

文章编号: 2095-4980(2018)06-1087-06

一种基于雷达窄带回波的转动参数估计方法

宋鑫华¹, 叶春茂^{*1}, 杨 健²

(1.北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2.清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要: 对单散射点和多散射点转动目标产生的雷达回波进行建模, 分析了转动散射点对雷达回波的调制, 使用 CLEAN 算法思想分离多散射点的信号; 使用不同的带有加速度和加加速度调制的信号对回波信号进行匹配傅里叶变换, 通过搜索的方式提取出与目标信号匹配最好的加速度与加加速度值; 使用最小二乘法估计目标的转动频率, 进而提取出目标的其他转动参数, 在存在多普勒混叠的情况下通过提取目标的加速度估计值实现了对多散射点的转动目标的参数估计。最后, 通过仿真实验验证了方法的有效性。

关键词: 微动; 参数估计; 多普勒混叠; 匹配傅里叶变换

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1087

A method for rotating parameters estimation based on narrowband radar echoes

SONG Xinhua¹, YE Chunmao^{*1}, YANG Jian²

(1.Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

2.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The signal model of the target with single and multiple scattering points is established. And the modulation of the radar echoes from rotating scattering point is analyzed. The echo signal of multi-scattering points is separated by the “CLEAN” method. Use different Doppler modulated signal by acceleration and jerk to perform match Fourier transform for the echo signal. Then, the acceleration and jerk parameters are estimated by matching pursuit criterion. The least square method is utilized to estimate rotation frequency of the target and other rotation parameters of the target may be estimated afterwards. This method can work well when Doppler frequency aliasing exists. In the end, the simulation and experiment verify the effectiveness of the method.

Keywords: micro-motion; parameters estimation; Doppler frequency aliasing; match Fourier transform

雷达目标特征的提取与识别是雷达信号处理中的一项重要应用。雷达发射波形与目标特性相互作用, 产生雷达目标回波, 通过对雷达目标回波进行处理, 来进行雷达目标的特征提取。雷达目标运动中, 除质心平动外的目标相对于雷达径向距离上的转动、振动等运动称为微动。微动会对雷达回波产生调制, 微动调制的回波反映出目标的运动特性、散射特性等, 目标的微动信息提取, 例如转动信息提取, 是目标转动视角估计、微动成像以及微动目标的尺寸估计的基础, 为雷达目标特征信息提取与识别提供了依据^[1-3]。对目标微动调制的雷达目标回波进行微动分析与信号参数提取, 是进行目标运动状态分析与目标识别的重要手段。

目前对微动目标雷达信号的处理与提取主要分为两种情况: a) 信号频率规律未知的情况下, 通过对雷达信号进行时频分析, 通过峰值频率检测等方法, 获得回波的瞬时频率变化, 用以计算目标微多普勒并估计运动情况。文献[4]采用基于信号时频分布的方法进行信号的瞬时频率估计。文献[5]通过基于微多普勒时频谱的峰值法用于估计目标的加速度并进行补偿。文献[6]使用频率峰值检测估计大加速度目标信号的多普勒频率, 并进行加速度补偿, 估计了大加速度目标的转动频率。b) 信号频率规律已知的情况下, 基于信号的建模, 通过参数化的瞬时频率估计, 分析估计出信号模型的表达参数, 进而提取微多普勒信息。文献[7-9]通过基于不同信号模型下的正弦曲线 Hough 变换来提取时频分布图中的频率曲线, 进行微多普勒信息提取。文献[10]通过基于瞬时频率

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61490693)

*通信作者: 叶春茂 email:danielgodman@163.com

估计和随机抽样一致性(RANdom SAmples Consensus, RANSAC)的方法估计散射点的微多普勒曲线。文献[11]建立目标散射特性模型,使用时变自回归模型估计散射中心瞬时频率,进而得到目标几何尺寸和微动参数。在信号频率规律已知的情况下,还可以通过对信号进行基函数分解和匹配傅里叶变换^[12]进行微动参数估计。文献[13]使用基函数分解的方法对振动和转动目标进行微多普勒估计。近年,通过基于雷达回波的微多普勒分析来进行转动参数估计的方法逐渐发展起来,然而在存在多普勒混叠的情况下,这类方法不是很适用,影响了该类方法在窄带回波或大目标方面的适用性。

本文首先对转动目标的雷达回波进行建模,分析了单散射点和多散射点的微动目标的雷达回波的多普勒调制成分,提出一种基于雷达回波的目标微动参数估计方法,使用 CLEAN 算法思想分离信号中多散射点的信号成分,对回波信号进行匹配傅里叶变换,通过搜索的方式提取出与目标信号匹配最好的加速度与加加速度值,进而估计出目标散射点的其他运动参数。该方法能够在有多普勒混叠的情况下通过对目标加速度的估计和分析进行目标转动信息的提取,对于窄带雷达回波的目标参数提取、目标微动分析、目标转动视角估计、微动目标的尺寸估计以及目标识别等具有一定的价值。最后通过仿真实验验证了方法的有效性。

1 转动目标的散射点建模

对于多散射点的目标而言,假设雷达发射信号为:

$$s_t(t_m) = \sigma \exp(j2\pi f_c t_m) \quad (1)$$

则雷达接收到的基带回波信号为:

$$s_b(t_m) = \sum_k \sigma_k \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2r_k(t_m)}{c}\right) \quad (2)$$

式中: σ_k 为第 k 个散射点的回波幅度; $t_m = mT_r$ 为脉冲采样时间; f_c 为载频; $r_k(t_m)$ 为第 k 个散射点相对于雷达的径向距离。

如图 1 所示,在远场条件下,对于一个微动目标来说,第 k 个散射点与雷达的径向距离 $r_k(t_m)$ 可以写为:

$$r_k(t_m) \approx r_T(t_m) + r_R(t_m) \quad (3)$$

式中: $r_T(t_m)$ 表示目标平动成分; $r_R(t_m)$ 表示目标微动成分。

进一步,对于转动目标,则可写为:

$$r_k(t_m) \approx r_T(t_m) + L_k \sin(\omega_0 t_m + \varphi_k) \quad (4)$$

式中: L_k 表示转动的幅度; ω_0 为转动角速度; φ_k 为转动初相。

根据式(4),散射点相对雷达的径向速度、加速度和加加速度分别可写为:

$$v_k(t_m) = v_T(t_m) + L_k \omega_0 \cos(\omega_0 t_m + \varphi_k) \quad (5)$$

$$\alpha_k(t_m) = \alpha_T(t_m) - L_k \omega_0^2 \sin(\omega_0 t_m + \varphi_k) \quad (6)$$

$$\gamma_k(t_m) = \gamma_T(t_m) - L_k \omega_0^3 \cos(\omega_0 t_m + \varphi_k) \quad (7)$$

式中: $v_T(t_m)$ 为平动速度成分; $\alpha_T(t_m)$ 为平动加速度成分; $\gamma_T(t_m)$ 为平动加加速度成分。

根据式(5),目标微动引起的微多普勒带宽 B_{md} 为:

$$B_{md} = 2D\omega_0/\lambda \quad (8)$$

式中: $D = 2L_k$ 为目标最大尺寸; λ 为载波波长。

若雷达脉冲重复频率 f_r 小于 B_{md} ,则目标微多普勒将发生混叠,影响目标微动参数的估计。

2 单散射点的参数估计方法

对于单散射点目标而言,根据式(2),雷达接收到的基带回波信号为:

$$s_b(t) = \sigma \exp\left(-j2\pi f_c \frac{2r(t_m)}{c}\right) \quad (9)$$

单散射点相对于雷达的径向距离为:

$$r(t_m) \approx r_T(t_m) + r_R(t_m) = r_T(t_m) + L \sin(\omega_0 t_m + \varphi_k) \quad (10)$$

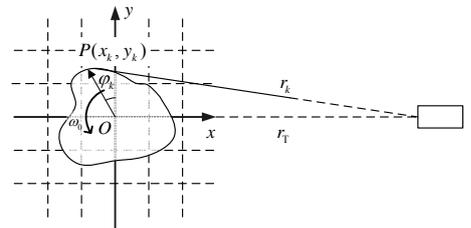


Fig.1 Schematic diagram of the distance between the target and the radar
图 1 目标与雷达距离示意图

同时，根据式(5)~(7)，单散射点的速度、加速度和加加速度可表示为：

$$v(t_m) = v_T(t_m) + L\omega_0 \cos(\omega_0 t_m + \varphi) \tag{11}$$

$$\alpha(t_m) = \alpha_T(t_m) - L\omega_0^2 \sin(\omega_0 t_m + \varphi) \tag{12}$$

$$\gamma(t_m) = \gamma_T(t_m) - L\omega_0^3 \cos(\omega_0 t_m + \varphi) \tag{13}$$

对于单散射点旋转目标的参数估计，可采用最大似然估计的方法进行。将式(10)进行泰勒展开，可写为：

$$r(t_m) = r_T(t_m) + L \sin(\omega_0 t_m + \varphi) = v_s t_m + \frac{\alpha_s}{2} t_m^2 + \frac{\gamma_s}{6} t_m^3 \tag{14}$$

因此，可以对雷达基带回波信号进行不同的加速度和加加速度匹配，通过最大似然估计的方法求出目标的加速度和加加速度估计。假设窄带回波信号为 $s_b(t_m)$ ，则目标径向加速度的估计 $\hat{\alpha}_s$ 和加加速度的估计 $\hat{\gamma}_s$ 为：

$$(\hat{\alpha}_s, \hat{\gamma}_s) = \max_{\alpha_s, \gamma_s} \left\{ \max \left\{ \left| \text{FT} \left(s_b(t_m) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\alpha_s}{2} t_m^2 + \frac{\gamma_s}{6} t_m^3 \right) \right) \right) \right| \right\} \right\} \tag{15}$$

设相干处理时间为 T_{obs} ，通过上式可求出在 T_{obs} 时间段内目标径向加速度的估计 $\hat{\alpha}_s$ 和加加速度的估计 $\hat{\gamma}_s$ 的匹配值。在信号持续时间 T 内对雷达基带回波信号进行 N 次式(15)的相干处理，可以得出目标加速度 $\hat{\alpha}_s$ 关于时间 t 的估计值序列 $\hat{\alpha}_s(t_n)$ 。

根据式(12)，目标加速度估计序列 $\hat{\alpha}_s(t_n)$ 可写为：

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_s(t_n) &= \alpha_T(t_n) - L\omega_0^2 \sin(\omega_0 t_n + \varphi) = \alpha_T(t_n) + L\omega_0^2 \sin(\omega_0 t_n + \varphi + \pi) = \\ &= C_0 + a_0 t_n + b_0 t_n^2 + A \sin(2\pi f_0 t + \phi_0) = C_0 + a_0 t_n + b_0 t_n^2 + A_0 \sin(2\pi f_0 t_n) + B_0 \cos(2\pi f_0 t_n) \end{aligned} \tag{16}$$

通过目标加速度估计值序列 $\hat{\alpha}_s(t_n)$ 的 N 个值，可写为：

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_s(t_1) \\ \hat{\alpha}_s(t_2) \\ \vdots \\ \hat{\alpha}_s(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(2\pi f_0 t_1) & \cos(2\pi f_0 t_1) & 1 & t_1 & t_1^2 \\ \sin(2\pi f_0 t_2) & \cos(2\pi f_0 t_2) & 1 & t_2 & t_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(2\pi f_0 t_N) & \cos(2\pi f_0 t_N) & 1 & t_N & t_N^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \\ C_0 \\ a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

根据表达式构造最小二乘矩阵协方差矩阵，即可获得关于和的估计。在一定的频率范围内进行上述参数估计，并获得最小二乘均方误差(Mean-Square Error, MSE)评估值，根据最小 MSE 获得，就可以估计出转动频率 f_0 ，以及参数 C_0, a_0, b_0, A_0, B_0 。其中，

$$\hat{L}_k = \sqrt{(A_0^2 + B_0^2) / (2\pi f_k)^2} \tag{18}$$

$$\varphi_k = \text{atan2}(B_0, A_0) - \pi \tag{19}$$

式中 $\text{atan2}(y,x)$ 是指原点至点(x,y)的方位角函数。

3 多散射点的参数估计方法

对式(4)进行二阶泰勒展开，得到

$$r_k(t_m) = r_T(t_m) + L_k \sin(\omega_k t_m + \varphi_k) = v_s t_m + \frac{\alpha_s}{2} t_m^2 + \frac{\gamma_s}{6} t_m^3 \tag{20}$$

因此，依旧可以使用章节 2 中对雷达基带回波信号进行不同的加速度和加加速度匹配的方法来进行加速度与加加速度的估计。不过在参数估计之前，需要进行散射点的分离与参数关联。

3.1 多散射点成分分离与参数提取

要进行转动参数估计，需要对基带回波信号进行散射点成分分离和信息提取。“CLEAN”的含义是指利用迭代的方式将多散射点回波信号中的各个散射点信号分量逐个剔除^[14-15]。因此可以对回波信号进行连续累积，通过 CLEAN 方法和匹配傅里叶变换进行散射点成分分离和信息提取。

在相干处理时间 T_{obs} 内，令 $p=0, s_p(t_m) = s_b(t_m)$ 。同时，设

$$h_p(t_m | \alpha_p, \gamma_p) = \exp \left(-j4\pi \frac{f_c}{c} \left(\frac{\alpha_p}{2} t_m^2 + \frac{\gamma_p}{6} t_m^3 \right) \right) \tag{21}$$

式中 (α_p, γ_p) 是要估计的径向加速度和加加速度。将检测式写为:

$$B_p(\alpha_p, \gamma_p) = \left| \int s_b(t_m) h_p^*(t_m | \alpha_p, \gamma_p) \right| \tag{22}$$

通过以下条件求出 (α_p, γ_p) 的估计值:

$$(\hat{\alpha}_p, \hat{\gamma}_p) = \max_{(\alpha_p, \gamma_p)} B_p(\alpha_p, \gamma_p) \tag{23}$$

此时, 就可以从信号当中剔除第 p 个散射点的成分。

$$s_{p+1}(t_m) = s_p(t_m) - B_p(\hat{\alpha}_p, \hat{\gamma}_p) h_p(t_m | \hat{\alpha}_p, \hat{\gamma}_p) \tag{24}$$

重复以上步骤, 直到剩余的信号能量低于临界值。

3.2 转动参数估计

3.2.1 散射点参数关联

对于第 k 个散射点而言, 在 t_1 时刻的估计参数为 $(v_k(t_1), a_k(t_1))$, 因此在时间差较小的情况下, 可以根据 t_1 时刻的估计参数推算出 t_2 时刻的参数 $\hat{v}_k(t_2)$, 将其与 t_2 时刻的每个散射点的估计参数 $v_n(t_2)$ 进行比较, 找出第 k 个散射点在 t_2 时刻的估计参数 $(v_k(t_2), a_k(t_2))$, 即完成了不同时刻的散射点参数关联。

$$\hat{v}_k(t_2) = v_k(t_1) + a_k(t_1)(t_2 - t_1) \tag{25}$$

$$\hat{n} = \min(|\hat{v}_k(t_2) - v_n(t_2)|) \tag{26}$$

3.2.2 转动参数估计

经过散射点分离与参数关联后, 可以得到不同散射点的加速度估计序列。因此, 可以直接使用单散射点参数估计中的方法, 根据式(16)~(19)可以得出不同散射点的转动参数估计。

4 仿真实验

仿真实验条件设定为: 雷达信号载频为 5 GHz, 脉冲重复频率为 200 Hz, 信号长度为 2 048 个脉冲, 即 5.117 5 s。假设已进行了目标平动补偿, 目标存在两个独立散射点, 散射点 1 的转动参数为: 转动半径 0.8 m, 转动频率 0.5 Hz, 初始幅角 30°; 散射点 2 的转动参数为: 转动半径 3 m, 转动频率 0.25 Hz, 初始幅角 120°。目标的散射点的运动情况如图 2 所示。按照仿真实验设定参数生成雷达回波, 回波的时频图如图 3 所示。从图 3 可以看出, 雷达回波存在多普勒混叠。对回波进行处理, 分离出了 2 个散射点, 其速度和加速度的估计序列如图 4 和图 5 所示。由于存在多普勒混叠, 因此对速度的估计也存在混叠。根据加速度序列对散射点其余运动参数进行估计, 其中散射点 1 的转动参数估计值为: 转动半径 0.782 6 m, 转动频率 0.5 Hz, 初始幅角 28.611 5°; 散射点 2 转动参数估计值为: 转动半径 2.994 8 m, 转动频率 0.25 Hz, 初始幅角 119.896 1°。

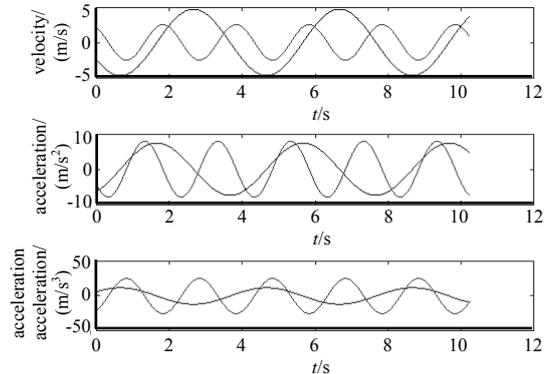


Fig.2 Motion of the target scattering points
图 2 目标散射点运动情况展示

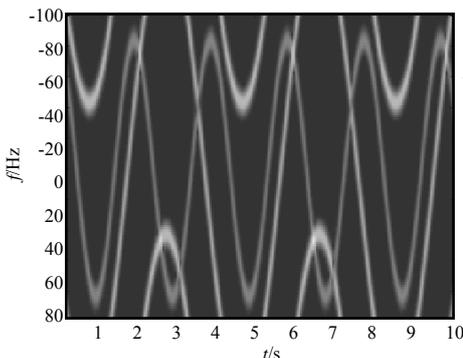


Fig.3 Time frequency analysis of radar echo signal
图 3 回波信号时频图

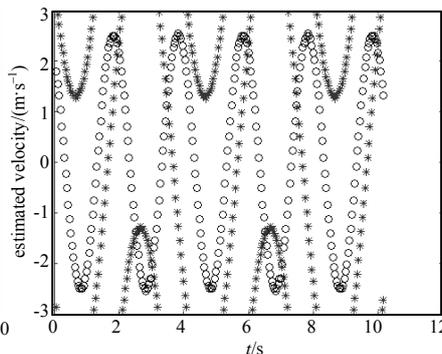


Fig.4 Estimated velocity sequence of the scattering point
图 4 散射点速度估计序列

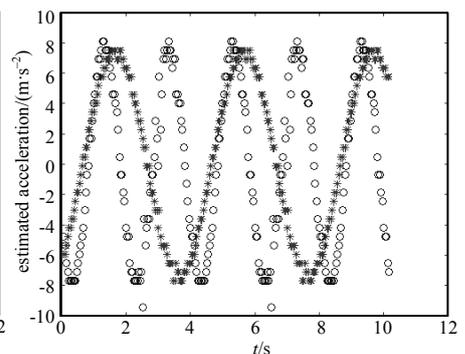


Fig.5 Estimated acceleration sequence of the scattering point
图 5 散射点加速度估计序列

5 结论

本文对单散射点和多散射点目标的雷达信号回波进行了建模，提出基于雷达回波的目标转动参数估计方法，对雷达回波进行散射点的分离，对雷达回波信号叠加基于加速度和加加速度搜索值的匹配信号方法，估计出目标的加速度序列，通过对目标的加速度估计序列值的处理进行散射点的转动参数估计。通过仿真实验验证，在有多普勒混叠的情况下，使用该方法进行散射点目标的转动参数估计，能够取得不错的效果。但是在散射点分离及参数关联方面，该方法还有一些不足，需要在后续工作中进一步研究。

参考文献：

- [1] CHEN V C. Analysis of radar micro-Doppler with time-frequency transform[C]// Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing. Pocono Manor,PA,USA:IEEE, 2000:463-466.
- [2] CHEN V C,LI F,HO S S,et al. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proceedings on Radar,Sonar and Navigation, 2003,150(4):271-276.
- [3] CHEN V C,LI F,HO S S,et al. Micro-Doppler effect in radar:phenomenon,model,and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2006,42(1):2-21.
- [4] SEKHAR S C,SREENIVAS T V. Adaptive spectrogram vs. adaptive pseudo-Wigner-Ville distribution for instantaneous frequency estimation[J]. Signal Processing, 2003,83(7):1529-1543.
- [5] 高红卫,谢良贵,文树梁,等. 加速度对微多普勒的影响及其补偿研究[J]. 宇航学报, 2009,30(2):46-50. (GAO Hongwei,XIE Lianggui,WEN Shuliang,et al. Study on the influence of acceleration on micro-Doppler and the compensation of acceleration[J]. Journal of Astronautics, 2009,30(2):46-50.)
- [6] 李彦兵,张曦文,李飞,等. 一种大加速度机动目标微动参数估计方法[J]. 电子与信息学报, 2017,39(1):82-87. (LI Yanbing,ZHANG Xiwen,LI Fei,et al. Estimation of micro-motion feature for large accelerated target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(1):82-87.)
- [7] 张群,罗斌凤,管桦,等. 基于微 Doppler 提取的具有旋转部件雷达目标成像[J]. 自然科学进展, 2007,17(10):1410-1417. (ZHANG Qun,LUO Binfeng,GUAN Hua,et al. Imaging of radar target with rotating components based on micro Doppler extraction[J]. Progress in Natural Science, 2007,17(10):1410-1417.)
- [8] 刘进,马梁,王雪松,等. 微多普勒的参数化估计方法[J]. 信号处理, 2009,25(11):1759-1765. (LIU Jin,MA Liang,WANG Xuesong,et al. Extraction method of micro-Doppler based on TFD-Hough transform[J]. Signal Processing, 2009,25(11):1759-1765.)
- [9] SETLUR P,AMIN M,AHMAD F,et al. Indoor imaging of targets enduring simple harmonic motion using Doppler radars[C]// Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Athens,Greece: IEEE, 2006:141-146.
- [10] 曹文杰,张磊,杜兰,等. 基于瞬时频率估计的进动锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2015,37(5):1091-1096. (CAO Wenjie,ZHANG Lei,DU Lan,et al. Micro-Doppler frequency extraction for cone-shaped target with precession based on instantaneous frequency estimation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015,37(5):1091-1096.)
- [11] 韩勋,杜兰,刘宏伟. 基于窄带微多普勒调制的锥体目标参数估计[J]. 电子与信息学报, 2015,37(4):961-968. (HAN Xun,DU Lan,LIU Hongwei. Parameter estimation of cone-shaped target based on narrowband micro-Doppler modulation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015,37(4):961-968.)
- [12] 王盛利,李士国,倪晋麟,等. 一种新的变换——匹配傅里叶变换[J]. 电子学报, 2001,29(3):403-405. (WANG Shengli,LI Shiguo,NI Jinlin,et al. A new transform—match Fourier transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2001,29(3):403-405.)
- [13] SETLUR P,AMIN M,THAYAPARAN T. Micro-Doppler signal estimation for vibrating and rotating targets[C]// Proceedings of the Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications. Sydney,Australia:IEEE, 2005:639-642.
- [14] DENG H. Effective CLEAN algorithms for performance-enhanced detection of binary coding radar signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004,52(1):72-78.
- [15] 何云涛,江月松,钟宇. CLEAN 算法在机载毫米波综合孔径成像中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007,29(7):1757-1760. (HE Yuntao,JIANG Yuesong,ZHONG Yu, An application of the CLEAN algorithm in airborne mm-wave synthetic aperture imaging[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007,29(7):1757-1760.)

作者简介:



宋鑫华(1992-), 男, 山东省烟台市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理.
email:qlx3888@163.com.

叶春茂(1981-), 男, 湖北省咸宁市人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为雷达总体技术、雷达成像与识别.

杨 健(1965-), 男, 湖北省襄阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, IEICE 中国分会主席, IEEE AES 中国分会副主席, 主要研究方向为极化雷达遥感.

2018 年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀编委

方广有 中国科学院电子学研究所
龙 腾 北京理工大学
李立萍 电子科技大学

王宏强 国防科技大学
何小海 四川大学

2018 年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀审稿人

韩慧鹏 中国空间技术研究院
戎建刚 中国航天科工集团 8511 所
张小飞 南京航空航天大学

刘志伟 华东交通大学
杨 洋 承德石油高等专科学校
张晓平 中国空间技术研究院总体部

2018 年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀论文及作者

《电子束实现 210 nm 栅长 115 GHz GaAs 基 mHEMT 器件》
《直升机平台振动对太赫兹 SAR 成像的影响分析》
《基于太赫兹透射谱的中药材特征提取方案》
《无人机载 SAR 任务电子系统的研究与应用》
《基于扩展集员滤波与信息几何的机动目标跟踪》
《一种基于 FPGA+DSP 的处理机硬件架构》
《基于参数估计的分布式外源雷达接收站位选择》
《整机级 HIRF 仿真验证测试方案及测试自动化》

曾建平 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心
张晓灿 北京航空航天大学
赵 峰 北京邮电大学
邵 威 中国电子科技集团公司第三十八研究所
孙 伟 北京航空航天大学
王占超 北京航空航天大学
孟 琦 武汉大学
钟龙权 中国工程物理研究院应用电子学研究所