

基于长合成孔径的辐射源成像定位算法

王裕旗^① 孙光才^{*①} 杨军^② 邢孟道^① 杨小牛^③ 保铮^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安科技大学测绘科学与技术学院 西安 710071)

^③(中国电子科技集团公司第三十六研究所 嘉兴 314000)

摘要: 考虑到单平台测角的定位精度随目标的距离增加而下降、远距离处的方位定位精度有待提高的问题, 该文提出了一种基于长合成孔径的辐射源定位算法。该算法将合成孔径成像的概念引入到辐射源无源定位中, 通过平台的移动形成虚拟孔径, 以合成孔径雷达的方式处理数据, 获得很高的方位定位精度。对于单频辐射源, 接收信号在方位上等价为线性调频信号, 其调频率与辐射源的距离成反比, 通过距离搜索和方位聚焦的方法在距离-方位域完成信号聚焦, 直接获得辐射源2维成像定位结果。针对宽波束侦察的特点, 分析了低采样率下调频率距离-方位的耦合关系, 并提出了信号角度估计和2维成像定位的方法。理论推导和实测数据处理结果验证了该定位算法的有效性。

关键词: 无源定位; 单平台定位; 长合成孔径; 距离-方位定位; 单频连续信号定位; 方位调频率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)01-0185-10

DOI: 10.12000/JR19080

引用格式: 王裕旗, 孙光才, 杨军, 等. 基于长合成孔径的辐射源成像定位算法[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 185–194. doi: 10.12000/JR19080.

Reference format: WANG Yuqi, SUN Guangcai, YANG Jun, *et al.* Passive localization algorithm for radiation source based on long synthetic aperture[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 185–194. doi: 10.12000/JR19080.

Passive Localization Algorithm for Radiation Source Based on Long Synthetic Aperture

WANG Yuqi^① SUN Guangcai^{*①} YANG Jun^② XING Mengdao^①
YANG Xiaoniu^③ BAO Zheng^①

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710071, China)

^③(The 36th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Jiaxing 314000, China)

Abstract: When the direction-of-arrival estimation is made by a single platform, the localization accuracy decreases with increases in the distance from the radiation source, which means the localization accuracy of the azimuth of the radiation source at long distances must be improved. To address this problem, we propose a radiation-source localization algorithm based on a long synthetic aperture. This algorithm introduces the use of synthetic aperture imaging to the passive localization of radiation sources. A long virtual aperture is obtained by movement of the platform, and received data is processed in the form of synthetic aperture radar to obtain high azimuth localization accuracy. For a single-frequency radiation source, the received signal is equivalent to a linear frequency-modulation signal in the azimuth domain, and its chirp rate is inversely proportional to the distance from the radiation source. A range search and azimuth-focusing method are used to perform signal focusing in the range-azimuth domain, and the localization of the radiation source is obtained directly by two-

收稿日期: 2019-09-05; 改回日期: 2020-02-11; 网络出版: 2020-02-28

*通信作者: 孙光才 gcsun@xidian.edu.cn *Corresponding Author: SUN Guangcai, gcsun@xidian.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年自然科学基金(61825105)

Foundation Item: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (61825105)

责任主编: 万显荣 Corresponding Editor: WAN Xianrong

dimensional imaging. Moreover, with respect to the characteristics of wide-beam reconnaissance, we analyzed the range-azimuth coupling relationship of the chirp rate at a low sampling frequency. On this basis, methods for direction-of-arrival estimation and two-dimensional imaging localization are proposed. Our theoretical derivation and experimental data processing results verify the validity of this algorithm.

Key words: Passive localization; Single station localization; Long synthetic aperture; Range-azimuth localization; Single frequency continuous signal localization; Azimuth chirp rate

1 引言

在无源电子侦察中, 辐射源精确定位具有重要的意义^[1-4]。首先, 确定通信基站、雷达等辐射源位置后, 可以对这些电子设备实施精确打击; 其次, 确定辐射源位置后, 可以降低干扰信号的发射功率对目标辐射源实施更加精确的干扰; 最后, 信号分选是电子对抗中的基本问题, 由于辐射源位置是不能发生捷变的, 因此国内已经有学者认为它可以成为信号分选可靠和强有力的依据^[4]。根据观测站的数量可以将无源定位技术分为两类: 单站无源定位和多站无源定位。

多站无源定位主要通过定位参数获得辐射源的位置, 其中主要有多站测向交叉定位、多站时差定位、多站频差定位和时差频差联合定位^[5-9]。这类定位方法的优点是其不受信号形式的限制, 但需要两个以上的基站, 基站间数据的传输和时间的同步等问题增加了系统的设计复杂度。单站定位基本的原理是通过测向获得辐射源的位置^[10-12]。传统电子侦察设备主要通过干涉仪^[13-17]进行测角定位, 这种方法依赖于干涉仪的性能^[14,15], 天线的极化误差^[16]、基线长度都会影响干涉仪的性能, 并且当侦察场景中存在多个同频辐射源时^[17], 测角性能会下降, 测角定位的方位分辨能力也会随着距离的增加而下降。通过单个基站的运动, 可以实现多个位置测角联合定位^[18], 也可以通过平台运动过程中测量侦察信号的多普勒和多普勒的变化率完成辐射源的定位^[19-22], 这种定位方法以最简单的设备完成辐射源定位, 但考虑到对多普勒和其变化率的测量是基于多个时间段的数据单独测量, 没有利用长时间数据的相参积累, 这种方法可以称为非聚焦类的无源定位方法。受合成孔径雷达信号相参积累的启发, 本文提出一种基于长合成孔径的辐射源定位方法, 可以将其称为聚焦类的无源定位方法。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种全天候、全天时的高分辨成像雷达, 是一种新的观测手段, 因此在军事侦察中应用广泛^[23-33]。雷达载体沿方位向飞行过程中, 发射和接收信号形成合成阵列。为了获得高的距离分辨率, 合成孔径雷达发射的信号频带必须较宽; 为了提高方位分辨

率, 必须加大天线孔径, 对于固定的场景, 可以通过合成阵列的办法得到长的孔径^[24]。目前国内外的文章未有提及合成孔径辐射源侦察的相关概念, 本文将长合成孔径的概念引入无源定位中(下文中称为长合成孔径定位), 在侦察机飞行的过程中连续采集一段数据, 然后按照合成孔径雷达的工作方式来利用数据, 通过在快时间域进行傅里叶变换, 可以得到发射信号的频率, 然后在慢时间域分析采集到的数据的相位变化历程, 对于不同频率, 利用驻定相位原理^[34]直接在多普勒域构造匹配滤波器, 通过聚焦得到辐射源距离位置信息和辐射源方位位置信息。本文针对常见的单频连续波辐射源, 首先建立了合成孔径侦察的几何模型和描述了侦察机采集数据的利用方式, 给出了侦察机接收到的信号在快时间域和慢时间域的表达式, 详细介绍了合成孔径侦察算法, 最后通过实测数据的处理对该算法进行了验证。

2 几何模型与采集数据利用方式

长合成孔径无源定位时, 雷达不发射信号, 只接收外部辐射源发射的信号。图1为长合成孔径定位几何模型, 雷达位于侦察机的正侧方, 波束宽度为 θ_{BW} , 侦察机以速度 v 平行于地平面做匀速直线飞行, 侦察机从A到C飞行的过程中可以接收到辐射源 P_i 发射的信号, 在其他位置都不能接收到 P_i 发射过来的信号, B为AC中点。以A点为坐标原点, 侦察机飞行的方向为X轴(方位向), 垂直于侦察机飞行的方向为Y轴(距离向), 建立坐标系, 辐射源

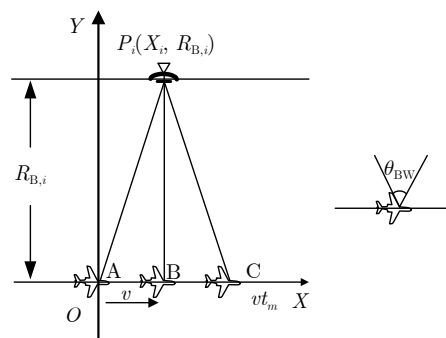


图 1 合成孔径定位几何模型

Fig. 1 Localization geometry model

P_i 的坐标为 $(X_i, R_{B,i})$, X_i 为辐射源 P_i 的方位坐标, $R_{B,i}$ 为辐射源 P_i 的距离坐标, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为波束范围内辐射源的总数。

图2为侦察机采集到数据的利用方式。对于侦察机采集到的单频连续信号, 每隔时间 T 取一段持续时间为 T_p 的数据。对于单频脉冲信号, T 和 T_p 分别为估计获得的脉冲重复周期和脉冲宽度; 对于单频连续信号, 如果侦察机的速度为100–200 m/s, 则 T 的大小可以取到毫秒级, T_p 可以取到微秒级。这与脉冲体制合成孔径雷达中发射的信号形式一样。用 $t_m = mT$ 表示接收到第 m 个脉冲的方位慢时间, $t_m = 0$ 时刻侦察机处于A点, 则 $(vt_m, 0)$ 表示 t_m 时刻侦察机所处的位置, $R_i(t_m)$ 表示在 t_m 时刻侦察机辐射源 $P_i(X_i, R_{B,i})$ 的距离, 即瞬时斜距。根据几何关系可得

$$R_i(t_m) = \sqrt{R_{B,i}^2 + (X_i - vt_m)^2} \quad (1)$$

通信基站发射的调频或调幅信号, 频谱范围为3–30 kHz, 带宽较窄, 当采样速率 f_s 较高时, 可以看成是单频信号。若辐射源 P_i 发射单频连续波信号 $s_i(t)$

$$s_i(t) = A_i \exp\{j(2\pi f_i t + \varphi_i)\} \quad (2)$$

其中 A_i 为信号的幅度, f_i 为载频, φ_i 为初始相位。用 t_r 表示距离快时间, t_m 表示方位慢时间, 则侦察机采样时刻可用 (t_r, t_m) 表示, 侦察机在 (t_r, t_m) 时刻接收到的辐射源 P_i 发射的信号可表示为

$$\begin{aligned} s_{r,i}(t_r, t_m) &= A_i \exp\left\{j\left(2\pi f_i \left(t_r + t_m - \frac{R_i(t_m)}{c}\right) + \varphi_i\right)\right\} \\ &= A_i \exp\{j(2\pi f_i t_r + \varphi_i)\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j\left(2\pi f_i \left(t_m - \frac{R_i(t_m)}{c}\right)\right)\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 c 为光速, 第2项相位中包含辐射源的方位坐标信息和方位调频率特性, 方位调频率和辐射源的距离有关, 因此这一项可以用来进行方位和距离定位。

3 长合成孔径定位算法

合成孔径侦察主要目的是获得辐射源发射信号的频率, 以及辐射源的位置, 从而用频率, 距离, 方位这3维信息来表示辐射源。

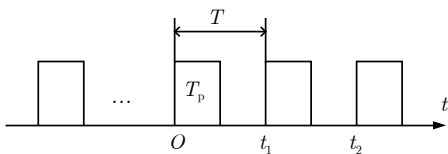


图2 采集数据的利用方式

Fig. 2 Data usage diagram

3.1 单频信号定位原理

从式(3)可以得到, 若辐射源发射信号为单频连续波, 侦察机接收到的信号在快时间域和慢时间域是2维可分离的。对接收到的信号 $s_{r,i}(t_r, t_m)$ 在快时间域 t_r 做傅里叶变换, 得到

$$\begin{aligned} s_{r,i}(t_r, t_m) &= A_i \exp\{j\varphi_i\} \delta(f - f_i) \\ &\quad \cdot \exp\left\{j2\pi f_i \left(t_m - \frac{R_i(t_m)}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 f 为距离频率, $\delta(f)$ 为冲激函数, 满足 $\delta(f) = 0, f \neq 0$ 且 $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(f)df = 1$ 。

由于采样频率的限制, 当侦察信号频带范围较大时, 用傅里叶变换估计频率时存在频率模糊的问题, 可以通过加一组带通滤波器来解决此问题, 对滤波后的信号做傅里叶变换, 可以得到发射信号的频率 f_i 。从式(4)可以得到, 在快时间域傅里叶变换后, 可以得到发射信号频率。对于频率 $f = f_i$ 的数据乘以 $\exp\{-j2\pi f_i t_m\}$ 后得到 $W_i(f_i, t_m)$

$$\begin{aligned} W_i(f_i, t_m) &= K_i \exp\left\{-j2\pi f_i \frac{\sqrt{R_{B,i}^2 + (X_i - vt_m)^2}}{c}\right\} \\ &\approx K'_i \exp\left\{-j\pi \frac{f_i}{cR_{B,i}} (X_i - vt_m)^2\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 K_i 只和 A_i, φ_i 有关且 $K'_i = K_i \exp\left\{-j2\pi \frac{f_i}{c} R_{B,i}\right\}$ 。在不同的距离 R_k 处, 构造匹配滤波器 $h(f_i, t_m; R_k)$, 进行距离位置定位

$$h(f_i, t_m; R_k) = \exp\{j\pi \gamma_m(f_i; R_k) t_m^2\} \quad (6)$$

其中 $\gamma_m(f_i; R_k) = \frac{f_i v^2}{cR_k}$ 为多普勒调频率。匹配滤波的过程可以在多普勒域完成, 利用驻定相位原理在多普勒域直接构造匹配滤波器 $H(f_i, f_a; R_k)$

$$H(f_i, f_a; R_k) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_a^2}{\gamma_m(f_i; R_k)}\right\} \quad (7)$$

其中 f_a 为多普勒频率。经过匹配滤波器的输出为

$$\begin{aligned} w_i(f_i, t_m; R_k) &= \text{IFFT}_{t_m}\{\text{FFT}_{t_m}\{W_i(f_i, t_m)\} \\ &\quad \cdot H(f_i, f_a; R_k)\} \\ &= \text{IFFT}_{t_m}\left\{K'_i H(f_i, f_a; R_k)\right\}^2 \\ &\quad \cdot \exp\{-j2\pi f_a X_i/v\} \\ &= K'_i \text{psf}(f_i, t_m; R_k) \otimes \delta(X_i/v) \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\text{psf}(f_i, t_m; R_k) = \text{IFFT}_{t_m}\{|H(f_i, f_a; R_k)|^2\} \quad (9)$$

$\text{psf}(\cdot)$ 称为点散布函数(Point Spread Function, PSF),

它可确定方位分辨率, \otimes 为卷积。经过匹配滤波处理后, 当 $R_k = R_{B,i}$ 时, 信号完全聚焦, 通过峰值检测可以得到与航线垂直距离为 $R_{B,i}$, 方位位置为 X_i , 发射频率为 f_i 的辐射源。在不同频率处根据不同距离构造匹配滤波器定位距离位置, 可以得到不同频点的辐射源的距离和方位位置, 达到侦察目的。

在慢时间域 t_m 采样点数一定的情况下, 不同的发射信号频率 f_i , 不同的垂直距离 $R_{B,i}$ 具有不同的点散布函数, 方位分辨率也不同。在慢时间域 t_m 采样点数相同条件下, 图3给出一组不同发射频率 f_i , 不同垂直距离 $R_{B,i}$ 时的点散布函数, 可以看到, 发射信号频率 f_i 大, 距离 $R_{B,i}$ 小, 方位分辨率好。实际上, 可以通过增加侦察机数据采集时间来提高方位分辨率, 理论上方位分辨率可以达到 vT , 其中 v 为侦察机飞行的速度, T 为方位慢时间间隔。

对于单频连续波辐射源, 合成孔径侦察算法流程可由图4表示, 其中 $h_i(t_r)$, $i = 1, 2, \dots, M$ 为带通滤波器。带通滤波并进行距离向FFT后, 可以获得信号的载频, 截取不同载频的信号, 可以获得频率为 f_i 的多个矩阵 $s_r(f_i, t_m)$ 。对每一个截取的信号矩阵 $s_r(f_i, t_m)$, 在定位距离 $R_{B,i}$ 的时候, 可以采用分步的方式, 初始的间隔可以设的较大, 确定辐射源的大致位置, 然后采用较小的间隔, 对辐射源进行精确定位。每一个距离处可以得到不同频率信号矩阵的匹配滤波结果, 将不同频率匹配滤波的结果进行

叠加作为此距离处的定位结果, 然后把不同距离处的定位结果按距离向重新排列, 即可得到辐射源的定位结果图。

3.2 宽波束侦察定位

在采用宽波束侦察时, 信号接受过程中, 雷达与辐射源的斜距历程可以写为

$$R_i(t) \approx R_{0,i} - v \cos \theta_i t + \frac{v^2 \sin^2 \theta_i}{2R_{0,i}} t^2 \quad (10)$$

其中, $t = t_r + t_m$ 为全时间, θ_i 为雷达速度矢量和雷达与辐射源 P_i 连线的距离矢量夹角, $R_{0,i}$ 为 $t = 0$ 时刻雷达到辐射源 P_i 的斜距, $R_{0,i} = R_{B,i} / \sin \theta_i$ 。当采样率为 kHz 级别时, 信号排列成 2 维的形式后, 为满足停走停的模型, 距离向点数只能取很小, 这会导致距离频率的分辨率降低, 当距离向取的点数较多时, 接收信号在距离向和方位向都存在调制。因此, 中频采样的信号模型修改为

$$s_{r,i}(t_r, t_m) = A_i \exp \left\{ j2\pi (f_i - \hat{f}_i) (t_r + t_m) \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{f_i}{c} \left(R_{0,i} - v \cos \theta_i (t_r + t_m) + \frac{v^2 \sin^2 \theta_i}{2R_{0,i}} (t_r + t_m)^2 \right) \right\} \quad (11)$$

其中 \hat{f}_i 为估计获得的信号频率。式(11)中, 慢时间 t_m 的一次项为多普勒频率项, 二次项为多普勒调频率项。

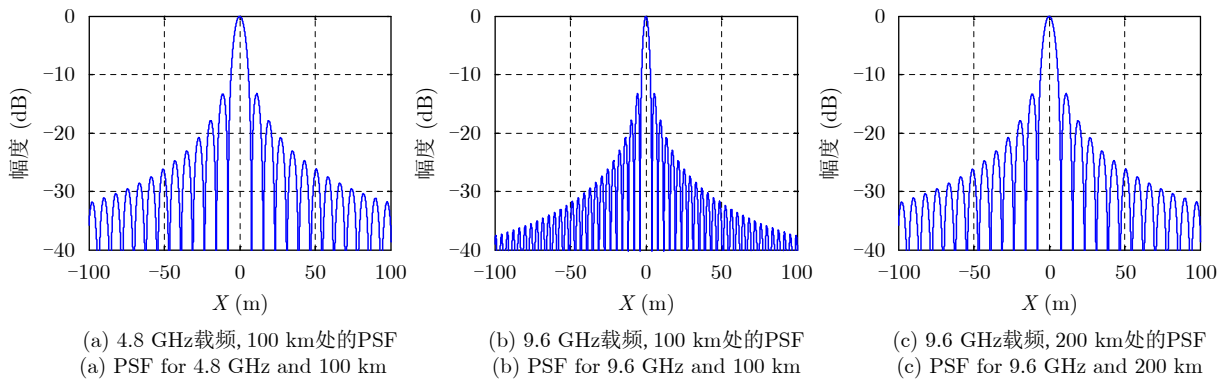


图 3 不同发射频率, 不同垂直距离对应的点散布函数
Fig. 3 PSF for different frequencies and different ranges

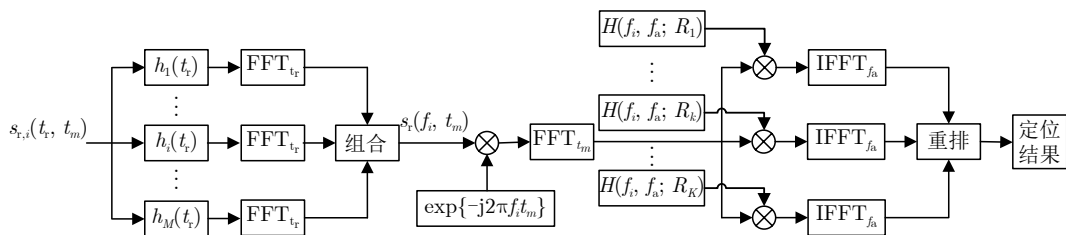


图 4 单频连续波辐射源合成孔径侦察算法流程
Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm for single frequency signal

首先分析一次项的影响： $\exp\{j2\pi f_i v \cos \theta_i (t_r + t_m)/c\}$ 和 $\exp\{j2\pi(f_i - \hat{f}_i)(t_r + t_m)\}$ 。在快时间域中， $\exp\{j2\pi f_i v \cos \theta_i t_r/c\}$ 会导致信号的频点随 θ_i 变化，在长时间录取信号的过程中， θ_i 是随慢时间 t_m 变化的，当 θ_i 的变化引起的距离频率的变化量超过一个距离频率分辨单元时，就会产生跨频率单元走动现象；在慢时间域中， $\exp\{j2\pi(f_i - \hat{f}_i)t_m\}$ 和 $\exp\left\{-j2\pi \frac{f_i}{c} \cdot v \cos \theta_i t_m\right\}$ 表现为多普勒，前一项为剩余载频引起的多普勒频率，后一项为信号所在方位角 θ_i 引起的多普勒频率。然后分析二次项的影响： $\exp\left\{-j2\pi \frac{f_i}{c} \frac{v^2 \sin^2 \theta_i}{2R_{0,i}} (t_r + t_m)^2\right\}$ 。将时间的平方项展开为 $\exp\{-j\pi \gamma_m(f_i; R_{0,i})(t_r^2 + 2t_r t_m + t_m^2)\}$ ， $\gamma_m(f_i; R_{0,i}) = \frac{f_i v^2 \sin^2 \theta_i}{c R_{0,i}}$ 为多普勒调频率。 $\exp\{-j\pi \gamma_m \cdot (f_i; R_{0,i}) t_r^2\}$ 为距离调制， $\exp\{-j\pi \gamma_m(f_i; R_{0,i}) t_m^2\}$ 为方位调制， $\exp\{-j2\pi \gamma_m(f_i; R_{0,i}) t_r t_m\}$ 为距离方位耦合。由于调频率 $\gamma_m(f_i; R_{0,i})$ 一般为几十到几百Hz/s，当距离时间在微秒级时，一个脉冲的时间内， $\gamma_m(f_i; R_{0,i}) t_r$ 的变化量远小于一个频率分辨单元，距离调制和距离方位耦合可以忽略。

在斜视模式下，辐射源的方位角 θ_i 也是需要估计的一个量，可以采用短合成孔径的信号估计方位角。当采样的脉冲数较少时，可以忽略距离变化的二次项

$$s'_{r,i}(t_r, t_m) = A_i \exp\left\{j2\pi \left(f_i - \hat{f}_i\right) (t_r + t_m)\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi \frac{f_i}{c} (R_{0,i} - v \cos \theta_i (t_r + t_m))\right\} \quad (12)$$

当载频的估计没有误差时 $\hat{f}_i = f_i$ ，此时，式(12)为

$$s'_{r,i}(t_r, t_m) = A'_i \exp\left\{j2\pi \frac{f_i}{c} v \cos \theta_i (t_r + t_m)\right\} \quad (13)$$

其中 $A'_i = A_i \exp\left\{-j2\pi f_i \frac{R_{0,i}}{c}\right\}$ 。式(13)即可反映信号的多普勒 $f_i v \cos \theta_i/c$ ，方位傅里叶变换后，可以获得多普勒频率的估计值 $\hat{f}_{d,i}$ ，进而获得信号的到达角

$$\hat{\theta}_i = \arccos\left(\frac{\hat{f}_{d,i} c}{f_i v}\right) \quad (14)$$

当载频的估计有误差时，剩余载频在 $\exp\{j2\pi(f_i - \hat{f}_i)t_m\}$ 会带来额外的多普勒频率 $\Delta f_i = f_i - \hat{f}_i$ ，从而估计得到的多普勒频率为

$$\hat{f}'_{d,i} = f_i v \cos \theta_i/c + \Delta f_i \quad (15)$$

此时通过式(14)进行角度估计的误差为

$$\Delta \hat{\theta}_i = \arccos\left(\frac{\hat{f}'_{d,i} c}{\hat{f}_i v}\right) - \theta_i \quad (16)$$

角度的估计误差会带来多普勒调频率的估计误差，因此载频估计的误差会影响距离定位的结果。

在获得信号的角度估计值 $\hat{\theta}_i$ 后，多普勒调频率 $\gamma_m = \frac{f_i v^2 \sin^2 \theta_i}{c R_{0,i}}$ 中，未知的参数为距离 $R_{0,i}$ 。对式(11)做2维傅里叶变换，在频率 \hat{f}_i 和不同的距离 R_k 处，构造一组匹配滤波器 $H'(\hat{f}_i, f_a; R_k)$ 进行距离位置定位

$$H'(\hat{f}_i, f_a; R_k) = \exp\left\{-j\pi \frac{f_a^2}{\gamma_m(\hat{f}_i; R_k)}\right\} \quad (17)$$

其中 $\gamma_m(\hat{f}_i; R_k) = \frac{\hat{f}_i v^2 \sin^2 \theta_i}{c R_k}$ 。

对于多个频点的单个辐射源，辐射源的位置是唯一确定的，调频率和信号的频点是唯一对应的，因此可以在能量最高的频点处进行辐射源的定位。

4 仿真结果

4.1 计算量

该算法的计算量来源于两次FFT、一次IFFT和距离定位的乘法。假设原始数据距离向点数为 m ，方位向点数为 n ， m 和 n 为2的整数次幂，搜索的场景宽度为 w ，粗定位的步长为 r_1 ，精定位的步长为 r_2 。距离向 m 点FFT需要进行 $\frac{m}{2} \log_2 m$ 次复乘和 $m \log_2 m$ 次复加；方位向 n 点FFT需要进行 $\frac{n}{2} \log_2 n$ 次复乘和 $n \log_2 n$ 次复加；进行距离定位时和匹配滤波器相乘的次数为 $w/r_1 + r_1/r_2$ ，每次匹配滤波相乘需要进行 n 次复乘，共需要进行 $(w/r_1 + r_1/r_2)n$ 次复乘；方位向 n 点IFFT需要进行 $\frac{n}{2} \log_2 n$ 次复乘和 $n \log_2 n$ 次复加。因此，共需要进行 $\frac{m}{2} \log_2 m + n \log_2 n + (w/r_1 + r_1/r_2)n$ 次复乘和 $m \log_2 m + 2n \log_2 n$ 次复加。

4.2 仿真结果

仿真数据的信号为单频信号，发射信号载频为2.6 GHz，采样率为300 MHz，卫星速度为7500 m/s，卫星的工作模式为正侧视，方位采样频率为4000 Hz，信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)为0 dB。场景中存在3个独立的辐射源，辐射源的位置分别为(0, 1200 km)，(1 km, 1192 km)和(3 km, 1202 km)，信噪比为3 dB。辐射源的定位结果如图5所示，3个辐射源的位置分别为(0, 1200 km)，(0.9994 km, 1192 km)和(3 km, 1202 km)。图6是通过1000次蒙特卡洛试验获得的不同信噪比下，(0, 1200 km)处的辐射源定位的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。

5 实测数据处理结果

实测数据的信号为QPSK编码信号，载频为2.1 GHz，采样率为500 KHz，信噪比为3-5 dB。在每个码元为单频信号，不同码元的初相不一致，变换到频域后，信号占据一定的带宽。对下变频后的信号直接进行傅里叶变换可以得到图7所示的频域信号。此时信号并没有完全积累，并且信号在方位向的相干关系被破坏，这给方位向的信号积累带来困难。因此，需要补偿码元间的相位调制，实现信号的全相干积累。可以通过前后两个采样点做相位差分，补偿整数倍 $\pi/2$ 相位的跳变，完成码元调制相位的补偿。补偿后的信号傅里叶变换后如图8所示，信号只占一个频点。

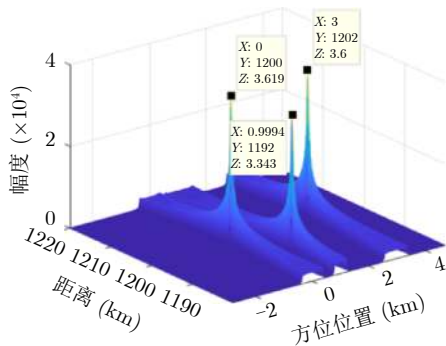


图5 多辐射源同时定位的结果

Fig. 5 Localization result of multiple sources

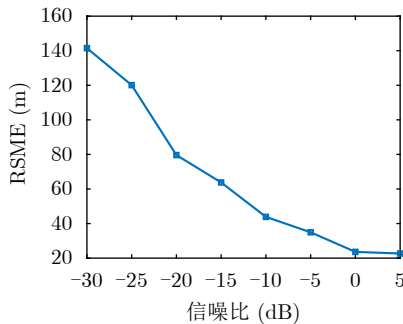


图6 不同信噪比下定位的均方根误差

Fig. 6 RMSE of different SNR

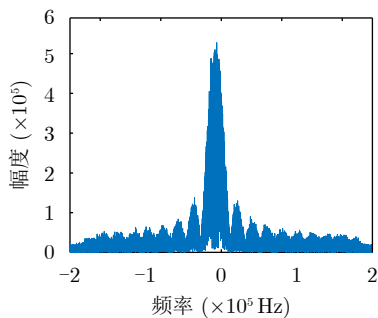


图7 QPSK信号频谱

Fig. 7 QPSK signal spectrum

将补偿后的信号排列成2维的形式，取距离向点数256点，方位向点数8192点，将重排后的信号进行方位向傅里叶变换可以得到信号的方位谱。在长合成孔径条件下，距离等式包含慢时间的二次项，这相当于信号在慢时间有调制，在方位向上相当于线性调频信号，方位傅里叶变换后信号的多普勒谱占一定的带宽，如图9所示。

在不同的距离构造匹配滤波器进行距离位置定位可以得到图10的结果，当匹配函数中的距离和辐射源的真实距离不相等时，方位脉压后信号会散焦，当匹配函数的距离和信号的真实距离匹配时会形成峰值。从图3的分析可以得到距离越近，方

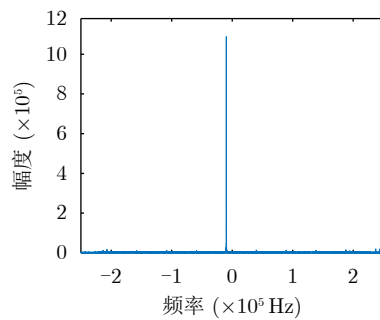


图8 相位补偿后QPSK信号的频谱

Fig. 8 Spectrum after phase compensation

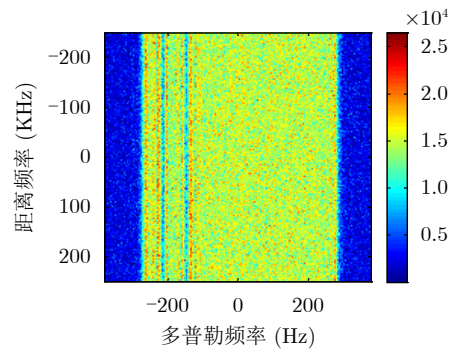


图9 2维重排信号的方位谱

Fig. 9 Azimuth spectrum of two-dimensional signal

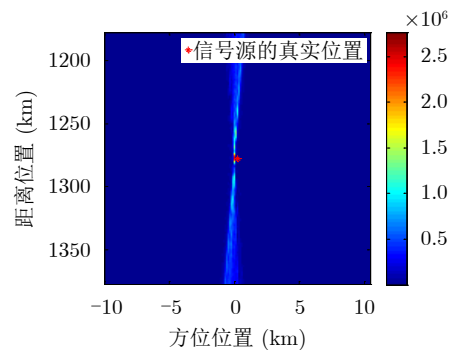


图10 距离位置定位的结果

Fig. 10 Range localization result

位分辨率越高，同时从多普勒调频率的表达式 $\gamma_m(f_i; R_{B,i}) = f_i v^2 / (c R_{B,i})$ 可以看出，距离越近，调频率对距离变化越敏感，即距离定位步长确定时， $R_{B,i}$ 越小，调频率 γ_m 的变化越明显。

图11是距离位置定位结果的局部放大图，红色位置为信号的真实位置，得到的辐射源的距离 $R_{B,i}$ 为1282.0312 km，方位坐标 X_i 为229.97 m，误差4.5058 km。

图12是辐射源在距离频域和方位时域的压缩结果，可以得到辐射源信号的频率和方位坐标，结合距离位置定位的结果，可以获得辐射源距离位置、方位位置和信号频率3维信息，完成辐射源的侦察定位。结合卫星GPS的位置信息，可以获得辐射源在经纬度坐标系下的位置为东经115.73°，北纬40.36°。

传统的单星定位通常使用多个天线进行干涉测角定位，使用四通道天线数据进行测角定位，通过地面划分网格搜索的结果如图13所示，定位误差为15.563 km。取不同时间段的数据进行测角定位和合成孔径定位，结果如表1所示。

定位的误差主要来源于实测数据中，GPS和数据录取设备使用不同的时钟，数据采样的位置和GPS给出的位置不能完全对应。对于测角定位的结果和该算法定位的结果，定位的精度可以提高3-4倍。

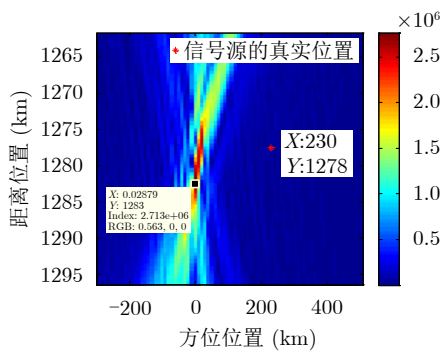


图 11 距离位置定位结果局部放大

Fig. 11 Enlarged view of range localization result

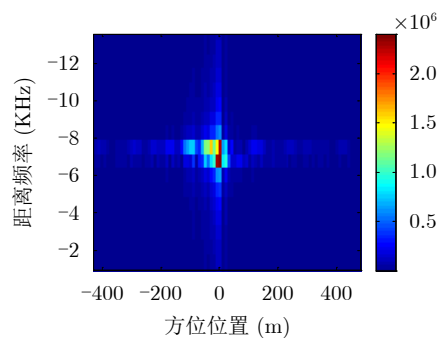


图 12 辐射源的频率和方位位置

Fig. 12 Frequency and azimuth location

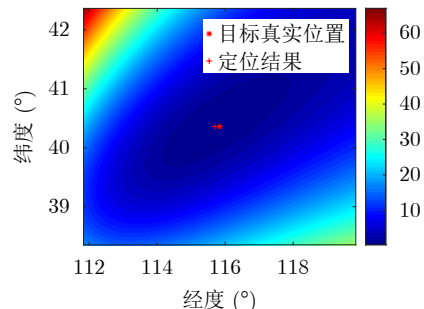


图 13 测角定位的结果

Fig. 13 Localization result of angle measurement

表 1 定位误差对比(km)

Tab. 1 Comparison of localization errors (km)

测角定位误差	合成孔径定位误差
27.477	6.214
23.450	8.262
14.009	3.163
34.906	7.276

6 结束语

获取雷达，通信基站等辐射源发射信号的频率范围及位置信息具有重要意义。本文将合成孔径的概念引入无源侦察中，仿照合成孔径雷达中天线的工作方式来利用侦察机采集到的数据，进行辐射源的距离位置和方位位置定位。实测数据的处理表明，对于单频连续波辐射源，长合成孔径定位算法能够以较高精度获得辐射源的方位位置、距离位置等信息，达到对辐射源侦察目的。相对于传统使用多天线干涉测角的定位方法，该方法只需要使用一个天线，降低了系统设计的复杂度。

参考文献

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
ZHAO Guoqing. Principle of Radar Countermeasure[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999.
- [2] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
YANG Xiaoniu, LOU Caiyi, and XU Jianliang. Software Radio Principles and Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [3] 胡来招. 雷达侦察接收机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
HU Laizhao. Design for Radar Reconnaissance Receivers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [4] 胡来招. 关于定点侦察的思考[J]. 通信对抗, 2009, (4): 3-5, 9.
HU Laizhao. Considerations on position-based

- reconnaissance[J]. *Communication Countermeasures*, 2009, (4): 3–5, 9.
- [5] ZHOU Longjian, ZHU Weiqiang, LUO Jingqing, *et al.* Direct positioning maximum likelihood estimator using TDOA and FDOA for coherent short-pulse radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(10): 1505–1511. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0437](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0437).
- [6] ZHANG Huichuan, SUN Zhengbo, PENG Huafeng, *et al.* A DTO and DFO estimation algorithm of broadband frequency-hopping pulse signal[C]. The 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology, Changchun, China, 2012: 188–192. doi: [10.1109/ICCSNT.2012.6525918](https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2012.6525918).
- [7] 张杰, 蒋建中, 郭军利. 基于约束加权最小二乘的多站无源定位[J]. *信号处理*, 2015, 31(1): 119–126. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2015.01.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2015.01.017).
- ZHANG Jie, JIANG Jianzhong, and GUO Junli. Multi-station passive localization based on CWLS algorithm[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(1): 119–126. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2015.01.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2015.01.017).
- [8] 秦兆涛, 王俊, 魏少明, 等. 基于目标高度先验信息的多站时差无源定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(9): 2219–2226. doi: [10.11999/JEIT171231](https://doi.org/10.11999/JEIT171231).
- QIN Zhaotao, WANG Jun, WEI Shaoming, *et al.* Passive localization using TDOA measurements from multiple sensors based on priori knowledge of target altitude[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(9): 2219–2226. doi: [10.11999/JEIT171231](https://doi.org/10.11999/JEIT171231).
- [9] 房嘉奇, 冯大政, 李进. 稳健收敛的时差频差定位技术[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(4): 798–803. doi: [10.11999/JEIT140560](https://doi.org/10.11999/JEIT140560).
- FANG Jiaqi, FENG Dazheng, and LI Jin. A robustly convergent algorithm for source localization using time difference of arrival and frequency difference of arrival[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 798–803. doi: [10.11999/JEIT140560](https://doi.org/10.11999/JEIT140560).
- [10] 陆安南, 杨小牛. 最小相位误差单星无源定位法[J]. *上海航天*, 2007, 24(3): 6–9. doi: [10.3969/j.issn.1006-1630.2007.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1630.2007.03.002).
- LU Annan and YANG Xiaoniu. Passive location with minimizing phase difference error by single satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2007, 24(3): 6–9. doi: [10.3969/j.issn.1006-1630.2007.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1630.2007.03.002).
- [11] 莫成坤, 陈树新, 吴昊, 等. 基于角度信息的递推最小二乘无源定位算法[J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22(9): 2863–2866. doi: [10.3969/j.issn.1671-4598.2014.09.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4598.2014.09.046).
- MO Chengkun, CHEN Shuxin, WU Hao, *et al.* Recursion least-squares passive location algorithm based on angle information[J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22(9): 2863–2866. doi: [10.3969/j.issn.1671-4598.2014.09.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4598.2014.09.046).
- [12] 游屈波, 吴耀云, 胡飞, 等. 基于机载单站双航段联合估计的纯方位定位跟踪算法[J]. *电子信息对抗技术*, 2019, 34(5): 28–31. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2019.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2019.05.007).
- YOU Qubo, WU Yaoyun, HU Fei, *et al.* Bearing-only target location and tracking algorithm based on joint estimation with two flight segments of single observer[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2019, 34(5): 28–31. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2019.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2019.05.007).
- [13] 李腾, 郭福成, 姜文利. 星载干涉仪无源定位新方法及其误差分析[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(3): 164–170. doi: [10.3969/j.issn.1001-2486.2012.03.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2012.03.032).
- LI Teng, GUO Fucheng, and JIANG Wenli. A novel method for satellite-borne passive localization using interferometer and its error analysis[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(3): 164–170. doi: [10.3969/j.issn.1001-2486.2012.03.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2486.2012.03.032).
- [14] 石荣, 阎剑, 张聪. 干涉仪相位差测量精度及其影响因素分析[J]. *航天电子对抗*, 2013, 29(2): 35–38. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2013.02.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2013.02.011).
- SHI Rong, YAN Jian, and ZHANG Cong. Analysis on precision and infection factors about phase difference measurement for interferometer[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(2): 35–38. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2013.02.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2013.02.011).
- [15] 王克让, 李娟慧, 朱晓丹, 等. 提高相位干涉仪测角精度新方法[J]. *航天电子对抗*, 2017, 33(4): 7–10. doi: [10.16328/j.htdz8511.2017.04.003](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2017.04.003).
- WANG Kerang, LI Juanhui, ZHU Xiaodan, *et al.* A novel improving angle accuracy method for phase interferometer[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2017, 33(4): 7–10. doi: [10.16328/j.htdz8511.2017.04.003](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2017.04.003).
- [16] 戴幻尧, 申绪润, 乔会东, 等. 基于极化误差的干涉仪测角性能建模与仿真[J]. *计算机仿真*, 2013, 30(10): 237–240. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2013.10.054](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2013.10.054).
- DAI Huanyao, SHEN Xujian, QIAO Huidong, *et al.* Interferometer angle measurement performance modeling and simulation based on polarization error[J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(10): 237–240. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2013.10.054](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2013.10.054).
- [17] 郑坤, 汪兵. 同时同频多源信号对干涉仪测角的影响分析[J]. *电子信息对抗技术*, 2018, 33(6): 1–5. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2018.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2018.06.001).
- ZHENG Kun and WANG Bing. Influences analysis on interferometer direction-finding of simultaneous multiple source signals under common-frequency[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2018, 33(6): 1–5. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2018.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2018.06.001).
- [18] 许志伟, 王运锋, 张小琴. 基于只测向的机载单站定位技术[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54(2): 293–297.

- XU Zhiwei, WANG Yunfeng, and ZHANG Xiaoqin. Airborne single-station passive location technology only based on bearing method[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2017, 54(2): 293–297.
- [19] 张敏, 冯道旺, 郭福成. 基于多普勒变化率的单星无源定位[J]. *航天电子对抗*, 2009, 25(5): 11–13, 64. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2009.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2009.05.004).
- ZHANG Min, FENG Daowang, and GUO Fucheng. Passive localization by a single satellite based on Doppler rate-of-change[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2009, 25(5): 11–13, 64. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2009.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2009.05.004).
- [20] 曹东波, 张敏, 姜文利. 单星多普勒变化率无源定位精度分析[J]. *航天电子对抗*, 2010, 26(4): 1–4, 64. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.001).
- CAO Dongbo, ZHANG Min, and JIANG Wenli. Accuracy analysis for passive localization of a single satellite based on Doppler rate-of-change[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2010, 26(4): 1–4, 64. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2010.04.001).
- [21] 谈欣荣, 高宪军, 李宝珠, 等. 一种基于多普勒频率变化率单站无源定位的改进跟踪滤波算法[J]. *电子设计工程*, 2014, 22(8): 77–80. doi: [10.3969/j.issn.1674-6236.2014.08.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6236.2014.08.024).
- TAN Xinrong, GAO Xianjun, LI Baozhu, *et al.* An improved tracking filter algorithm of single observer passive localization based on Doppler changing rate[J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, 22(8): 77–80. doi: [10.3969/j.issn.1674-6236.2014.08.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-6236.2014.08.024).
- [22] 李华, 郭福成. 等高程运动假设的单星角度融合多普勒变化率跟踪方法[J]. *空间电子技术*, 2018, 15(4): 41–48. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2018.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2018.04.009).
- LI Hua and GUO Fucheng. A fusion of angle and Doppler rate-of-changing based tracking method for constant altitude moving target by single satellite[J]. *Space Electronic Technology*, 2018, 15(4): 41–48. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2018.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2018.04.009).
- [23] WALTER W G. *Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare*[M]. New York: Artech House, 1993.
- [24] 保铮, 邢孟道, 王彤. *雷达成像技术*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- BAO Zheng, XING Mengdao, and WANG Tong. *Radar Imaging Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [25] CUMMING I G and WONG F H. *Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. Norwood, UK: Artech House, Inc., 2005.
- [26] SUN Guangcai, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* Beam steering SAR data processing by a generalized PFA[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(8): 4366–4377. doi: [10.1109/TGRS.2012.2237407](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2237407).
- [27] SUN Guangcai, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* A unified focusing algorithm for several modes of SAR based on FrFT[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(5): 3139–3155. doi: [10.1109/TGRS.2012.2212280](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2212280).
- [28] YANG Jun, SUN Guangcai, CHEN Jianlai, *et al.* A subaperture imaging scheme for wide azimuth beam airborne SAR based on modified RMA with motion compensation[C]. *Proceedings of 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec City, Canada, 2014: 608–611. doi: [10.1109/IGARSS.2014.6946496](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946496).
- [29] LIU Baochang, WANG Tong, and BAO Zheng. Slant-range velocity estimation based on Small-FM-Rate chirp[J]. *Signal Processing*, 2008, 88(10): 2472–2482. doi: [10.1016/j.sigpro.2008.04.013](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2008.04.013).
- [30] WU Yufeng, SUN Guangcai, XIA Xianggen, *et al.* An improved SAC algorithm based on the range-keystone transform for Doppler rate estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 741–745. doi: [10.1109/LGRS.2012.2220753](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2220753).
- [31] 孙光才, 周峰, 邢孟道, 等. 虚假场景SAR欺骗式干扰技术及实时性分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2009, 36(5): 813–818, 866.
- SUN Guangcai, ZHOU Feng, XING Mengdao, *et al.* Deception-jamming technology against the SAR based on the deceptive scene and real-time analyses[J]. *Journal of Xidian University: Natural Science*, 2009, 36(5): 813–818, 866.
- [32] 刘亚波, 刘霖, 童智勇, 等. S波段高分辨宽幅SAR辐射定标及误差分析方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(8): 1946–1951. doi: [10.11999/JEIT180983](https://doi.org/10.11999/JEIT180983).
- LIU Yabo, LIU Lin, TONG Zhiyong, *et al.* A radiometric calibration and error analysis method for HWRS SAR at S-band[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(8): 1946–1951. doi: [10.11999/JEIT180983](https://doi.org/10.11999/JEIT180983).
- [33] 洪文, 王彦平, 林赞, 等. 新体制SAR三维成像技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2018, 7(6): 633–654. doi: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109).
- HONG Wen, WANG Yanping, LIN Yun, *et al.* Research progress on three-dimensional SAR imaging techniques[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 633–654. doi: [10.12000/JR18109](https://doi.org/10.12000/JR18109).
- [34] BORN M and WOLF E. *Principles of Optics*[M]. New York: Pergamon Press, 1959.

作者简介



王裕旗(1994-), 男, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像和合成孔径无源定位。

E-mail: xdwangyuqi@163.com



邢孟道(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达成像技术、稀疏信号处理、激光合成孔径成像、微波光子合成孔径成像等。

E-mail: xmd@xidian.edu.cn



孙光才(1984-), 男, 湖北孝感人, 博士, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达成像、动目标检测和合成孔径无源定位。

E-mail: gcsun@xidian.edu.cn



杨小牛(1961-), 男, 中国工程院院士, 主要研究方向为通信信号处理与分析, 软件无线电等。



杨 军(1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为星载合成孔径雷达。

E-mail: yangjun_kx@163.com



保 铮(1927-), 男, 中国科学院院士, 主要研究方向为数字信号处理、时空2维信号处理、雷达成像等。