空间科学技术*, 2001, 21(1): 23-28.
Lin Laixing. Formation flying of small satellite and its orbital configuration[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2001, 21(1): 23-28.
- [5] Hung E. Matrix-construction calibration method for antenna arrays. *IEEE Trans.on AES*, 2000, 36(3): 819-828.
- [6] Friedlander B, *et al.* Direction finding in the presence of mutual coupling[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1991, 39(3): 273-284.
- [7] See C M S, *et al.* Parametric sensor array calibration using measured steering vectors of uncertain locations[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1999, 47(4): 1133-1137.
- [8] Ng B C, *et al.* Sensor-array calibration using a maximum-likelihood approach[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1996, 44(6): 827-835.
- [9] 刘颖, 王洪洋, 廖桂生. 多通道成像卫星误差校正方法研究[J]. *电波科学学报*, 2005, 20(5): 620-624.
Liu Ying, Wang Hong-yang, and Liao Gui-sheng. Calibration and remedy for multit-channel imaging satellites[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(5): 620-624.
- [10] 保铮, 张玉洪, 廖桂生. 机载雷达空时二维信号处理[J]. *现代雷达*, 1994, 16(2): 17-27.
Bao Zheng, Zhang Yu-hong, and Liao Gui-sheng. Space-time signal processing for airborne radars[J]. *Modern Radar*, 1994, 16(2): 17-27.
- [11] Li Zhenfang, Wang Hongyang, Su Tao, and Bao Zheng. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82-86.

刘颖: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理及其

在雷达信号处理中的应用、雷达成像及动目标检测等.

廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 主要研究方向为阵列信号处理及其在雷达信号处理中的应用、空时二维自适应处理、雷达成像及动目标检测等.