

文章编号:1674-8190(2020)01-056-06

基于复近似消息传递的前视雷达成像 分辨率增强算法

侯彦¹, 上官伟¹, 孙进平²

(1. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

(2. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 当机载/弹载雷达工作在前视状态时, 由于成像场景内不同角度处目标的多普勒差异很小, 很难得到高的角度分辨率。针对海面舰船目标的前视成像应用, 利用成像区域具有明显稀疏性的特点, 提出一种基于复近似消息传递压缩感知处理的前视成像角度分辨率增强算法, 建立前视成像的线性观测信号模型, 给出复近似消息传递的迭代计算过程, 以及多通道雷达前视成像的处理流程。通过仿真数据和 X 波段雷达实测数据的处理结果验证了该方法的有效性。

关键词: 多通道雷达; 前视成像; 压缩感知; 复近似消息传递

中图分类号: V556.6; TN953

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Resolution Enhanced Algorithm Based on Complex Approximated Message Passing for Forward-looking Radar Imaging

HOU Yan¹, SHANGGUAN Wei¹, SUN Jinping²

(1. No. 20 Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China)

(2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: When airborne/missile borne radar works in forward-looking state, it is difficult to obtain high angle resolution because of the small doppler difference of targets at different angles in the imaging scene. Aiming at the forward looking imaging application of ship targets at sea, a forward looking imaging angle resolution enhancement method is presented based on compressive sensing with complex approximated message passing (CAMP) algorithm. The linear observation signal model of forward-looking imaging is established. The iterative calculation process of CAMP and the processing flow of multi-channel radar forward-looking imaging are presented. The validity of the method is verified by simulation data and processing results of X band radar measured data.

Key words: multi-channel radar; forward looking imaging; compressive sensing; complex approximated message passing

收稿日期:2019-03-19; 修回日期:2019-06-18

通信作者: 侯彦, ghouyang@sohu.com

引用格式: 侯彦, 上官伟, 孙进平. 基于复近似消息传递的前视雷达成像分辨率增强算法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 56-61, 68.

HOU Yan, SHANGGUAN Wei, SUN Jinping. Resolution enhanced algorithm based on complex approximated message passing for forward-looking radar imaging[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 56-61, 68. (in Chinese)

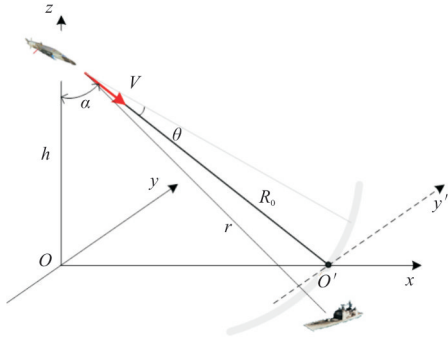


图 1 弹载导引头雷达前视成像几何模型

Fig. 1 Radar forward-looking imaging geometry model of missile-borne seeker

本文考虑高速平台在成像过程中具有俯冲运动特征,平台的速度为 V ,雷达波束(LOS 方向)按顺时针方向扫描,运动方向与雷达扫描角 θ 为 0° 时的 LOS 方向相同,俯冲角(即下视角)为 α ,在 $t=0$ 时刻雷达与场景中心的斜距为 R_0 ,以此时刻平台的垂下点为坐标原点,定义位置坐标系 xyz 。波束

$$\mathbf{f}_k = \left[\exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{-M,k}\right) \cdots \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{0,k}\right) \cdots \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{M,k}\right) \right]^T \quad (4)$$

式中: λ 为波长。

方位扫描角 θ_k 处点与雷达在 t_i ($i = -M, \dots, M$) 时刻的斜距为

$$\begin{cases} r_{i,k} = \sqrt{(x_k - Vt_i \sin\alpha)^2 + y_k^2 + (R_0 \cos\alpha - Vt_i \cos\alpha)^2} \\ y_k = r \sin\theta_k \\ x_k = \sqrt{r^2 - y_k^2} \end{cases} \quad (5)$$

构造出系统观测矩阵 \mathbf{A} 后,即可得到式(2)。式(2)中, \mathbf{y} 、 $\boldsymbol{\sigma}$ 和 \mathbf{n} 都是长度为 $2M+1$ 的向量,为了方便表示,本文后续各部分令 $N=2M+1$,即矩阵 \mathbf{A} 的大小为 $N \times N$ 。

2 基于 CAMP 稀疏信号重构的角度分辨率增强处理

压缩感知理论的研究表明,如果长度为 N 的信号 \mathbf{x} 在某组正交基或紧框架 $\boldsymbol{\Psi}$ 上的变换系数是稀疏的,则可用一个与变换基不相关的 $M \times N$

照射区域内目标与雷达的斜距为 r 。

对于高速弹载平台,式(1)的线性时不变(LTI)卷积模型并不准确,因为实际的回波生成过程是一个时变系统,但其离散化后仍可用式(2)的形式表示。更准确地,考虑系统时变特性的观测矩阵为

$$\mathbf{A} = [\mathbf{h}_{-M} \odot \mathbf{f}_{-M} \quad \mathbf{h}_{-M+1} \odot \mathbf{f}_{-M+1} \quad \cdots \quad \mathbf{h}_M \odot \mathbf{f}_M] \quad (3)$$

式中: \mathbf{f}_i ($i = -M, \dots, M$) 为 θ_i 处的时域导向矢量; \odot 为 Hadamard 积。

由于平台的俯冲下视几何特点,不同距离门上的同一方位角处散射点的多普勒频率并不相同。因此对不同距离门的距离压缩信号,需要构造不同的观测矩阵。对图 1 所示几何关系,若待处理距离门所对应斜距为 r ,则式(3)中矩阵第 k 列的导向矢量为

($M \ll N$) 维观测矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 对 \mathbf{x} 进行线性投影变换,得到长度为 M 的观测采样 \mathbf{y} 。那么就可以利用优化求解方法由 \mathbf{y} 精确或高概率地重构出原始信号 \mathbf{x} 。即对 $N \times N$ 维基矩阵 $\boldsymbol{\Psi} = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N\}$,信号 \mathbf{x} 可表示为

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\Psi} \mathbf{s} = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i \quad (6)$$

式中: \mathbf{s} 为 \mathbf{x} 的展开系数构成的 $N \times 1$ 维列向量,且 $s_i = \langle \mathbf{x}, \psi_i \rangle$ 。如果 \mathbf{s} 中只有 K 个非零(或绝对值较大)的系数,而其他 $N-K$ 个系数都为 0(或绝对值很小),则称信号 \mathbf{x} 是 K -稀疏的。对 \mathbf{x} 线性投影变换后长度为 M 的观测采样为

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi} \mathbf{s} = \boldsymbol{\Theta} \mathbf{s} \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\Theta} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi}$ 为 CS 矩阵; $\boldsymbol{\Phi}$ 为测量矩阵。

由于观测数量 M 远小于信号长度 N ,直接由观测数据 \mathbf{y} 重构 \mathbf{x} 的线性方程是欠定的,CS 理论证明当矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 具有有限等距性质(RIP)时, \mathbf{s} 能够以很大的概率由观测数据 \mathbf{y} 精确重构。RIP 的一

个等价描述是矩阵 Θ 的所有 K 列子向量集几乎正交(矩阵的列比行多,因此矩阵的列不会严格正交)。CS 信号重构算法即是求解满足 $\mathbf{y} = \Theta \mathbf{s}$ 的最稀疏解,此问题可转化为以下约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \|\mathbf{s}\|_1 \\ \text{s. t.} \quad & \|\mathbf{y} - \Theta \mathbf{s}\|_2 \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

式中: ε 为噪声门限; $\ell = 0$ 的零范数为 \mathbf{s} 的非零元素个数,可直接用来描述待估向量的稀疏特性。

但 ℓ_0 最小化问题没有快速求解算法。在 CS 理论中,可以将 ℓ_0 最小化问题松弛为 ℓ_1 最小化问题,进而用线性规划技术求解。通常进一步将问题通过 ℓ_1 正则化为以下无约束优化问题,即

$$\min_{\mathbf{s}} \|\mathbf{y} - \Theta \mathbf{s}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{s}\|_1 \quad (9)$$

式中: λ 为正则化参数, $\lambda > 0$ 。

若式(2)的解具有稀疏特性,即成像场景的方位响应 σ 中的多数元素为 0(或很小),则通过令 $\mathbf{s} = \sigma, \Theta = \mathbf{A}$,式(2)的前视成像方位分辨率增强问题可以通过 CS 方法求解。利用式(9),前视成像方位分辨率增强问题的 ℓ_1 正则化求解模型为

$$\hat{\sigma} = \min_{\sigma} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\sigma\|_2^2 + \lambda \|\sigma\|_1 \quad (10)$$

上述 ℓ_1 正则化问题可以采用迭代阈值类算法高效求解,其存在的问题是重构输出背景信号的统计特性无法计算,因而无法进行 CFAR 目标检测等处理。新的 CAMP 重构算法则可以获得场景的非稀疏估计结果,其输出的非稀疏背景信号的统计特性与常规匹配滤波处理相似,因而可以对输出结果进行 CFAR 等雷达目标检测的处理。

CAMP 算法是近似消息传递(AMP)算法的改进,以应用于复数 LASSO(Least Absolute Shrinkage and Selection Operation)问题。CAMP 算法有更高的相位转移曲线和精确度,适合应用于雷达信号这类复信号的处理。给定门限 τ ,降采样率为 δ ,则 CAMP 算法实现流程的伪代码如下:

初始化: $\hat{\sigma} = 0 \quad \mathbf{z}^0 = \mathbf{y} \quad t = 0$

While $t < \text{itermax}$

$$\tilde{\sigma}^t = \mathbf{A}^H \mathbf{z}^{t-1} + \hat{\sigma}^{t-1}$$

$$b_t = \text{median}(|\tilde{\sigma}^t|) \sqrt{1/\ln 2}$$

$$\mathbf{z}^t = \mathbf{y} - \mathbf{A}\hat{\sigma}^{t-1} + \mathbf{z}^{t-1} \frac{1}{2\delta} \left\{ \left\langle \frac{\partial \eta^R}{\partial x^R}(\tilde{\sigma}^t; b_t \tau) \right\rangle + \right.$$

$$\left. \left\langle \frac{\partial \eta^I}{\partial x^I}(\tilde{\sigma}^t; b_t \tau) \right\rangle + 2 \left\langle \frac{\partial \eta^R}{\partial x^I}(\tilde{\sigma}^t; b_t \tau) \right\rangle \right\}$$

$$\hat{\sigma}^t = \eta(\tilde{\sigma}^t; b_t \tau)$$

End

其中, $\hat{\sigma}^t$ 为第 t 次迭代后的重构信号; \mathbf{z}^t 为第 t 次迭代后的残差; b_t 为噪声标准差估计结果; median 表示中值操作; itermax 表示最大迭代次数; $\langle \cdot \rangle$ 表示对一个向量求平均值; \mathbf{A}^H 表示观测矩阵 \mathbf{A} 的共轭转置; η^R 和 η^I 分别为复数软阈值函数的实部和虚部; $\frac{\partial \eta^R}{\partial x^R}$ 为 η^R 对输入实部的偏导数; $\frac{\partial \eta^I}{\partial x^I}$ 为 η^I 对输入虚部的偏导数; $\frac{\partial \eta^R}{\partial x^I}$ 为 η^R 对输入虚部的偏导数。

复数软阈值函数 $\eta(\mu + vi; \lambda)$ 表示式为

$$\eta(\mu + vi; \lambda) = \begin{cases} \mu + vi - \frac{\lambda(\mu + vi)}{\sqrt{u^2 + v^2}} & (u^2 + v^2 > \lambda^2) \\ 0 & (u^2 + v^2 \leq \lambda^2) \end{cases} \quad (11)$$

3 多通道前视成像处理流程

雷达对海面大型目标进行扫描探测时,能很好地满足场景稀疏的条件,即式(2)中的解 σ 具有良好的稀疏性,因此可应用 CAMP 稀疏信号重构算法对式(2)进行求解,完成实波束前视成像的分辨率增强处理。假定雷达有四个接收通道,则具体实施方案如图 2 所示。

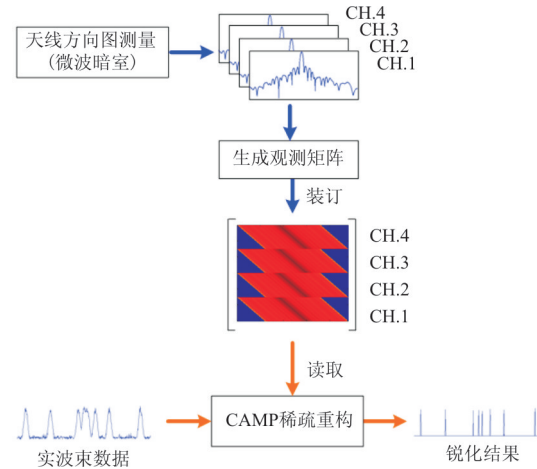


图 2 基于 CAMP 稀疏信号重构的前视成像流程
Fig. 2 Forward-looking imaging process based on CAMP sparse signal reconstruction

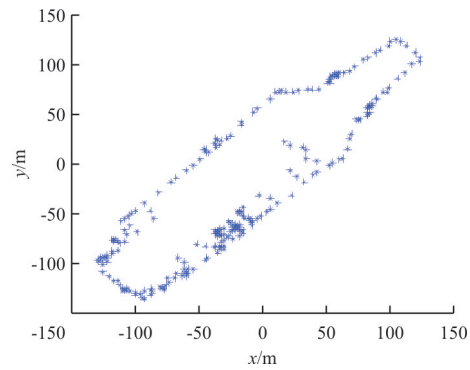
由于实际天线方向图与设计结果存在一定的误差,除按实际参数计算导向矢量外,观测矩阵中天线权值系数 \mathbf{h} 的确定也需要以定标测量的方式进行。在微波暗室的理想测量条件下,以一定的方位角间隔(最好是天线的扫描角间隔)对每一个接收通道天线子阵测量实际天线方向图的幅相数据。

对每个接收通道回波数据,按可能的扫描角度范围截取天线方向图幅相数据,导向矢量取全 1 向量后按式(1)形成观测矩阵。将各通道的观测矩阵合并后,可以得到如图 2 所示的总观测矩阵。观测矩阵生成之后,即可装订保存到雷达处理机的存储器中。

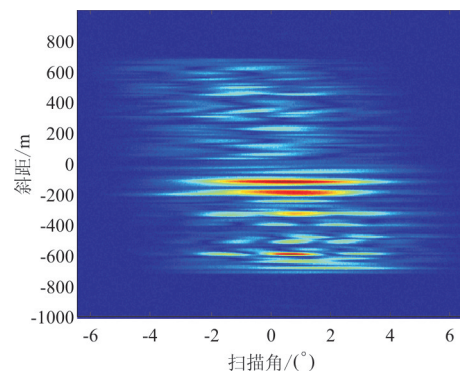
实际应用时,波束锐化处理程序模块首先读取预存好的观测矩阵数据,当输入一次扫描的各通道回波数据后,计算每个距离门处的导向矢量,并按式(4)逐列与观测矩阵作 Hadamard 积,形成对应距离门处的实际观测矩阵。通过 CAMP 算法重构稀疏目标响应,得到分辨率增强的结果。当实际波束扫描的速度较快,即采样数据的角度间隔大于天线测量的角度间隔时,可以对观测矩阵数据进行整数倍的隔行抽取,以减小计算量。逐距离门处理完毕后形成锐化图像,送显示或检测目标并测量其方位角度。

4 实验结果

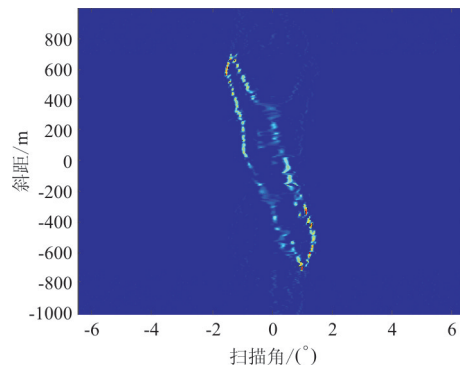
仿真所采用的系统参数如下:雷达中心频率为 17 GHz,信号带宽 80 MHz,脉冲宽度 $5 \mu\text{s}$,采样率为 150 MHz,通道数为 4,脉冲重复频率为 3 000 Hz,波束扫描间隔为 0.03° 。平台运动速度为 $V=1\,500 \text{ m/s}$,下视角 $\alpha=55^\circ$,中心斜距 $R_0=5 \text{ km}$ 。相控阵天线采用全孔径发射,多个子孔径通道分别接收的工作方式,4 个接收通道的天线方向图波束宽度均为 5.63° 。采用简单的散射点目标集合的方式来仿真典型舰船目标的回波,目标的散射点几何位置分布如图 3(a)所示,目标位置在波束照射区的中心;回波信号经过距离压缩和走动校正处理后的实波束图像如图 3(b)所示;采用本文的 CAMP 稀疏重构方法进行处理,所得角度分辨率增强后的结果如图 3(c)所示。



(a) 仿真舰船目标的点分布图



(b) 实波束图像



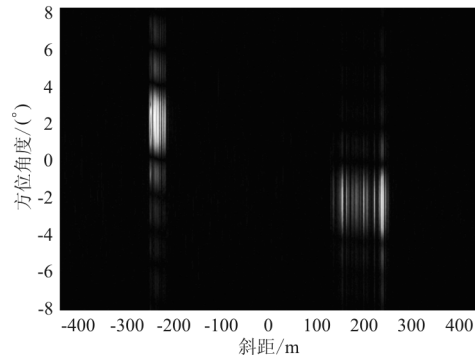
(c) 分辨率增强的输出

图 3 舰船目标的仿真结果

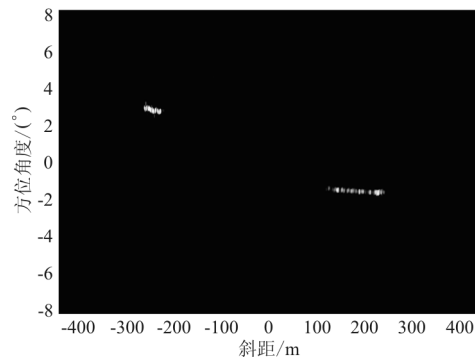
Fig. 3 Simulation results of ship targets

用于实验的实际数据采集自一部 X 波段雷达,其中心频率为 9.8 GHz,信号带宽 100 MHz,脉冲宽度 $10 \mu\text{s}$,采样率为 150 MHz,通道数为 6,脉冲重复频率为 1 500 Hz,波束扫描间隔为 0.02° 。雷达固定架设在濒海高地,方位向机械扫描,对海面的舰船目标进行监视成像。前视成像分辨率增强处理流程如图 2 所示,方向图向量 \mathbf{h} 由暗室测量得到的定标数据构造,进而根据式(3)~式(5)构造

出观测矩阵。由回波数据得到的实波束图像的一小部分如图 4(a)所示,对应做角度分辨率增强处理后的结果如图 4(b)所示,水平向为斜距,垂直向为方位角度,可以看出:采用本文的 CAMP 重构方法,可以获得非常显著的角度分辨率增强效果。



(a) 实波束图像



(b) 角度分辨率增强输出

图 4 舰船目标的实测数据处理结果

Fig. 4 Processing results of ship target measured data

5 结束语

基于压缩感知理论与复近似消息传递(CAMP)算法,本文提出了一种多通道前视雷达成像角度分辨率增强算法,仿真数据和实测数据验证了算法的有效性。得益于 CAMP 算法,本文算法输出数据能够直接做 CFAR 处理,且迭代实现有利于工程应用,可以广泛应用于现有雷达,具有很高的实用价值。后续研究中,将针对算法复杂度和鲁棒性等开展进一步深入探索,并提出相关算法,同时利用实测数据仿真验证算法的工程实用性。

参考文献

[1] BAIKE J. Field test of bistatic forward-looking synthetic

aperture radar[C]// IEEE International Radar Conference. Arlington, VA, USA: 2005: 211-217.

- [2] SUN Jinping, LÜ Yan, HONG Wen, et al. The polar format imaging algorithm for forward-looking bistatic SAR [C]// 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen, Germany: 2008: 37-49.
- [3] SUWA K, IWAMOTO M. Forward looking radar imaging method using multiple receiver antennas and digital beam forming technique[C]// Proceedings of 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, South Korea; IEEE, 2005: 2018-2026.
- [4] GUAN Jinchun, HUANG Yulin, YANG Jianyu, et al. Improving angular resolution based on maximum a posteriori criterion for scanning radar[C]// 2012 IEEE Radar Conference. Atlanta, GA, USA; IEEE, 2012: 76-85.
- [5] LU Jingyue, ZHANG Lei, WANG Guanyong. Ambiguity resolving and imaging algorithm for multi-channel forward-looking synthetic aperture radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(12): 2820-2825.
- [6] 穆佳. 雷达前视成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- MU Jia. Study on radar forward-looking imaging method [D]. Xi'an; Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [7] ZHANG Jie, WU Di, ZHU Daiyin. A forward-looking super-resolution imaging algorithm for airborne/missile-borne array radar[J]. Radar Science and Technology, 2018, 16(2): 119-124.
- [8] 谭珂. 机载前视雷达扫描波束锐化方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- TAN Ke. Research on beam sharpening method of airborne forward-looking scanning radar[D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [9] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [10] 夏洁. 机载相控阵雷达前视超分辨率技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- XIA Jie. Forward-looking superresolution imaging for airborne phased array radar[D]. Hefei; University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [11] JIAO Shuhong, TANG Lin, QI Huan, et al. Iterative shrinkage thresholding radar forward-looking imaging method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3384-3391.
- [12] DONOHO D L, MALEKI A, MONTANARI A. Message-passing algorithms for compressed sensing[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(45): 18914-18919.
- [13] MALEKI A, ANITORI L, YANG Z, et al. Asymptotic analysis of complex LASSO via complex approximate mes-

- 航规定: CCAR-23-R3[S]. 北京: 中国民用航空局, 2004. Civil Aviation Administration of China. Airworthiness regulations for normal, practical, special effects and commuting aircraft: CCAR-23-R3[S]. Beijing: CAAC, 2004. (in chinese)
- [14] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011. Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards: transport category airplanes: CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in chinese)
- [15] 赵越让. 运输类飞机合格审定飞行试验指南[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013. ZHAO Yuerang. Flight test guide for certification of trans-

port category airplanes[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013. (in Chinese)

作者简介:

张甲奇(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:模型自由飞试验和无人机性能试飞。

席亮亮(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:模型自由飞试验和无人机性能试飞。

温庆(1983—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:气动特性分析。

(编辑:马文静)



(上接第 61 页)

- sage passing(CAMP)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 34(7): 4290-4308.
- [14] ANITORI L, MALEKI A, OTTEN M, et al. Design and analysis of compressed sensing radar detectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(4): 813-827.
- [15] 吴辰阳, 魏中浩, 张冰尘, 等. 基于复近似信息传递的多通道 SAR 成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1249-1254. WU Chenyang, WEI Zhonghao, ZHANG Bingchen, et al. Multi-channel SAR imaging method based on CAMP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(6): 1249-1254. (in Chinese)
- [16] 郭宾, 张冰尘. 基于 CAMP 稀疏重建算法的并行实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5): 24-28. GUO Bin, ZHANG Bingchen. Parallel implementation of

sparse reconstruction algorithm based on CAMP[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(5): 24-28. (in Chinese)

作者简介:

侯彦(1975—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:雷达系统。

上官伟(1977—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:雷达系统。

孙进平(1975—),男,硕士,教授。主要研究方向:雷达信号处理。

(编辑:马文静)