

引用格式: 茆禹, 句彦伟. 应用于 ISAR 大转角下的沿视线插值算法[J]. 电光与控制, 2020, 27(2): 35-39. MAO Y, JU Y W. A line-of-sight interpolation algorithm for ISAR with large rotation angle[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2): 35-39.

应用于 ISAR 大转角下的沿视线插值算法

茆禹, 句彦伟

(南京电子技术研究所, 南京 210013)

摘要: 极坐标格式算法(PFA)在逆合成孔径雷达(ISAR)成像算法中主要运用插值算法来解决目标散射点越距离徙动问题,其插值方法的选择决定了成像效率和运算速度。提出了一种沿雷达视线插值的方法,建立了 ISAR 大转角目标几何模型,对其进行理论推导得到方位向的精确插值形式,并对因非均匀采样造成的形变进行方位重采样。仿真实验表明,相较于传统插值算法,该算法有着运算速度更快、聚焦性更好的优点。

关键词: 逆合成孔径雷达; 大转角目标成像; 极坐标格式算法; 沿视线插值; 重采样

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.008

A Line-of-Sight Interpolation Algorithm for ISAR with Large Rotation Angle

MAO Yu, JU Yanwei

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: The Polar Format Algorithm (PFA) mainly uses interpolation algorithm in the Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging algorithm to solve the problem of cross-range migration of scattering points. The selection of the interpolation method determines its imaging efficiency and computing speed. In this paper, an interpolation method along the line of sight of radar is proposed. The geometric model of ISAR target with large rotation angle is established, the precise interpolation form of azimuth direction is obtained by theoretical derivation, and azimuth resampling is carried out for the deformation caused by non-uniform sampling. Simulation results show that compared with the traditional interpolation algorithm, it has the advantages of faster operation speed and better focusing performance.

Key words: inverse synthetic aperture radar; large-angle target imaging; polar format algorithm; interpolation along line of sight; resampling

0 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)能够对远距离目标进行高分辨率成像,在军事和民用方面得到了广泛应用。ISAR 的方位向分辨率与目标成像时相对于雷达的总转角成正比^[1],为了提高雷达的方位向分辨率,近几年,对大转角的 ISAR 成像的研究日益增加,传统的 ISAR 成像算法如距离—多普勒(Range Doppler, RD)算法和距离—瞬时多普勒算法^[2](Range-Instantaneous Doppler, RID)无法解决由于大转角带来的散射点越距离徙动的问题。

针对大转角目标成像,目前已有一些解决方法。如

时频类成像算法^[3]、Keystone 变换法^[4]、极坐标格式算法(Polar Format Algorithm, PFA)^[5]、逆 Radon 变换法^[6]等。其中, PFA 是合成孔径雷达(SAR)/逆合成孔径雷达(ISAR)高分辨成像处理中一种经典的成像算法,在雷达系统中有着重要的意义。PFA 主要是根据中心切片定理,将目标回波的扇形波数谱支撑域插值为矩形,以便可以使用二维快速逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)进行快速成像^[7],该算法的关键在于实现二维内插,内插的算法选择是成像质量和运算效率的关键。许多插值算法可以应用在 PFA 中,如最近邻插值法、双线性插值法^[8]、双三次卷积插值法^[9]、补域插值法^[10]等。近些年也有不少新颖的算法提出,如使用 CZT(Chirp-Z Transform)变换^[11]代替插值操作,但该算法需要改变雷达接收参数,适用范围较窄。

在 PFA 中应用的插值算法有两种情景:第一种是

收稿日期:2019-03-19

修回日期:2019-04-17

作者简介:茆禹(1994—),男,江苏连云港人,硕士生,研究方向为雷达成像技术。

在固定情景下进行插值运算,其波数谱数据在方位向和距离向二维耦合^[12],使得插值算法需要对逐个点进行二维插值运算,运算速度大幅度降低;第二种是沿雷达视线插值,文献[13]提出了应用于聚束 SAR 的沿视线插值的方法,为了避免波数谱二维耦合,以雷达视线方向建立坐标系,将波数谱数据分解为两个一维数据分别进行插值,大大提高了运算速度,并对因为坐标系转换造成的方位向非均匀采样的问题提出了解决方案。

本文将沿视线插值方法应用于 ISAR 大转角情况,首先建立大转角目标的 ISAR 模型^[14],对回波进行解线性调频处理,并转换到波数域内进行分析。在距离向插值后,引入了沿雷达视线插值的方法,根据模型的几何关系推导出方位向插值的核函数,并针对因沿视线插值导致的方位向非均匀采样设计了形变函数,最后根据所提出的算法进行了仿真,验证了该算法的可行性。

1 信号模型与波数域分析

大转角 ISAR 模型如图 1 所示,以雷达为原点建立直角坐标系。其中, O' 为目标参考点,参考点坐标设为 (x_0, y_0) ; (x_p, y_p) 为目标区域一散射点相对于参考点的坐标。将参考点初始位置与雷达的距离设置为 R_s ,参考距离设置为 R_{ref} ,散射点与雷达的距离设置为 R_0 ,与参考点的距离为 r_p ,参考点与雷达的斜视角为 θ_0 。假定在一个慢时间内,目标沿 x 轴移动了 Δx 的距离。

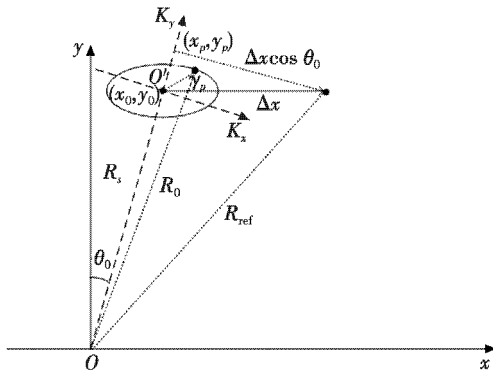


图 1 雷达与目标直角坐标系模型

Fig. 1 Cartesian coordinate system model of radar and target

假设雷达发射信号为线性调频波,其信号载频为 f_c ,脉冲宽度为 T_p ,信号带宽为 B ,调频率为 μ 。则对于单个散射点,雷达回波基带信号可以表示为

$$S(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{R_0}{c}}{T_p}\right) \exp(j2\pi(f_c(t - \frac{R_0}{c}) + \frac{1}{2}\mu(\hat{t} - \frac{R_0}{c})^2)) \quad (1)$$

式中: \hat{t} 为以发射时刻为起点的快时间; t_m 为慢时间, $t_m =$

$t - \hat{t}$ 。对式(1)做距离向快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)后,并用参考信号对回波信号解线性调频,得到的差频输出在时域的表达式为

$$S_{\text{pref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{R_0}{c}}{T_p}\right) \exp(-j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c} - j2\pi\mu(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}) \frac{\Delta R}{c} + j\pi\mu \frac{\Delta R^2}{c^2}) \quad (2)$$

式中, $\Delta R = R_0 - R_{\text{ref}}$ 。对式(2)进行去除剩余视频相位处理,得到

$$S_{\text{pref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}}{T_p}\right) \exp(-j \frac{4\pi}{c}(f_c + \mu(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c})) \Delta R) \quad (3)$$

将 ΔR 近似为

$$\Delta R = \sqrt{R_{\text{ref}}^2 + r_p^2 - 2R_{\text{ref}}r_p \cos(\theta_0 + \frac{\pi}{2})} - R_{\text{ref}} \approx r_p \sin(\theta_0 + \varphi_p) = x_p \sin \theta_0 + y_p \cos \theta_0 \quad (4)$$

式中: θ_0 为成像过程中目标相对于雷达转过的角度; (x_p, y_p) 为目标上一点相对于转台中心的坐标, r_p 为该点与转台中心的距离; φ_p 为将 r_p 提取出来后的近似相位误差,可忽略不计。此时目标已经被补偿为转台模型。由文献[15]可知,其近似过程中,因 ISAR 为远距离目标成像,省略了二次波前弯曲项。

将式(4)代入式(3)可得

$$S_{\text{pref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}}{T_p}\right) \exp(-j \frac{4\pi}{c}(f_c + \mu(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c})) \cdot (x_p \sin \theta_0 + y_p \cos \theta_0)) \quad (5)$$

令 $K = \frac{4\pi}{c}(f_c + \mu(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}))$,则式(5)可写为

$$S_{\text{pref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}}{T_p}\right) \exp(-jK(x_p \sin \theta_0 + y_p \cos \theta_0)) \quad (6)$$

在远距离成像中,认为目标上的散射点与参考点的距离比起与雷达的距离很小,所以,对于任意一次回波,可以将所有散射点的波数向量视作 \mathbf{K} ,其支撑域为

$$\mathbf{K} \in \left\{ \frac{4\pi}{c}\left(f_c - \frac{B}{2}\right), \frac{4\pi}{c}\left(f_c + \frac{B}{2}\right) \right\} \quad (7)$$

得到的数据在给定角度是极坐标形式的,如图 2 所示,为了得到高质量的像,需要内插将目标的扇形波数谱支撑域插值为矩形,应用传统插值算法如最近邻插值法、双线性插值法以及双三次卷积插值法将支撑域插值为矩形,进而采用二维 IFFT 进行成像。

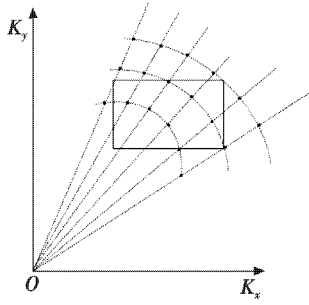


图2 波数域数据分布图

Fig.2 Data distribution map of wavenumber domain

2 沿视线插值法

如图2中矩形范围所示,传统插值算法在固定区域插值。本文提出的沿视线插值法是沿着雷达视线方向选取矩形,图3为其波数域矩形选取示意图。

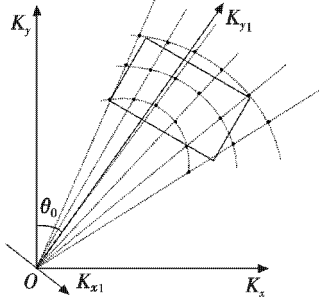


图3 沿视线插值示意图

Fig.3 Interpolation along the line of sight

在大转角情况下,固定区域插值选取的矩形受到扇形支撑域的约束,其角度越大,则距离方向越短,距离向分辨率降低;而且波数谱数据距离向与方位向耦合,需要对数据点逐个二维插值。沿雷达视线插值法很好地解决了这两个问题。

如图3所示,以视线为 \$K_y\$ 轴重新建立极坐标系,增大了距离方向,提高了分辨率且可以将耦合二维数据分解为两个一维数据分别进行插值,大大提高了运算速度。在进行沿视线插值之前,首先对图1几何模型进行定量分析,可以得到在成像期间,目标相对于雷达的转角与目标移动距离有 \$\sin \theta_0 = (x_0 + \Delta X)/R_{\text{ref}}\$, \$\cos \theta_0 = y_0/R_{\text{ref}}\$ 的关系。为了方便分析,只对指数项进行推导,则式(6)的相位项可表示为

$$\varphi(K, X) = -jK \left(\frac{x_0 + \Delta X}{R_{\text{ref}}} x_p + \frac{y_0}{R_{\text{ref}}} y_p \right) \quad (8)$$

沿视线方向建立坐标系,根据图1的几何模型对距离向进行插值,当将视线方向作为距离向波数域方向 \$K_y\$ 时,距离波数与径向距离成比例,为此可以得到

$$\frac{K}{R_{\text{ref}}} = \frac{K_y}{R_s} \quad (9)$$

将 \$K = K_y \frac{R_{\text{ref}}}{R_s}\$ 代入式(8),得到

$$\varphi(K, X) = -jK_y \left(\frac{x_0}{R_s} x_p + \frac{y_0}{R_s} y_p \right) - j \frac{\Delta x}{R_s} K_y x_p \quad (10)$$

将其转化为由雷达斜视角表示的格式,可得

$$\varphi(K, X) = -jK_y (\sin \theta_0 x_p + \cos \theta_0 y_p) - j \frac{\Delta x}{R_s} K_y x_p \quad (11)$$

坐标系旋转后,由图1的几何关系可知,当 \$K_y\$ 轴旋转了 \$\theta_0\$, \$K_x\$ 轴也随之旋转了 \$\theta_0\$ 的角度。距离向插值结束后,在坐标系变换后,由于 \$K_x\$ 与 \$K_y\$ 正交,其正交关系可以表示为

$$K_x = K_y \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s + \Delta x \sin \theta_0} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, \$K_x\$ 并不是 \$\Delta x\$ 的线性函数。如果直接按照非均匀采样对方位向进行采样,会导致方位向散焦,其方位向点发生形变。

为了得到均匀的方位向频谱,将目标慢时间运动距离 \$\Delta X\$ 投影到 \$K_x\$ 轴,得到其坐标变换后的方位向距离为 \$\Delta X \cos \theta_0\$, 将其代入式(11),其中,相位的第二项的距离波数 \$K_y\$ 与方向坐标 \$x_p\$ 耦合,为了解除耦合关系,令 \$K_x = \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s} K_y\$, 得到

$$\varphi(K, X) = -jK_y (x_p \sin \theta_0 + y_p \cos \theta_0) - j \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s} K_y x_p \frac{1}{\cos \theta_0} \quad (13)$$

对式(13)进行二维逆傅里叶变换处理,可以得到散射点目标响应函数为

$$\rho(x, y) = \text{sinc} \left(x - x_p \frac{1}{\cos \theta_0} \right) \cdot \text{sinc} \left(y - (x_p \sin \theta_0 + y_p \cos \theta_0) \right) \quad (14)$$

式(14)得到的散射点是由均匀采样得到的,但其真正位置是由非均匀采样得到的,所以需要通过坐标映射,将式(14)得到的方位向散射点映射到原坐标系,得到方位重采样的位置。

由式(14)均匀采样的 \$K_x = \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s} K_y\$, 式(12)非

均匀采样的 \$K_x = K_y \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s + \Delta x \sin \theta_0}\$, 可以得到重采样位置与原位置的差为

$$\Delta_{\Delta x} = y_0 \tan(\theta_0 - \alpha) - y_0 \tan(\theta_0 - \beta) \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s} \\ \tan \beta = \frac{\Delta x \cos \theta_0}{R_s + \Delta x \sin \theta_0} \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得最后方位重采样的点为

$$\Delta X' = \Delta X \frac{R_s}{R_s + \Delta X \sin \theta_0} \quad (17)$$

根据式(17)对方向进行重采样可以得到

$$\rho(x, y) = \text{sinc}(x - x_p) \cdot \text{sinc}(y - y_p) \quad (18)$$

由式(18)可以看出,在经过沿视线插值法后,目标回波位置得到良好的恢复,沿视线插值的流程如图4所示。

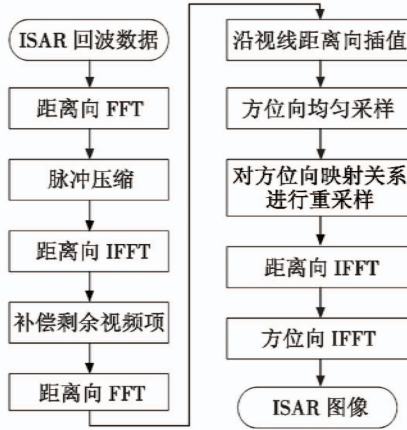


图4 沿视线插值流程图

Fig. 4 Flow chart of interpolation along the line of sight

3 处理结果对比分析

为了验证算法的有效性,对沿视线插值算法进行仿真,仿真平台为 Matlab2016a,雷达系统参数为:中心频率9 GHz,带宽1 GHz,脉冲宽度100 μs,初始斜角47.303 4°,成像期间累计转角12.421 7°。

飞机目标模型的三维图见图5。

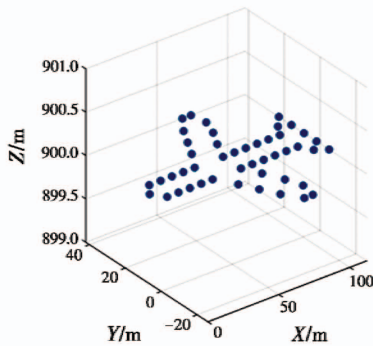


图5 飞机目标模型

Fig. 5 Aircraft target model

根据雷达参数中的角度与带宽参数,将横向与纵向进行定标,其距离分辨单元为0.15 m,方位向分辨单元为0.0769 m。在进行沿视线插值后,若不考虑方位向在新坐标投影的非均匀性下直接进行插值,与根据式(17)进行方位向重采样后的结果进行对比,如图6所示,因直接插值导致的方位向失真得到了改善。

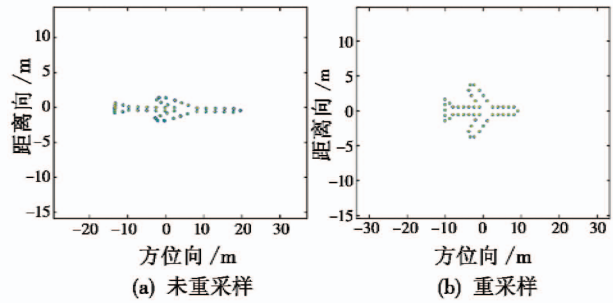


图6 未重采样与重采样后的插值结果对比

Fig. 6 Comparison of interpolation results between non-resampling and resampling

将最近邻插值、双线性插值、双三次卷积插值与沿视线插值的四种方法的成像效果进行对比,如图7所示。为了更好地进行对比,单独提出图像中的一个点来进行成像效果观察,最近邻插值法得出的图像质量不高,有明显散焦现象;双线性插值法具有低通滤波器的性质^[16],使高频分量受损,有些边缘点产生了模糊现象;双三次卷积法和沿视线插值的效果几乎一样,聚焦性和清晰度都较为良好。为了更加直观,将几种插值方法的图像熵与运算时间进行比较,如表1所示。图像熵^[17]越小,所含信息量越多,清晰度越高。

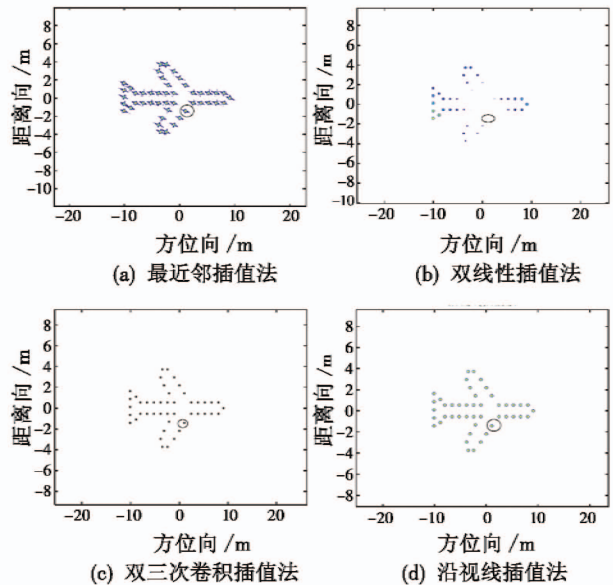


图7 插值方法结果对比

Fig. 7 Comparison of interpolation results

表1 几种插值方法图像熵和计算时间

Table 1 Image entropy and calculation time of several interpolation methods

	最近邻插值	双线性插值	双三次卷积插值	沿视线插值
图像熵	7.9069	6.7037	4.9437	5.5243
运行时间/s	9.864733	14.675009	46.612174	4.077391

由图7和表1可知,在ISAR斜视大转角模型下,应

用沿视线插值得到的图像质量比最近邻插值与双线性插值要好,相比双三次卷积插值,其运算速度要快得多。

4 结论

ISAR 大转角高分辨成像在雷达成像领域有着重要研究意义与良好的应用前景。本文针对固定情景插值方法受支撑域约束和二维耦合的缺点,提出了一种应用于 ISAR 的沿视线插值方法,并根据几何模型精确推导了方位向的重采样点,修正了因为直接插值而导致的方位向失真,其仿真结果表明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.
- [2] YANG Q, DENG B, WANG H Q, et al. Research on imaging of precession targets based on range-instantaneous Doppler in the terahertz band [C]//International Workshop on Electromagnetics: Applications & Student Innovation Competition, 2017: 14-15.
- [3] 芮力, 钱广红, 张国庆, 等. 基于自适应最优核时频分布理论的 ISAR 成像方法[J]. 电光与控制, 2014, 21(7): 46-50, 102.
- [4] 杨旭, 皮亦鸣, 李晋, 等. 采用二阶 Keystone 变换的机动目标 ISAR 成像算法[J]. 信号处理, 2018, 34(11): 1297-1306.
- [5] PIGNOL F, COLONE F, MARTELLI T. Lagrange polynomial interpolation based keystone transform for passive radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2017. doi:10.1109/TAES.2017.2775924.
- [6] XU J, TENG L, LIU F, et al. Radar target imaging using three-dimensional space Radon-Fourier transform [C]//Radar Conference, 2014: 1-6.
- [7] 丁晶. 单/双基 SAR 极坐标格式算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [8] 王小宁, 刘鹏, 许家栋. 雷达成像中插值算法的比较[J]. 现代雷达, 2001(4): 59-61.
- [9] CHU Y L, LI S C, WANG M, et al. Research of image magnifying algorithm based on cubic spline interpolation [C]//International Conference on Electronic & Mechanical Engineering & Information Technology, 2011: 3391-3394.
- [10] 何静, 侯新宇, 王保平. ISAR 成像中 PFA 算法在 MTRC 中的应用[J]. 计算机仿真, 2007(9): 180-182.
- [11] QIU X, LI C S, LI J W, et al. A CZT-based continuous varying PRF polar format algorithm for highly squinted spotlight SAR [C]//Geoscience & Remote Sensing Symposium, IEEE, 2015: 4494-4497.
- [12] YANG L, XING M D, WANG Y, et al. Compensation for the NsRCM and phase error after polar format resampling for airborne spotlight SAR raw data of high resolution [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(1): 165-169.
- [13] 邵鹏, 李亚超, 李学仕, 等. 一种应用于斜视聚束模式的改进极坐标格式成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 303-308.
- [14] 韩文彬, 王华兵, 张德锋, 等. 逆合成孔径雷达系统建模与仿真[J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 75-77, 85.
- [15] LI P H, MAO X H, DING L. Wavefront curvature correction for missile borne spotlight SAR polar format image [C]//CIE International Conference on Radar, 2016: 1-4.
- [16] 王森, 杨克俭. 基于双线性插值的图像缩放算法的研究与实现[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(7): 44-45, 35.
- [17] 朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 537-542.

下 期 要 目

基于态势预测的超视距目标威胁评估方法
 基于斜率加权的最小二乘 RAIM 算法研究
 一种冲突证据推理的快速算法
 无时钟同步下双基地雷达的相位误差补偿算法
 分布式阵列相干信号合成功率资源优化方法
 三余度飞控计算机重构与恢复策略研究
 基于 FTDO 的 RLV 再入段鲁棒容错姿态控制
 一种非均匀系统误差的雷达分区校准方法

组网雷达目标跟踪时的波束自适应分配方法
 局部梯度极值点的 BEMD 与 CI 算法的图像融合增强
 无人机编队自适应鲁棒控制
 双无人机平台的舰炮脱靶量实时检测模型
 反辐射无人机协同搜索航路规划
 基于事件触发的多无人机编队控制
 基于 SIFT 的图像匹配实时性改进
 低噪声折射式红外光学系统设计