

## 基于最大似然法的天波超视距雷达相位解污染算法

胡进峰\* 薛长飘 李会勇 谢菊兰  
(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

**摘要:** 电离层相位污染是天波超视距雷达信号处理的关键技术之一。由于模型的不准确性和电离层的复杂性,已有算法在污染较大时大多精度不高。该文提出一种基于最大似然法的相位解污染算法。该算法将信号建模为相位多项式,通过最大化似然函数来实现污染相位的估计。为了避免最大似然法中的矩阵求逆运算,该文进一步将最大似然问题转化为最小二乘问题,利用遗传算法求解相位系数。仿真结果表明,与传统算法比较,该文算法具有以下优点:相比 HRR 算法和 CED 算法,该文算法精度更高,校正后的信号频谱更加尖锐;在相位污染较大的情况下,该文算法仍具有较高的精度,有利于目标信息的提取;该文算法采用高阶多项式,避免分段处理和矩阵求逆,简化了运算。

**关键词:** 天波超视距雷达; 电离层; 相位污染; 最大似然法

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3197-08

DOI: 10.11999/JEIT160041

## Ionospheric Decontamination Algorithm Based on Maximum-likelihood Method in Over-the-horizon Radar

HU Jinfeng XUE Changpiao LI Huiyong XIE Julan  
(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Ionospheric phase decontamination is a key technology in signal processing of sky-wave Over-The-Horizon Radar (OTHR). Due to the inaccuracy of the models and the complexity of the ionosphere, the accuracy of the existing algorithms is not satisfactory when the phase changes too fast. A new ionospheric phase decontamination algorithm is proposed based on the Maximum-Likelihood (ML) method. In this algorithm, the signal is modeled as a phase polynomial, and estimation of the perturbation phase is achieved by maximizing the likelihood function. To avoid matrix inversion in the ML method, the ML issue is further transformed to a least-squares issue. The coefficients of phase are solved by the genetic algorithm. The simulation results show that, compared with the traditional methods, the proposed algorithm has the following advantages: compared with the HRR algorithm and the CED algorithm, the algorithm proposed in this paper has higher accuracy, and the signal spectrum after decontamination is more sharp. Under the situation of serious phase contamination, the proposed algorithm still has higher precision, accordingly, the proposed algorithm is more advantageous to extract the target information. This algorithm adopts higher-order polynomials, which avoids segmented processing and computing the inverse of matrix, thus the computation process is simplified.

**Key words:** Over-The-Horizon Radar (OTHR); Ionospheric; Phase contamination; Maximum-Likelihood (ML) method

### 1 引言

天波超视距雷达(Over-The-Horizon Radar, OTHR)利用高频电磁波,经过电离层反射自上而下地进行传播,其目标探测距离最远可达 3500 km,具有重要的战术和战略意义<sup>[1-3]</sup>。电离层不稳定的

相位扰动会造成雷达回波多普勒频谱展宽,强大的海杂波展宽之后容易掩盖附近的谱峰,这对舰船等低速目标的检测非常不利。因此,解电离层相位污染是提高天波超视距雷达目标检测性能的一个关键因素<sup>[4,5]</sup>,学者们已对此做了大量研究。但由于在实际情况下,电离层造成的相位污染非常复杂,信号模型存在较多的近似条件,现有算法的研究大多停留在理论阶段,在污染较大时精度不够的问题亟待解决。

国内外已有的电离层解相位污染算法主要可以

收稿日期: 2016-01-13; 改回日期: 2016-10-28; 网络出版: 2016-11-16

\*通信作者: 胡进峰 huji@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61101172, 61301262, 61371184)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61101172, 61301262, 61371184)

分为3类。第1类算法采用多项式信号(PPS)拟合相位,如多项式相位建模法<sup>[6-10]</sup>。此类方法通过相位多项式拟合一段信号求解相位系数。该方法需要分段处理和预先设定多项式的阶数,在先验信息不足时估计性能不好。第2类算法将非线性污染看作是线性的,如最大熵谱估计法(MESA)<sup>[11]</sup>。这种方法需要相位扰动在短时间内近似线性的条件,采用最大熵谱估计法求解每段信号频率,然后通过内插估计污染函数。由于电离层的非线性,该方法精度不高。第3类算法利用瞬时频率的定义及其与相位的关系估计污染频率,如伪维格纳分布法<sup>[12]</sup>、相位梯度法<sup>[13,14]</sup>、HRR法<sup>[15]</sup>和CED法<sup>[16]</sup>。伪维格纳分布法(PWVD)通过Wigner-Ville分布估计每个采样点的瞬时频率,在有交叉项时非常敏感。相位梯度法(PGA)求取相邻采样点之间的相位梯度,累加得到相位污染函数,在噪声干扰比较严重时,扩展的Bragg峰在循环频移至零频时误差较大,且存在较大的累积误差。HRR(Hankel Rank Reduction)法利用回波时域数据构造Hankel矩阵并进行SVD分解,该算法需要设定回波的先验信息,在条件不足时解污染效果不好。CED(Complex Energy Detection)法基于HRR法提出复数能量检测法,利用一阶与二阶微分算子估计瞬时频率,在污染较大的情况下有待改进。

结合目前电离层解污染的研究现状,本文进一步研究了其中相位多项式阶数的选择和分段处理等关键问题,提出了一种基于改进的最大似然函数的解污染算法。该算法将Bragg峰建模为相位多项式,通过最大化信号的似然函数<sup>[17]</sup>来实现污染相位的估计。针对传统最大似然估计中的矩阵求逆运算,本文将似然函数的最大化问题转变为一个“超定”的非线性最小二乘估计最优化问题;在此基础上,利用遗传算法<sup>[18,19]</sup>参数估计精度高的特点求解该最优化问题,从而得到一种基于改进的最大似然函数的相位解污染方法。

与现有算法比较,本文算法的优势主要在于采用相位多项式拟合电离层污染,在相位快变时牺牲阶数以获得高精度,避免了把信号分段拟合为低阶甚至是线性造成的误差。与分段多次运算相比,本文所提的高阶多项式计算量更低。在最优化参量的过程中,本文高精度的遗传算法和最大似然准则保证了解污染的效果。其优点具体体现如下:(1)在污染程度严重的情况下,本文算法的绝对误差较小,且受污染参数的影响不大;(2)相比HRR算法和CED算法,本文算法解相位污染效果更好,校正后的回波信号频谱更加尖锐,杂波能量更低,更有

效分离慢速目标与Bragg峰;(3)本文算法选取高阶相位多项式拟合,减少了分段低阶处理的运算量,文中给出阶数的最优取法以保证误差较小;(4)本文算法将似然函数的最大化问题转变为一个“超定”非线性最小二乘估计的最优化问题,简化了高维参数矩阵的求逆运算;(5)本文算法的理论分析和仿真结果给工程实现提供了参考依据。

## 2 相位解污染问题分析

天波超视距雷达的接收信号经过匹配滤波后的离散形式可表示为

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{c}(k) + \mathbf{s}(k) + \mathbf{v}(k), \quad 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

其中, $\mathbf{c}(k)$ 是海杂波信号, $\mathbf{s}(k)$ 是目标信号, $\mathbf{v}(k)$ 是接收噪声, $k$ 是慢时间系数, $K$ 是相干积累时间(CIT)内的脉冲数目。

由于海浪与高频电磁波的谐振,回波信号频谱上会产生成对的Bragg峰,其频率大小为

$$f_b = \pm \sqrt{gf_0/(\pi c)} \quad (2)$$

其中, $g$ 为重力加速度, $f_0$ 为雷达工作频率, $\pi$ 为圆周率, $c$ 为光速, $\pm$ 分别表示正负Bragg峰。

回波信号受电离层相位污染后,叠加了非线性相位项,其多普勒频谱展宽。由于信号频谱的各个部分均经过了同样的电离层信道,受到相同的电离层污染,因此可以提取能量较强的一个Bragg峰的污染函数,对整个回波进行相位补偿。

首先通过自适应带通滤波器从回波中滤出一个能量占优的Bragg峰,滤出的单个Bragg峰表达为

$$z(k) = be^{j2\pi f_b kT + \eta} \cdot e^{j\varphi(k)} + \mathbf{v}(k), \quad 1 \leq k \leq K \quad (3)$$

其中, $b$ , $f_b$ 和 $\eta$ 分别是Bragg峰的幅度,多普勒频率和初始相位; $\mathbf{v}(k)$ 是噪声, $e^{j\varphi(k)}$ 是电离层相位污染项; $k$ 是慢时间系数, $T$ 是脉冲重复周期(PRI), $K$ 是相干积累时间内的脉冲数目。

电离层造成的相位扰动一般建模为乘性干扰,本文的相位污染 $e^{j\varphi(k)}$ 采用文献[15]中的余弦污染函数,该函数较好地模拟了真实环境中的相位污染,如式(4):

$$e^{j\varphi(k)} = e^{jN \cos(2\pi f_m kT + \theta)} \quad (4)$$

其中, $N$ , $f_m$ , $\theta$ 分别为相位污染的幅度,调制频率和初始相位。

通过式(3)和式(4)可以得出理论瞬时频率 $f_t(k)$ 的表示为

$$f_t(k) = f_b - Nf_m \sin(2\pi f_m kT + \theta) \quad (5)$$

相位解污染的关键是估计污染瞬时频率 $f_t(k)$ ,从而得到调制函数 $f_t(k)$ ,表示为

$$f_t(k) = f(k) - f_b \quad (6)$$

其中,  $f(k)$  是估计的 Bragg 峰瞬时频率。

对式(6)进行积分, 得到电离层相位校正(污染)函数  $\gamma(k)$ :

$$\gamma(k) = 2\pi \sum_{l=1}^k f_l(l) \cdot lT \quad (7)$$

用校正函数对回波信号进行校正, 得到解相位污染后的信号为

$$\mathbf{r}'(k) = \mathbf{r}(k)e^{-j\gamma(k)}, \quad 1 \leq k \leq K \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{r}'(k)$  是相位解污染后的信号。

目前国内外的电离层解污染算法最终都求解出式(7)的校正函数, 由式(8)进行相位补偿。校正函数的估计精度越高, 算法解污染的效果就越好, 提升雷达的目标检测性能就越明显。因此, 校正函数的估计精度可以直观地体现出算法的性能。

### 3 所提基于最大似然法的解污染算法

首先将式(3)整理为

$$\mathbf{z}(k) = be^{j\phi(k)} + \mathbf{v}(k), \quad 1 \leq k \leq K \quad (9)$$

$$\phi(k) = \sum_{q=1}^Q c_q (kT)^{q-1} \quad (10)$$

其中,  $b$  是 Bragg 峰幅度,  $\phi(k)$  是 Bragg 峰的相位,  $Q$  是多项式阶数,  $c_q$  是各阶相位系数,  $\mathbf{v}(k)$  是独立同分布的高斯白噪声, 满足  $\mathbf{v}(k) \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $k$  是慢时间系数,  $T$  是脉冲重复周期,  $K$  是相干积累时间内的脉冲数目。

污染频率的估计即转化为多项式相位系数的估计, 本文首先采用最大似然准则来求解各个参量的最优化, 构造信号  $\mathbf{z}(k)$  的似然函数为

$$\begin{aligned} p(\mathbf{z}(1), \mathbf{z}(2), \dots, \mathbf{z}(K) | \mathbf{C}_Q, b, \sigma^2) \\ = \prod_{k=1}^K \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{z}(k) - be^{j\phi(k)})^H \cdot (\mathbf{z}(k) - be^{j\phi(k)})\right\} \\ = \prod_{k=1}^K \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma^2} \|\mathbf{z}(k) - be^{j\phi(k)}\|^2\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\sigma^2$  是噪声方差,  $\mathbf{C}_Q = [c_1, c_2, \dots, c_Q]^T$  是各阶相位系数的向量表示。

为简化计算, 将式(11)两边分别取负自然对数, 可得

$$\begin{aligned} L(\mathbf{C}_Q, b, \sigma^2) &= -\ln\{p(\mathbf{z}(1), \mathbf{z}(2), \dots, \mathbf{z}(K) | \mathbf{C}_Q, b, \sigma^2)\} \\ &= K \ln(\pi\sigma^2) + \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{z}(k) - be^{j\phi(k)}\|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

参量的求解问题即转化为最小化似然函数  $L(\mathbf{C}_Q, b, \sigma^2)$ 。在实际情况下,  $[\mathbf{C}_Q, b, \sigma^2]$  都是未知的。因此需逐个固定变量以求得参量的最大似然估计。首先固定  $\mathbf{C}_Q$  和  $b$ , 以  $\sigma^2$  为变量, 最小化式(12), 可得  $\sigma^2$  的最大似然估计为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{z}(k) - be^{j\phi(k)}\|^2 \quad (13)$$

注意到  $\sum_{k=1}^K (be^{j\phi(k)})^H be^{j\phi(k)} = Kb^2$ , 将式(13)代入式(12)可得

$$\begin{aligned} L(\mathbf{C}_Q, b) &= K \ln \left\{ \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{z}(k) - be^{j\phi(k)}\|^2 \right\} + K \\ &= K \ln \left\{ \sum_{k=1}^K \mathbf{z}^H(k) \mathbf{z}(k) - \sum_{k=1}^K be^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{k=1}^K be^{j\phi(k)} \mathbf{z}^H(k) + Kb^2 \right\} + K \ln \left( \frac{\pi}{K} \right) + K \end{aligned} \quad (14)$$

忽略不影响优化的常数项, 得到

$$\begin{aligned} L(\mathbf{C}_Q, b) &= K \ln \left\{ \sum_{k=1}^K \mathbf{z}^H(k) \mathbf{z}(k) - \sum_{k=1}^K be^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{k=1}^K be^{j\phi(k)} \mathbf{z}^H(k) + Kb^2 \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

由于天波超视距雷达相干积累时间内的脉冲数目  $K$  远远大于待估参量的个数, 且 Bragg 峰信号中指数项  $e^{j\phi(k)}$  非线性, 使得最小化式(15)的似然函数  $L(\mathbf{C}_Q, b)$  可以看成是一个“超定”非线性最小二乘估计的最优化问题, 从而可以避免传统最大似然法的矩阵求逆问题, 极大地简化了运算。

固定  $\mathbf{C}_Q$  并以  $b$  为变量最小化式(15), 可得  $b$  的最大似然估计为

$$\hat{b} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得到

$$\begin{aligned} L(\mathbf{C}_Q) &= K \ln \left\{ \sum_{k=1}^K \mathbf{z}^H(k) \mathbf{z}(k) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{K} \left( \sum_{k=1}^K e^{j\phi(k)} \mathbf{z}^H(k) \right) \left( \sum_{k=1}^K e^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \right) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

最小化式(17)则得到相位系数  $\mathbf{C}_Q$  的最大似然估计:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{C}}_Q &= \arg \min_{\mathbf{C}_Q} \{L(\mathbf{C}_Q)\} \\ &\triangleq \arg \min_{\mathbf{C}_Q} \left\{ \sum_{k=1}^K \mathbf{z}^H(k) \mathbf{z}(k) - \frac{1}{K} \left( \sum_{k=1}^K e^{j\phi(k)} \mathbf{z}^H(k) \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \left( \sum_{k=1}^K e^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \right) \right\} \\ &\triangleq \arg \max_{\mathbf{C}_Q} \left\{ \left( \sum_{k=1}^K e^{j\phi(k)} \mathbf{z}^H(k) \right) \left( \sum_{k=1}^K e^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \right) \right\} \\ &= \arg \max_{\mathbf{C}_Q} \left\{ \left\| \sum_{k=1}^K e^{-j\phi(k)} \mathbf{z}(k) \right\|^2 \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)是基于非线性最小二乘形式的最大似然

估计, 该问题可通过非线性优化算法来求解。目前已有的非线性优化算法主要包括: 遗传算法 (Genetic Algorithm)、最大期望算法 (Expectation Maximization Algorithm)、模拟退火算法 (Simulated Annealing Algorithm) 和神经网络算法 (Neural Networks Algorithm) 等<sup>[20]</sup>。考虑到遗传算法较高的参数估计精度, 因此本文采用遗传算法来求解式(18)。通过设置合适的待估参量初始值和搜索边界可以增加参数估计的精确度并降低计算的复杂度<sup>[21]</sup>。

根据估计得到的相位系数  $\hat{C}_Q = [\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_Q]^T$ , 可计算 Bragg 峰的瞬时频率为

$$f(k) = \sum_{q=2}^Q \hat{c}_q (q-1) (kT)^{q-2} \quad (19)$$

将式(19)代入式(6)~式(8)可求解电离层相位调制函数  $f_r(k)$ , 积分得到污染函数  $\gamma(k)$ , 取共轭即可对回波信号进行解污染处理。

#### 4 仿真结果及分析

本节仿真结果表明: (1)在污染频率和幅度固定时, 本文算法的精度高于 HRR 算法<sup>[15]</sup>和 CED 算法<sup>[16]</sup>, 解污染效果更好; (2)在污染频率和幅度改变时, 绝对误差都比前两个算法小, 且受污染参数增量的影响更小, 解污染性能更好; (3)随着阶数  $Q$  的增加, 本文算法的误差逐渐变得很小并趋于稳定; (4)本文算法可以有效结合实际 OTHR 回波, 对添加的相位污染进行校正。

本文仿真采用文献中广泛使用的电离层相位污染函数, 其形式如式(4)所示, 该相位污染对应的理论真实瞬时频率如式(5)所示。其中  $Nf_m$  代表理论频率的幅度,  $f_m$  代表相位变化的快慢。仿真中, 雷达工作频率、脉冲重复周期、采样点数选择为常用的天波超视距雷达参数; Bragg 峰频率、幅度是模拟常见海态下的海杂波; 目标多普勒频率、幅度是模拟一航速合为 35 km/h 的运输舰船; 信噪比用于仿真生成噪声。以上参数值的选择均符合实际情况, 表 1 是仿真所用参数。

表 1 仿真参数

雷达工作频率 $f_c$	10 MHz
脉冲重复周期 $T$	0.1 s
采样点数 $K$	512
信噪比 SNR	20 dB
Bragg 峰频率 $f_b$	$\pm 0.32$ Hz
Bragg 峰幅度 $b$	2
目标多普勒频率 $f_d$	0.65 Hz
目标幅度 $a$	0.3

#### 4.1 解污染效果对比分析

下面仿真结果表明, 与 HRR 算法<sup>[15]</sup>和 CED 算法<sup>[16]</sup>相比, 本文在典型的相位污染频率和幅度下, 具有更高的估计精度, 污染校正效果更显著。

图 1 是未添加相位污染的回波信号频谱。从图中可以清晰地看到位于  $\pm 0.32$  Hz 左右的两个 Bragg 峰, 以及位于 0.65 Hz 左右的低速目标。由于未受电离层相位污染, 回波频谱没有扩展, Bragg 峰与低速目标的频谱是分开的, 可以检测出目标。

图 2 是添加污染频率  $f_m$  为 0.05 Hz, 幅度  $N$  为 2, 初始相位  $\theta$  为  $-\pi/4$  的相位污染后的接收信号频谱。从图中可以看出, 频谱中的所有谱峰均被展宽。高能量的海杂波展宽后, 掩盖了正 Bragg 峰旁边的低速目标, 导致其无法被检测。图 2 较好地模拟了实际天波雷达的回波信号, 以下 3 个算法解污染的仿真都是基于图 2 的回波数据。

图 3 是 HRR 算法解相位污染之后的信号频谱。在一定程度上抑制了 Bragg 峰频谱扩展, 但解污染后的目标位置的幅度太低, 未能与 Bragg 峰明显分离, 不能被有效检测; 从图中可以看出, 在  $-0.65$  Hz 的位置还出现了虚假目标。

图 4 是 CED 算法解相位污染之后的信号频谱。Bragg 峰和目标得到一定的锐化, 但旁边仍存在较

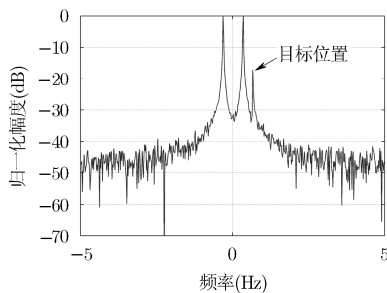


图 1 相位污染前的频谱

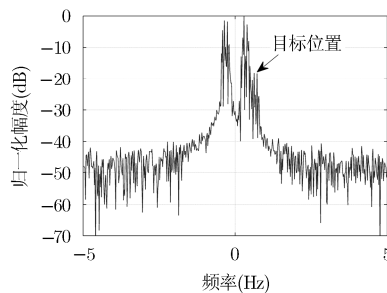


图 2 相位污染后的频谱

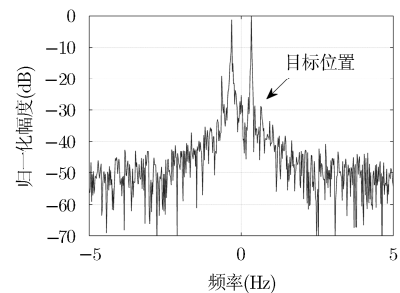


图 3 HRR 算法解污染后的频谱

多毛刺。从图中可以看出，在幅度最高的正负 Bragg 峰旁出现了若干幅度与目标位置相当的小尖峰，极大地影响了低速目标的检测。

图 5 是本文算法解相位污染之后的信号频谱。解污染后的谱峰变的非常尖锐和清晰，旁边没有多余的杂波，正 Bragg 峰和添加的目标能够清楚的分开，几乎还原了添加相位污染以前的信号频谱。对比 HRR 算法与 CED 算法，本文算法的相位解污染效果更加明显。

为了更直观地对比以上 3 种算法的精度，下面分别给出其污染函数曲线和绝对误差曲线。由于估计的相位存在较多的毛刺，而平滑不影响统计误差，以下污染曲线均采用平滑后的结果。图中去掉了 Bragg 峰本身的相位，只比较余弦污染导致的相位扰动。

图 6 是 HRR 算法估计的污染相位函数，图 7 是 CED 算法估计的污染相位函数，图 8 是本文算法估计的污染相位函数。从图中可以看出，HRR 算法与 CED 算法的估计曲线均有一定程度的偏差，而本文算法的估计曲线几乎与真实的相位污染曲线重合。

图 9 是 3 种算法的绝对误差对比曲线。计算可以得到其统计绝对误差按照图例的顺序分别为 0.0578, 0.3915, 0.5034; 统计相对误差分别为 0.0454, 0.3075, 0.3954。

根据本小节的仿真结果可以得出结论：在典型的污染频率和幅度下，本文算法的误差比 HRR 算法与 CED 算法更小，解污染效果更明显。

#### 4.2 解污染性能对比分析

图 10 是 3 种算法的绝对误差与污染频率  $f_m$  的关系，图 11 是 3 种算法的绝对误差与污染幅度  $N$  的关系。本小节仿真均保持理论频率的幅度和信噪比不变，使绝对误差曲线可以等价为相对误差的变化趋势。从图中可知，随着污染频率和幅度的增加，HRR 算法<sup>[15]</sup>和 CED 算法<sup>[16]</sup>的误差有明显地增加，本文算法的误差增加十分缓慢。其原因是 HRR 法

利用回波时域数据构造 Hankel 矩阵，进行 SVD 分解，需要提前设定矩阵维数，先验信息与污染参数不能准确对应；CED 算法采用复数能量检测法，将信号建模为调幅-调频的形式，利用一阶与二阶微分算子估计瞬时频率，且采用了平滑处理，受污染程度影响较大。本文算法受污染参数的影响不大是由于高阶多项式精确地拟合了相位复杂的变化，高精度的遗传算法和经典的极大似然准则保证了估计的性能。在  $f_m = 0$  Hz 时，即没有相位污染的情况，此时估计误差是由噪声造成的。20 dB 的信噪比符合天波雷达的实际性能，因此噪声带来的影响相对于污染调制频率带来的影响是很小的。在  $f_m = 0.05$  Hz,  $N = 2$  时的解污染效果已在 4.1 节给出，对比可以证明当污染参数变大时，HRR 算法和 CED 算法性能降低，而本文算法在电离层污染较严重时误差依然较小，解污染性能更好。

#### 4.3 阶数对本文算法性能的影响

本文将海杂波 Bragg 峰信号建模为典型的相位多项式模型，在仿真中相位阶数  $Q$  的选择是影响估计精度的一个重要因素。在采用多项式相位信号的一类最新文献[6-10]中，广泛使用低阶相位函数分段拟合 Bragg 峰。本文利用高阶相位函数拟合，虽增加了多项式次数，但避免了分段多次处理，在不降低精度的前提下极大地简化了运算。

图 12 给出了污染参数和信噪比取固定值时绝对误差随阶数  $Q$  变化的曲线。从图中可以看出，阶数较低时，绝对误差较大，这是由低阶多项式拟合余弦函数的不准确性造成的；随着阶数的增加，绝对误差逐渐下降；阶数取值为 11 时，绝对误差趋于稳定值。在 4.1 小节的仿真中，阶数  $Q = 9$ 。由此可见，在不同污染参数的条件下，阶数  $Q$  只需取到一个对应的有限值，即能使绝对误差足够小，保证相位解污染的效果理想。此外，由多项式高阶和阶数试探带来的计算量远小于分段低阶处理的计算量，在非线形优化算法中只需设置一次相位系数的初始值和搜索边界，避免了运算的多次重复。

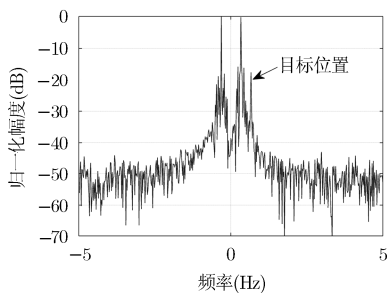


图 4 CED 算法解污染后的频谱

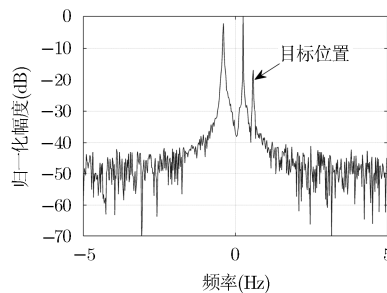


图 5 本文算法解污染后的频谱

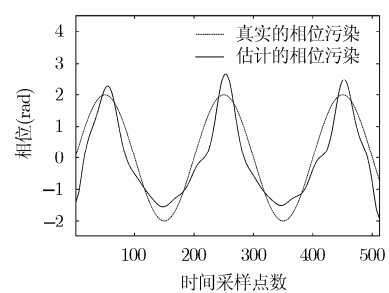


图 6 HRR 算法的相位污染

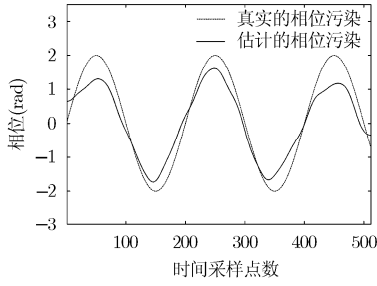


图 7 CED 算法的相位污染

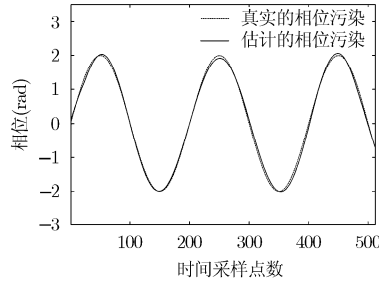


图 8 本文算法的相位污染

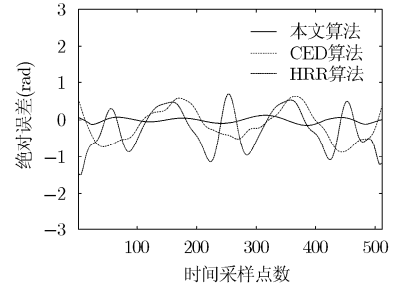


图 9 3 种算法的绝对误差

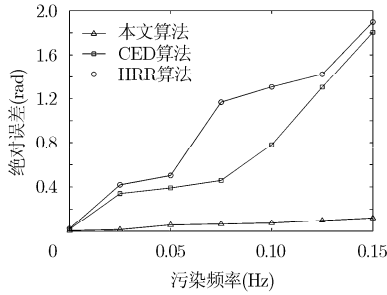


图 10 3 种算法绝对误差与污染频率的关系

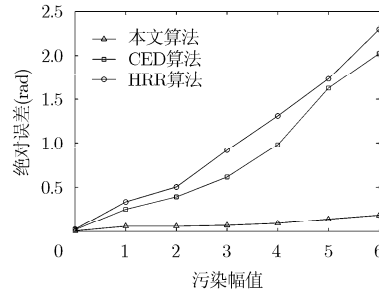


图 11 3 种算法绝对误差与污染幅度的关系

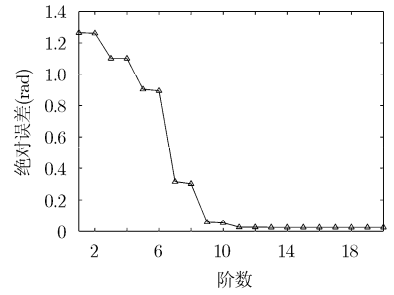


图 12 绝对误差与阶数的关系

### 4.4 应用实例

本小节利用天波超视距雷达实测数据对本文算法进行实例验证。由于 HRR 算法和 CED 算法等大多数算法不具备实测处理先验条件，本小节不做比较。下文中采用的数据来自于某部实际天波雷达，其工作频率为 18.3 MHz，带宽为 1 MHz，脉冲重复周期为 0.012 s，脉冲积累个数为 512。

图 13 是数据中某个距离单元回波信号的频谱。位于约 0 Hz 处的是海杂波峰，位于约 23.6 Hz 处的是已知目标。由于相干积累时间较短，多普勒分辨率较低，导致正负 Bragg 峰交叠在一起；另一方面，短的相干积累时间使得电离层附加的相位污染近似线性且很小，引起的多普勒展宽并不明显<sup>[22]</sup>。因此，本小节仿真对该数据添加较明显的相位污染以比较算法校正前后的效果。

图 14 是添加了快变大幅度相位污染后的信号频谱。从图中可以看出，海杂波峰与目标频谱都被

很大程度地展宽，目标信息很难获取。

图 15 是本文算法解相位污染后的信号频谱。从图中可以看出，经过校正后的污染回波谱能量集中，海杂波锐化十分明显，目标信号的污染相位得到补偿校正，目标信息的提取变得容易。

本小节的仿真结果说明了所提算法可有效实现基于天波超视距雷达实测数据的余弦调制相位污染。

### 5 结束语

本文针对天波超视距雷达电离层相位解污染问题，首次引入最大似然思想，推导出一种新算法。该算法通过最大化似然函数求解污染频率，并将信号最大似然问题转变为最小二乘估计问题，从而得到一个基于改进最大似然法的相位解污染算法。本文给出了仿真结果表明，相比 HRR 算法和 CED 算法，本文算法对污染相位的估计精度更高，更能有

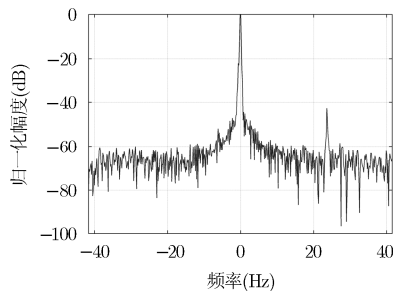


图 13 实测数据原始频谱

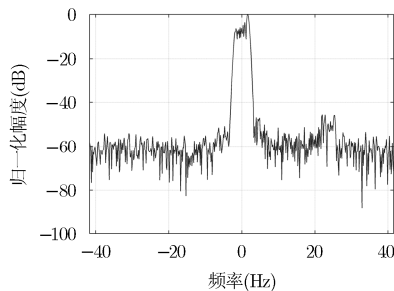


图 14 添加污染后的频谱

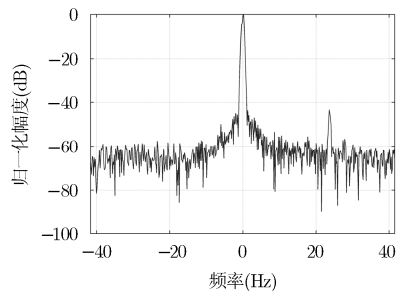


图 15 解污染后的频谱

效锐化谱峰, 更能显著提升目标检测性能。在污染程度较大的情况下, 本文算法的误差更小且受污染参数的影响不大。本文还给出了选择合适阶数的方法, 避免了分段处理, 在满足阶数条件时可以保证误差足够小。最后, 本文的仿真结果给实际工程中的相位解污染提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] SINNOTT D H. Over the horizon radar down-under[C]. Radar Conference (RadarCon), Arlington, VA, USA, 2015, 37(8): 1761-1764. doi: 10.1109/RADAR.2015.7131284.
- [2] 周万幸. 天波超视距雷达发展综述[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1373-1378.  
ZHOU Wanxing. An overview on development of skywave over-the-horizon radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1373-1378.
- [3] 胡进峰, 李万阁, 艾慧, 等. 基于改进时频分析方法的天波雷达机动目标检测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1843-1848. doi: 10.11999/JEIT141485.  
HU Jinfeng, LI Wange, AI Hui, et al. Maneuvering target detection algorithm based on improved time-frequency analysis method in skywave radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1843-1848. doi: 10.11999/JEIT141485.
- [4] BO C, GU H, SU W, et al. Ionosphere phase decontamination method based on subspace in sky-wave OTHR[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(24): 1874-1875. doi: 10.1049/el.2014.2994.
- [5] LI X, WANG R, YANG D, et al. Research on ionospheric phase decontamination for OTHR[C]. General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), Beijing, China, 2014: 1-4. doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929760.
- [6] LU K, WANG J, and LIU X Z. A piecewise parametric method based on polynomial phase model to compensate ionospheric phase contamination[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP, Hong Kong, China, 2003: 405-413. doi: 10.1109/ICASSP.2003.1202384.
- [7] 姜维, 邓维波. 分段多项式建模校正电离层相位污染算法研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 855-863.  
JIANG Wei and DENG Weibo. Ionospheric phase contamination correction method based on piecewise polynomial phase modeling[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(5): 855-863.
- [8] 游伟, 何子述, 陈绪元, 等. 基于三次相位建模的天波雷达污染校正[J]. 电波科学学报, 2012, 27(5): 875-879.  
YOU Wei, HE Zishu, CHEN Xuyuan, et al. Skywave radar decontamination based on the cubic phase model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(5): 875-879.
- [9] 刘颜回, 聂在平, 赵志钦. 改进的分段多项式建模的电离层相位去污染新方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 476-483. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.03.017.
- LIU Yanhui, NIE Zaiping, and ZHAO Zhiqin. A new method based on improved piecewise polynomial phase model to correct ionospheric phase contamination[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(3): 476-483. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.03.017.
- [10] LI M, HE Q, LI K, et al. A recursive method for compensating ionospheric phase contamination based on multistage Taylor expansion[J]. *IEICE Electronics Express*, 2014, 11(17): 20140391. doi: 10.1587/elex.11.20140391.
- [11] 李钢, 杨仕文, 刘颜回, 等. 天波超视距雷达电离层大幅度相位污染校正算法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 670-674. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2008.02.052.
- LI Gang, YANG Shiwen, LIU Yanhui, et al. Study on the correction algorithm of ionospheric phase perturbation with large amplitude in OTHR[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(2): 670-674. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2008.02.052.
- [12] HOWLAND P E and COOPER D C. Use of the Wigner-ville distribution to compensate for ionospheric layer movement in high-frequency sky-wave radar systems[J]. *IEEE Proceedings-F*, 1993, 140(1): 29-36. doi: 10.1049/ip-f-2.1993.0004.
- [13] LI Y, WEI Y, GUO R, et al. A cascaded approach for correcting ionospheric contamination with large amplitude in HF skywave radars[J]. *Scientific World Journal*, 2014, (3): 693872. doi: 10.1155/2014/693872.
- [14] 罗欢, 陈建文, 鲍拯. 一种天波超视距雷达电离层相位污染联合校正方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(12): 2829-2835. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00315.  
LUO Huan, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. A joint method to correct ionospheric phase perturbation in over-the-horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2829-2835. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00315.
- [15] LU K, LIU X, and LIU Y. Ionospheric decontamination and sea clutter suppression for HF skywave radars[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(2): 455-462. doi: 10.1109/JOE.2004.839936.
- [16] YOU W, HE Z, and WANG S. Ionospheric decontamination for skywave OTH radar based on complex energy detector[J]. *Journal on Advances in Signal Processing*, 2012, (1): 1-8. doi: 10.1186/1687-6180-2012-246.
- [17] 毛昭勇, 宋保维, 李正, 等. 基于遗传算法的最大似然参数优化估计[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 79-82. doi: 10.3321/j.issn:1001-9669.2006.01.016.  
MAO Zhaoyong, SONG Baowei, LI Zheng, et al. Optimization method of maximum likelihood estimation parameter estimation based on genetic algorithms[J]. *Mechanical Strength Magazine*, 2006, 28(1): 79-82. doi: 10.3321/j.issn:1001-9669.2006.01.016.

- 10.3321/j.issn: 1001-9669.2006.01.016.
- [18] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201-1206. doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.001.
- MA Yongjie and YUN Wenxia. Research progress of genetic algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(4): 1201-1206. doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.001.
- [19] 严韬, 陈建文, 鲍拯. 基于改进遗传算法的天波超视距雷达二维阵列稀疏优化设计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 3014-3020. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02011.
- YAN Tao, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Optimization design of sparse 2-D arrays for over-the-horizon radar (OTHR) based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 3014-3020. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02011.
- [20] 张光澄. 非线性最优化计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005, 第 2 章.
- ZHANG Guangcheng. *Nonlinear Optimization Calculation Method*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005, Chapter 2.
- [21] ABRAMOVICH Y I and SAN A G. Over-the-horizon radar potential signal parameter estimation accuracy in harsh sensing environments[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, Italy, 2014: 801-804. doi: 10.1109/ICASSP.2014.6853707.
- [22] 郭欣, 倪晋麟, 刘国岁. 短相干积累条件下天波超视距雷达的舰船检测[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(4): 613-618.
- GUO Xin, NI Jinlin, and LIU Guosui. The ship detection of sky wave over-the-horizon radar with short coherent integration time[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(4): 613-618.
- 胡进峰: 男, 1976 年生, 副教授, 主要研究方向为相控阵与自适应处理、超视距雷达信号处理、随机信号雷达.
- 薛长飘: 男, 1991 年生, 硕士生, 研究方向为超视距雷达信号处理.
- 李会勇: 男, 1975 年生, 副教授, 主要研究方向为阵列信号处理与自适应信号处理.
- 谢菊兰: 女, 1981 年生, 副教授, 主要研究方向为自适应信号处理、数字波束形成技术和共形阵 DOA 估计.