

## 自相关加权融合的高精度频率估计算法

刘康, 何明浩\*, 陈昌孝, 曾莎, 李争  
(空军预警学院 信息对抗系, 湖北 武汉 430019)

**摘要:** 为保证雷达对抗侦察系统在复杂电磁环境下的工作性能, 提出了一种基于自相关加权融合的多段信号频率估计算法。对各段含噪信号进行自相关处理得到初相位为零、频率与原信号一致的高信噪比正弦信号, 利用反余切算子构建支持度矩阵对自相关信号进行实时加权融合, 在粗估计基础上建立参考信号, 通过最小化误差函数求得高精度频率估计结果。仿真结果表明, 相较于现有算法, 本文算法在满足较低计算量的同时, 不但精度明显提高, 且在不同信噪比、信号长度以及信号异常等条件下均具备稳定的估计性能, 为基于多传感器的雷达对抗情报侦察提供了参考。

**关键词:** 多段信号融合; 频率估计; 自相关; 实时加权; 误差函数

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2024)04-222-07

## High precision frequency estimation algorithm for autocorrelation weighted fusion

LIU Kang, HE Minghao\*, CHEN Changxiao, ZENG Sha, LI Zheng

(Department of Information Warfare, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** In order to ensure the performance of radar countermeasure reconnaissance system in complex electromagnetic environment, a multi-segment signal frequency estimation algorithm based on autocorrelation weighted fusion was proposed. Autocorrelation processing was performed on each segment of the noisy signal to obtain a high SNR sinusoidal signal with zero initial phase and the same frequency as the original signal. The arcsine operator was used to construct a support matrix to perform real-time weighted fusion of the autocorrelated signals. The reference signal was established on the basis of the rough estimation, and the high-precision frequency estimation result was obtained by minimizing the error function. The simulation results show that, compared to existing algorithms, the algorithm not only improves the accuracy significantly, but also has stable estimation performance under the conditions of different SNRs, signal lengths and signal anomalies, while satisfying the low computational cost, which provides a reference for radar countermeasures intelligence reconnaissance based on multi-sensors.

**Keywords:** multi-segment signal fusion; frequency estimation; autocorrelation; real-time weighting; error function

雷达对抗侦察作为信息对抗领域不可或缺的重要环节, 在掌握战场主动中发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。然而, 随着电磁环境日益复杂, 新体制雷达逐渐占据主导, 基于单传感器的情报侦察不再具有广泛的适应能力, 而多传感器数据融合作为将不同传感器的截获信息进行综合分析的一种处理手段, 具有比单传感器更精准、更稳定的工作性能<sup>[3-5]</sup>。因此, 本文研究基于多传感器融合的雷达辐射源识别算法, 在提升侦察系统抗干扰能力的同时, 能获取更高精度的雷达参数信息。而基

于多段信号融合的频率估计作为多传感器信号级融合<sup>[6]</sup>的重要应用, 不但信息损失量小, 而且能够有效滤除干扰, 获取更准确、更可靠的测频结果, 因此受到广泛关注。

近年来, 众多学者在基于多段信号融合的频率估计方面取得了一定进展, 一方面是从频谱融合角度展开研究, 其特点是在低信噪比条件下具有稳定的估计性能, 其中谱平均法<sup>[7]</sup>作为一种常见的频谱融合方法, 通过对各段频谱取均值进行频率估计, 能够有效提高低信噪比下的测频稳定

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 国家部委基金资助项目 (KJ20191A050339)

第一作者: 刘康 (1994—), 男, 山东高唐人, 博士研究生, E-mail: 416379262@qq.com

\*通信作者: 何明浩 (1963—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: 18504229299@163.com

引用格式: 刘康, 何明浩, 陈昌孝, 等. 自相关加权融合的高精度频率估计算法[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(4): 222-228.

Citation: LIU K, HE M H, CHEN C X, et al. High precision frequency estimation algorithm for autocorrelation weighted fusion[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 222-228.

性,但融合频谱主瓣较宽,估计精度有待提高;在此基础上,文献[8-12]提出了基于相位补偿的多段信号频谱融合算法,通过设定相位差补偿因子得到主瓣较窄、能量较为集中的信号频谱,但对于非整周期采样信号的频率估计精度有所欠缺;文献[13]则对信号进行傅里叶变换后利用稀疏表示进行雷达辐射源频率估计,该方法虽然有效降低了通信数据量,但估计精度难以保证。另一方面,基于时域的多段信号融合在高信噪比条件下具有较高的估计精度:孟建早期提出了一种利用相参脉冲间相位联系进行频率估计的方法<sup>[14]</sup>,首先构建各段信号相位随时间变化的方程组,再利用最小二乘法对方程进行求解,该方法有效提高了估计精度,但过程相对复杂且运算量较大,而后该作者又提出了一种旋转相位关联法<sup>[15]</sup>,对各段信号作 Hilbert 变换后乘以旋转因子得到首尾相接的连续信号进行频率估计,该方法能够显著提高频率分辨率,但需要精确的信号初始相位等先验知识为支撑;文献[16]则在时域内对多段信号进行相干平均以提高信噪比,再利用快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)进行频率估计,但需要保证各段信号具有相同的初始相位,在实践中难以实现;文献[17]提出一种自相关频率估计算法,对各段信号进行自相关处理取均值后,利用修正协方差(modified covariance, MC)算法获取频率信息,该方法虽然能够有效滤除环境噪声,但基于 MC 算法的频率估计精度有待提升,且在低信噪比下的估计性能下降严重。本文则提出一种自相关加权融合频率估计算法,通过对各段自相关信号进行实时加权获取高信噪比正弦信号,再构建误差函数进行高精度频率估计。

## 1 多段信号模型

来自同一辐射源的多段正弦采样信号通常具有相同的频率及幅值,初相位则随采样时刻的不同有所区分,因此,在多传感器对同源信号进行有效侦收判别的基础上<sup>[18]</sup>,有多段信号模型

$$x(m, n) = s(m, n) + z(m, n) \quad (1)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; \quad n = 1, 2, \dots, N$$

式中: $s(m, n) = A \cos[2\pi f_0 n / f_s + \theta(m)]$ ,  $f_0$ 、 $A$ 、 $f_s$ 和  $\theta(m)$  分别为信号频率、幅值、采样频率和第  $m$  段信号的初相位; $N$  为信号长度(这里假设各段信号长度均为  $N$ ); $M$  为信号段数; $z(m, n)$  为第  $m$  段均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声,各段噪声互不相关。

## 2 算法原理

对于各传感器接收的多段含噪信号,首先对各采样信号分别进行自相关处理,推导可知所得信号接近初相位为零、频率与原信号相同的正弦信号,接着,为进一步提高信噪比,利用反余切算子计算每一时刻各自相关信号间的相互支持度,得到加权因子进行实时加权融合。最后,为提取频率信息,先利用自相关等式进行频率粗估计,在此基础上,设定参考信号建立均方误差函数,通过最小化误差函数求解得到高精度频率估计结果,算法流程如图 1 所示。

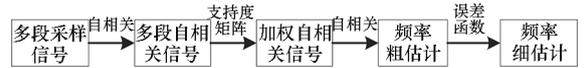


图 1 算法流程框图

Fig. 1 Algorithm flowchart

### 2.1 自相关信号实时加权融合

根据信号和噪声不相关这一特性,对采样信号进行自相关处理以达到去噪效果,可得式(2)所示的自相关函数。

$$\begin{aligned} r(m, \tau) &= \frac{1}{N - \tau} \sum_{n=1}^{N-\tau} x(m, n)x(m, n + \tau) \\ &= \frac{1}{N - \tau} \sum_{n=1}^{N-\tau} [s(m, n) + z(m, n)] \cdot \\ &\quad [s(m, n + \tau) + z(m, n + \tau)] \\ &= r_s(m, \tau) + r_{zs}(m, \tau) + r_{sz}(m, \tau) + r_z(m, \tau) \\ &= r_s(m, \tau) + r_z(m, \tau) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\tau = 0, 1, \dots, N - 1$ ;  $r_s(m, \tau)$  和  $r_z(m, \tau)$  分别为信号及噪声的自相关函数; $r_{zs}(m, \tau)$  和  $r_{sz}(m, \tau)$  则为两者的互相关函数。当  $\tau \neq 0$  时,有  $r_z(m, \tau) = 0$ , 因此

$$\begin{aligned} r(m, \tau) &= r_s(m, \tau) \\ &= \frac{1}{N - \tau} \sum_{n=1}^{N-\tau} A \cos[\omega_0 n + \theta(m)] \cdot \\ &\quad A \cos[\omega_0(n + \tau) + \theta(m)] \\ &= \frac{A^2}{2(N - \tau)} \sum_{n=1}^{N-\tau} \{ \cos[\omega_0(2n + \tau) + \\ &\quad 2\theta(m)] + \cos(\omega_0 \tau) \} \\ &= \frac{A^2}{2} \cos(\omega_0 \tau) + \frac{A^2}{2(N - \tau)} \cdot \\ &\quad \sum_{n=1}^{N-\tau} \cos[\omega_0(2n + \tau) + 2\theta(m)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\tau = 1, 2, \dots, N - 1$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0 / f_s$ 。当  $N - \tau \gg 1$  时,  $r(m, \tau)$  的误差项可以忽略不计,文献[19]证明了当  $\tau \leq N/2$  时,  $A^2 \cos(\omega_0 \tau) / 2$  为  $r(m, \tau)$  的最

优估计, 即有

$$r(m, \tau) \approx \frac{A^2}{2} \cos(\omega_0 \tau) \quad (4)$$

由式(4)可知, 自相关信号  $r(m, \tau)$  接近幅值为  $A^2/2$ 、初相位为零、频率与原信号相同的正弦信号。在此基础上, 为降低噪声及异常信号等影响, 进一步提高信噪比, 本文对多段自相关信号进行了实时加权融合, 利用反余切算子求解两两自相关函数的实时支持程度, 算子表达式<sup>[20]</sup>为

$$h_{m'm}(\tau) = 2 \arccot[|r(m, \tau) - r(m', \tau)|] / \pi \quad (5)$$

式中,  $m' = 1, 2, \dots, M$ 。从中可以看出, 两自相关信号越接近, 所得  $h_{m'm}(\tau)$  越大, 表示两信号的相互支持程度越大, 反之, 两信号差距越大, 两者的相互支持度则越小, 进而可得支持度矩阵

$$H(\tau) = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau) & h_{12}(\tau) & \cdots & h_{1M}(\tau) \\ h_{21}(\tau) & h_{22}(\tau) & \cdots & h_{2M}(\tau) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{M1}(\tau) & h_{M2}(\tau) & \cdots & h_{MM}(\tau) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, 第  $m$  列之和  $s(m, \tau)$  表示在  $\tau$  时刻第  $m$  段自相关信号总支持度。

$$s(m, \tau) = \sum_{m'=1}^M h_{m'm}(\tau) \quad (7)$$

则第  $m$  段自相关信号的权值  $w(m, \tau)$  定义为

$$w(m, \tau) = \frac{s(m, \tau)}{\sum_{m=1}^M s(m, \tau)} \quad (8)$$

利用权值  $w(m, \tau)$  可对多段自相关信号进行加权融合。

$$R(\tau) = \sum_{m=1}^M w(m, \tau) r(m, \tau) \quad (9)$$

虽然新信号  $R(\tau)$  的有效长度与单段信号长度  $N$  相比有所减短, 但是  $R(\tau)$  包含各段信号所有采样点的信息, 且通过对采样信号的自相关处理和实时加权融合, 能够使信噪比大幅提高, 为接下来的频率估计奠定基础。

## 2.2 高精度频率估计

### 2.2.1 频率粗估计

为提取加权自相关信号的频率信息, 首先对  $R(\tau)$  频率进行粗估计。根据式(2)、式(4)对  $R(\tau)$  进行自相关处理可得

$$\begin{cases} \frac{2}{N-2} \sum_{\tau=1}^{N/2-1} R(\tau)R(\tau+1) \approx \frac{A^2}{2} \cos(\omega_0) \\ \frac{2}{N-4} \sum_{\tau=1}^{N/2-2} R(\tau)R(\tau+2) \approx \frac{A^2}{2} \cos(2\omega_0) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } R_1 = \frac{2}{N-2} \sum_{\tau=1}^{N/2-1} R(\tau)R(\tau+1), R_2 = \frac{2}{N-4} \cdot \sum_{\tau=1}^{N/2-2} R(\tau)R(\tau+2), \text{对式(10)交叉相乘有}$$

$$2R_1 \cos^2(\omega_1) - R_2 \cos(\omega_1) - R_1 = 0 \quad (11)$$

进而可得频率粗估计值

$$\omega_1 = \arccos\left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + 8R_1^2}}{4R_1}\right) \quad (12)$$

### 2.2.2 频率细估计

接着, 根据  $R(\tau)$  初相位为零的特点生成参考信号  $y(\tau)$ 。

$$y(\tau) = \cos(\tau\hat{\omega}) \quad \tau = 1, 2, \dots, N/2 \quad (13)$$

将参考信号  $y(\tau)$  在粗估计值  $\omega_1$  处进行泰勒展开, 并忽略高次项, 得

$$y(\tau) = \cos(\tau\omega_1) - \tau \sin(\tau\omega_1)(\hat{\omega} - \omega_1) \quad (14)$$

根据最小二乘法, 利用  $R(\tau)$  和  $y(\tau)$  构造误差函数  $J(\hat{\omega})$ 。

$$J(\hat{\omega}) = \sum_{\tau=1}^{N/2} [bR(\tau) - \cos(\tau\omega_1) + \tau \sin(\tau\omega_1)(\hat{\omega} - \omega_1)]^2 \quad (15)$$

基于最小均方误差准则, 可通过最小化误差函数  $J(\hat{\omega})$  得到频率估计值。对  $J(\hat{\omega})$  求导, 并令导数  $dJ(\hat{\omega})/db = 0, dJ(\hat{\omega})/d\hat{\omega} = 0$  得

$$\hat{\omega} = \omega_1 + \frac{b_2 a_{11} - b_1 a_{21}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}} \quad (16)$$

式中:

$$a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{\tau=1}^{N/2} R^2(\tau) & \sum_{\tau=1}^{N/2} \tau \sin(\tau\omega_1) R(\tau) \\ \sum_{\tau=1}^{N/2} \tau \sin(\tau\omega_1) R(\tau) & \sum_{\tau=1}^{N/2} [\tau \sin(\tau\omega_1)]^2 \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{\tau=1}^{N/2} \cos(\tau\omega_1) R(\tau) \\ \sum_{\tau=1}^{N/2} \tau \cos(\tau\omega_1) \sin(\tau\omega_1) \end{pmatrix}$$

## 3 仿真实验及复杂度分析

为充分说明所提算法的估计性能, 本文对所提算法、频谱平均 (spectrum averaging, SA) 算法<sup>[7]</sup>、光谱模糊 (spectrum fusion, SF) 算法<sup>[8]</sup>、旋转相位关联 (rotational phase correlation, RPC) 算法<sup>[15]</sup>、改进的修正协方差 (improved modified covariance, IMC) 算法<sup>[17]</sup>、改进的扩展自相关 (improved expanded autocorrelation, IEA) 算法<sup>[21]</sup> 在不同信噪比、不同信号长度、不同信号频率以及信号异常条件下的频率估计进行了仿真实验。设

定初始参数:采样频率为100 MHz,各段信号长度均为100,信号段数为4,初相位 $\theta(m)$ 则在 $[0, 2\pi]$ 区间随机分布,每组仿真进行500次蒙特卡罗实验,为避免信号频率对算法估计精度的影响,每次待测频率 $f_k$ 在 $[0, f_s/2]$ 区间随机生成(满足非整周期采样),均方根误差由 $RMSE =$

$$\sqrt{\frac{1}{500} \sum_{k=1}^{500} (\hat{f}_k - f_k)^2}$$

取得,其中 $\hat{f}_k$ 为估计频率。

### 3.1 不同信噪比下的对比实验

在信噪比为 $-5 \sim 10$  dB下进行仿真对比实验,结果如图2所示。可以看出,随着信噪比的提高,基于傅里叶变换的SF算法由于受到频率分辨率的限制估计精度未得到改善,采用频谱平均融合方式的SA算法则由于频谱主瓣较宽,稳定性不及SF算法,RPC算法利用Hilbert变换拼接多段采样信号可获得更高的频率分辨率,因此估计精度高于SF、SA算法。IEA及IMC算法在高信噪比条件下能够取得较高的估计精度,但小于0 dB时估计精度下降较快,难以满足高精度频率估计,与二者的时域平均方式不同,本文算法通过对自相关信号的实时加权融合使所得信号更加接近理想正弦信号,且利用最小化误差函数在粗值基础上进行高精度频率估计,虽然对参考信号的一阶泰勒展开过程会引入一定误差,但估计精度相对于粗估计结果有了显著提升,同时保证了算法的实时性,由仿真结果可以看出,所提算法不但在低信噪比下具备优良的估计性能,且随着信噪比的提高精度不断增加,相比其他算法更接近频率估计误差的克拉美罗下界<sup>[22-23]</sup>(Cramer-Rao lower bound, CRLB)。

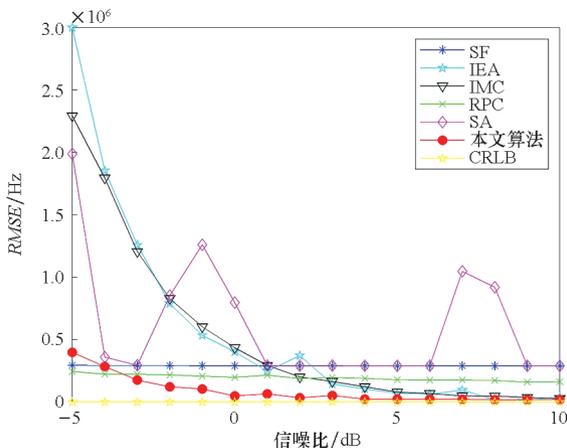


图2 不同信噪比下的频率估计结果  
Fig. 2 Frequency estimation results under different SNRs

### 3.2 不同信号长度下的对比实验

设定信号长度 $N$ 为50~200,在信噪比5 dB下进行仿真实验,结果如图3所示。可以看出,随着信号长度的增加,各算法的估计精度均呈现提高的趋势。基于频谱融合的SF及SA算法随着频率分辨率的改善估计精度提升明显,RPC算法由于采用信号拼接的融合方式受信号长度影响的增益同样显著。相对其他算法,本文算法凭借自相关处理以及加权融合虽然损失了信号的有效长度,却大幅提高了信噪比,并通过最小化误差函数取得了更高的估计精度。可以看出,本文算法在信号长度较短时均方根误差始终小于0.1 MHz,保持了优良的估计性能,能够满足资源短缺条件下的多段信号频率估计。

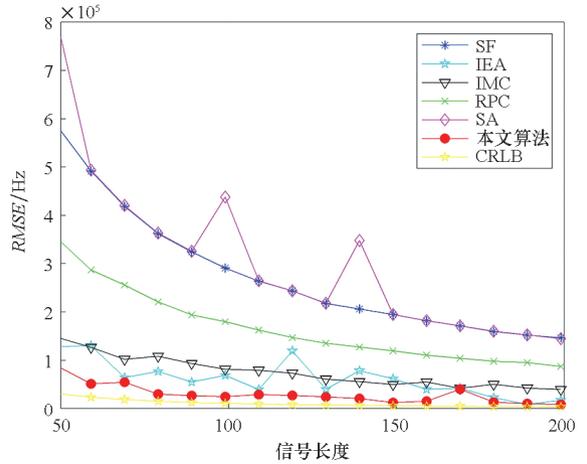


图3 不同信号长度下的频率估计结果  
Fig. 3 Frequency estimation results under different signal lengths

### 3.3 不同信号频率下的对比实验

根据奈奎斯特采样定理,设置信号频率为5~40 MHz,同样在信噪比5 dB下进行仿真实验,为贴近实际满足非整周期采样,设置步长 $\Delta f = 3.17$  MHz,结果如图4所示。可以看出,SA以及SF算法受FFT测频范围及分辨率 $\Delta f'$ 的影响,估计精度呈明显的周期性变化,周期为 $[\Delta f, \Delta f']$ (最小公倍数),IMC算法在低频及高频上的估计精度有所降低,RPC算法则在中频处的表现相对较好,而IEA及本文算法从数据上看虽然在测频精度上同样有所起伏,但整体受频率的影响不大,能够满足对各频率的高精度估计。

### 3.4 信号异常条件下的对比实验

在多传感器协同侦察系统中,当某一传感器受到干扰或信号环境较差,其截获信号将偏离真实信号,此时若采用传统的融合算法估计精度将

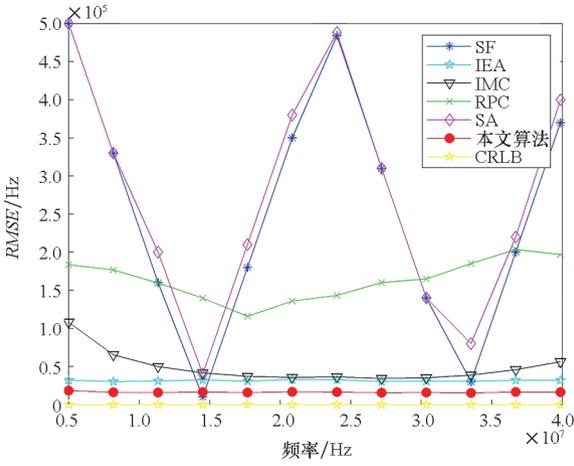
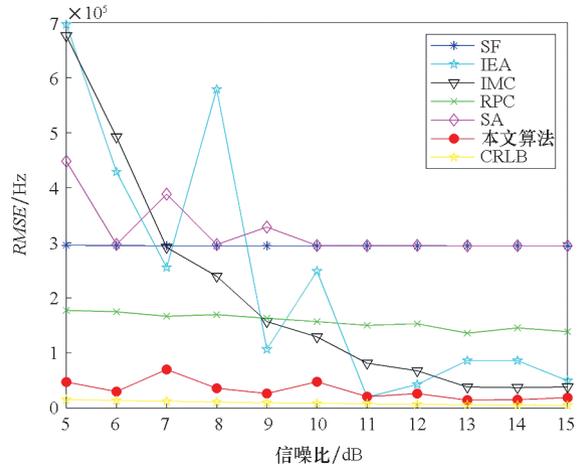


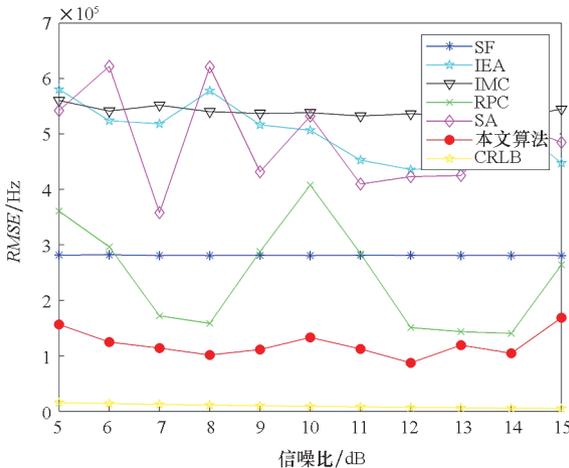
图 4 不同信号频率下的频率估计结果  
Fig. 4 Frequency estimation results under different signal frequencies



(b) 信噪比异常  
(b) Abnormal SNR

大大降低,本文提出的自相关加权融合算法则有效克服了这一问题。在四段采样信号中,设其中一段正弦信号频率小于其他信号 5 MHz,同时,为降低噪声对估计精度带来的影响,在信噪比 5 ~ 15 dB 下进行仿真实验,结果如图 5 (a) 所示,与图 2 比较可以看出,在优良信号环境下,受到异常频点的影响,IEA 及 IMC 算法的融合精度大大降低 ( $RMSE$  平均提高 0.443 MHz 和 0.522 MHz),本文算法 ( $RMSE$  平均提高 0.132 MHz) 通过计算各信号与其他信号的偏离程度设定权重因子,有效降低了异常信号在融合算法中的比重,进而使误差维持在 0.1 MHz 左右,保证了存在干扰频点时的估计精度。

此外,信噪比的大小同样影响着融合性能,设异常信号与其他三段信号的信噪比相差 -10 dB,进行仿真实验,结果如图 5 (b) 所示,可以看出,在信噪比为 5 ~ 10 dB 时 SA、IEA 及 IMC 算法受到



(a) 频率异常  
(a) Abnormal frequency

图 5 信号异常下的频率估计结果

Fig. 5 Frequency estimation results under signal anomalies

干扰信号的影响较大,10 dB 后逐渐趋向平稳,RPC、SF 以及本文算法 ( $RMSE$  平均仅提高 0.005 MHz) 的融合性能在各信噪比下相对稳定,能够给出高精度的融合估计结果,再次说明了本文提出的自相关加权融合算法对复杂环境的适应能力。

### 3.5 计算复杂度分析

六种算法的计算复杂度如表 1 所示(忽略常数项),可以看出,各算法计算复杂度均处于平方阶  $O(N^2)$  量级,其中 SF、RPC 以及 SA 算法估计过程由于包含离散傅里叶变换,需要进行较多复数乘法运算,导致  $N^2$  系数较大,相对其他时域算法通常需要更多计算量。IEA 算法定义了基于线性预测的自相关函数,仅对少量信号进行时延叠加,虽然计算量相对较少,但估计精度与 IMC 算法相当。本文算法计算量接近 IMC 算法,虽然

表 1 计算复杂度对比

Tab. 1 Computational complexity comparison

算法	乘(除)法	加(减)法
SF	$5MN^2$	$(7M-2)N^2 - 2MN$
IEA	$0.04MN^2 + 4.6N$	$0.07MN^2 + (4.14 - 0.46M)N + M$
IMC	$\frac{3}{8}MN^2 + (\frac{M}{4} + 1)N$	$\frac{3}{8}MN^2 + (2 - \frac{M}{4})N$
RPC	$2M^2N^2 + (4M-4)N$	$2M^2N^2 - 2N$
SA	$2MN^2$	$MN^2 - N$
本文算法	$\frac{3}{8}MN^2 + (\frac{3}{4}M + \frac{13}{2})N$	$\frac{3}{8}MN^2 + (M^2 - \frac{M}{4} + 3)N$

加权过程增加了较多加减运算,但耗时涨幅较小,且估计精度有了较大提升,能够满足多段采样信号的实时高精度频率估计。

## 4 结论

针对目前雷达对抗侦察在复杂电磁环境下面临的诸多挑战,本文提出了一种自相关加权融合算法,利用多个自相关信号的实时加权,并在粗值基础上通过最小化误差函数进行频率估计,仿真实验表明,所提算法不但精度提升明显,且在各信噪比条件下均能满足高精度的频率估计,同时,在不同信噪比、不同信号长度以及信号异常等情况下均具备稳定的融合性能,能够满足复杂电磁环境下的多段信号高精度频率估计,为基于多传感器融合的雷达对抗侦察等领域提供了理论依据。另外,在当前存在多种信号调制样式的环境下,虽然本文对于单载频信号的频率估计在实际应用中存在一定局限性,却为其他调制样式的多段信号融合估计提供了一定思路,相关问题也将作为下一步工作重点进行深入研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 滕小虎. 雷达电子对抗技术及其运用研究[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(5): 102-103.  
TENG X H. Research on radar electronic countermeasure technology and its application [J]. Digital Technology & Application, 2019, 37(5): 102-103. (in Chinese)
- [2] 王诗鑫. 雷达信号协同分布侦察理论研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
WANG S X. Research on radar signal cooperative distributed reconnaissance theory[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [3] MI X J, LV T X, TIAN Y, et al. Multi-sensor data fusion based on soft likelihood functions and OWA aggregation and its application in target recognition system [J]. ISA Transactions, 2021, 112: 137-149.
- [4] WANG J Y, YU Q Z. A dynamic multi-sensor data fusion approach based on evidence theory and WOWA operator[J]. Applied Intelligence, 2020, 50: 3837-3851.
- [5] 田威, 黄高明. 非理想关联下多传感器系统误差的稳健估计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 641-647.  
TIAN W, HUANG G M. Robust multisensor bias estimation under nonideal association [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(3): 641-647. (in Chinese)
- [6] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 3-15.  
HE Y, WANG G H, GUAN X, et al. Information fusion theory with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 3-15. (in Chinese)

- [7] GALAR D, PARIDA A, SCHUNESSON H. Overall factory average spectrum: global vibration index for diagnosis and prognosis of large sets of rotating machinery[J]. Diganostics and Structural Health Monitoring, 2011, 2(58): 39-47.
- [8] 涂亚庆, 刘良兵. 频率估计的一种多段分频等长信号融合算法[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1852-1856.  
TU Y Q, LIU L B. A fusion algorithm for frequency estimation of multi-section signals with the same length and known frequency-ratio [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1852-1856. (in Chinese)
- [9] 刘良兵, 涂亚庆. 多段降频等长信号的频率估计快速迭代算法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(9): 1044-1049.  
LIU L B, TU Y Q. A fast iterative algorithm of frequency estimation for multi-section signals with the same length and known frequency-difference [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(9): 1044-1049. (in Chinese)
- [10] 肖玮, 涂亚庆, 刘良兵, 等. 多段同频正弦信号频谱融合的LFMCW雷达测距算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 94-103.  
XIAO W, TU Y Q, LIU L B, et al. LFMCW radar range algorithm based on spectra fusion of multi-section co-frequency sinusoids [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 94-103. (in Chinese)
- [11] SU D, TU Y Q, LUO J Y, et al. A frequency estimation algorithm based on cross information fusion[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(1): 015004.
- [12] 沈艳林, 涂亚庆, 刘良兵, 等. 基于相位积累的多段异频信号的频率估计算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 64-68.  
SHEN Y L, TU Y Q, LIU L B, et al. Frequency estimation of multi-section different-frequency signal based on phase accumulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(1): 64-68. (in Chinese)
- [13] 马捷, 黄高明, 吉嘉, 等. 基于稀疏表示的雷达辐射源信号级融合识别算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1798-1802.  
MA J, HUANG G M, JI J, et al. Signal-level fusion algorithm for radar emitter identification based on sparse representation [J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1798-1802. (in Chinese)
- [14] 孟建. 多相信号频谱的精确估计[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(10): 67-70.  
MENG J. Spectrum estimating of correlative signal [J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(10): 67-70. (in Chinese)
- [15] 孟建. 分段采样信号的相位关联技术[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1784-1786, 1797.  
MENG J. Phase association method of multisection sampled data [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(12): 1784-1786, 1797. (in Chinese)
- [16] 陈志菲, 孙进才, 牛奕龙. 基于相干平均的正弦信号频率估计[J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(3): 387-390.  
CHEN Z F, SUN J C, NIU Y L. A better method of frequency estimation for sinusoidal signals using coherent average [J]. Journal of Northwestern Polytechnical

- University, 2009, 27(3): 387–390. (in Chinese)
- [17] 陈林军, 沈艳林, 陈宝欣, 等. 基于多段自相关信号及 MC 法的频率估计算法[J]. 仪表技术与传感器, 2016(5): 92–94.  
CHEN L J, SHEN Y L, CHEN B X, et al. Frequency estimation algorithm based on multi-segment autocorrelation signal and MC method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(5): 92–94. (in Chinese)
- [18] 陈昌孝, 何明浩, 郭利荣, 等. 基于附带调相特征的雷达辐射源判别[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(4): 396–400.  
CHEN C X, HE M H, GUO L R, et al. Radar emitter discriminant based on attached phase modulation characteristic[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(4): 396–400. (in Chinese)
- [19] 杨德钊, 宋凝芳, 林志立, 等. 基于自相关及相位差法的高精度频率估计算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 1030–1033, 1043.  
YANG D Z, SONG N F, LIN Z L, et al. High-accuracy frequency estimation algorithm based on autocorrelation and phase difference method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(8): 1030–1033, 1043. (in Chinese)
- [20] 杨佳, 宫峰勋. 改进的动态加权多传感器数据融合算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(11): 97–99.  
YANG J, GONG F X. Improved dynamic weighted multi-sensors data fusion algorithm [J]. Computer Engineering, 2011, 37(11): 97–99. (in Chinese)
- [21] 陈鹏, 向仕刚, 李明, 等. 基于线性预测自相关的多段信号频率估计方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 58–60, 64.  
CHEN P, XIANG S G, LI M, et al. Frequency estimation method of multi-segment signals based on linear prediction autocorrelation [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(2): 58–60, 64. (in Chinese)
- [22] 孙婷婷. 低信噪比条件下短时信号频率与幅度的检测[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.  
SUN T T. Detection of short-term signal frequency and amplitude under low SNR conditions [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019. (in Chinese)
- [23] 温兵会, 毛卫宁. 一种快速有效的正弦波信号频率估计方法[J]. 应用声学, 2020, 39(4): 512–517.  
WEN B H, MAO W N. A fast and effective sinusoidal signal frequency estimation [J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(4): 512–517. (in Chinese)