

# 地波超视距雷达自适应干扰抑制的改进

张雅斌<sup>1,2</sup>, 尚海燕<sup>1</sup>, 张守宏<sup>1</sup>, 苏洪涛<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 宝鸡气象局, 陕西宝鸡 721006)

**摘要:** 针对地波超视距雷达探海工作期间高频干扰严重海杂波强的特点, 在阵列自适应波束形成时考虑了海杂波约束条件, 改进了地波超视距雷达探海工作时的干扰抑制方法. 改进方法使得自适应干扰抑制后, 回波中一阶海杂波的时域相关特性不会发生破坏而在频域上“虚假”展宽, 从而有利于后续处理中进行海杂波滤除和目标检测. 最后使用 OSMAR2000 的实测数据对本文方法进行了检验.

**关键词:** 地波超视距雷达; 自适应干扰抑制; 次累积时间

**中图分类号:** TN958.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)09-1667-03

## Improvement of Adaptive Interference Suppression for HF GWR

ZHANG Ya bin<sup>1,2</sup>, SHANG Hai yan<sup>1</sup>, ZHANG Shou hong<sup>1</sup>, SU Hong tao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Baoji Meteorological Bureau, Baoji, Shaanxi 721006, China)

**Abstract:** HF ground wave radar encounters intense interference and clutter during operation in ocean environment. This paper presents an improved adaptive beamforming algorithm introducing clutter constraints which do not destroy the natural temporal coherence of the first order ocean clutter after interference suppression and benefit target detection in frequency domain subsequently. Performance of presented algorithm for interference suppression is evaluated using data acquired by OSMAR2000.

**Key words:** HF ground wave radar (HF GWR); adaptive interference suppression; sub CPI

### 1 引言

地波超视距雷达(HF GWR)探海工作期间利用垂直极化高频电磁波沿海面绕射的特性,在飞机舰船、海浪洋流<sup>[1,2]</sup>等军事民用目标的探测方面得到日益广泛地应用.该体制雷达(工作在3~30MHz的高频段)在工作期间大部分时间内,来自广播电台、民用电台(如近距离渔船的通信电台)以及电离层传播的高频电磁波都会对其目标检测产生很强的干扰.为了获得较高的多普勒频率分辨力以检测舰船等低速目标,高频地波雷达的相干累积时间(CPI)一般达十几分钟,而上述干扰持续时间一般只有几秒到几十秒,相对于相干累积时间来说很短,常被称作“瞬态干扰”<sup>[3]</sup>.与此同时,地波超视距雷达在探海工作期间会接收到很强的海杂波,海杂波往往覆盖目标检测的整个空间(方位)和频率范围.因此,干扰抑制与海杂波滤除成了地波超视距雷达探海工作期间有效进行目标检测的关键.该体制雷达实际工作中一般先通过阵列信号处理抑制干扰,然后对数据处理滤除海杂波分量后进行目标检测.近期相关研究中,文献[3,4]分别给出了高频天波、地波超视距雷达瞬态干扰的抑制方法,而文献[5,6]分别针对地波超视距雷达一阶海杂波滤除问题,提出了基于正弦波迭代和矩阵构造与奇异分解的目标检测方法.以上两方面的研究都未从整体上考虑地波超视距雷达探海工作中干扰抑制与海杂波滤除之间的紧密联系与相互影响.引入有效方法在空域对瞬态干

扰进行自适应抑制同时,必须减小波束形成时因接收方向图的快变而对慢变海杂波时域包络产生的调制影响,防止海杂波在频谱上的“虚假”展宽,以便后续处理中对频域落入海杂波一阶Bragg峰附近的目标进行检测.

本文借鉴文献[4]中的干扰抑制方法,同时考虑减小“次累积时间”内空域自适应波束形成对海杂波时域特性的影响,对地波超视距雷达探海工作期间的自适应干扰抑制方法进行改进,并使用OSMAR2000实测数据对改进方法的有效性进行了检验.

### 2 地波超视距雷达干扰抑制的改进

设 $t$ 时刻某距离单元处回波对应的阵列快拍(列矢量)为:

$$X(t) = S(t) + C(t) + J(t) + N(t) \quad (1)$$

其中, $S(t) = s(t)a(\theta_s)$ 表示 $t$ 时刻期望信号阵列快拍, $s(t)$ 为期望信号时域波形, $a(\theta_s) = [1, e^{j2\pi ds \sin\theta_s/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(N-1)ds \sin\theta_s/\lambda}]^T$ 为导向矢量, $d$ 为阵元间距, $\lambda$ 为雷达工作波长, $\theta_s$ 为期望信号入射角. $C(t)$ 表示 $t$ 时刻海杂波阵列快拍. $J(t) = A^* j(t)$ 表示 $t$ 时刻干扰阵列快拍,其中, $A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_p)]$ , $j(t) = [j_1(t), j_2(t), \dots, j_p(t)]^T$ , $T$ 表示转置.这里假设雷达探海工作期间存在来自 $P$ 个未知方位 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 的高频干扰 $[j_1(t), j_2(t), \dots, j_p(t)]$ , $j_i(t)$ 为第 $i$ 个干扰的时域波形. $N(t)$ 表示 $t$ 时刻阵元内部的噪声快拍.

采样矩阵求逆(SMI)自适应波束形成方法进行干扰抑制时, 干扰协方差矩阵  $R(t)$  由下式估计<sup>[7]</sup>:

$$R_{KT}(t) = \frac{1}{TK} \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K X_k(t) X_k^H(t) \quad (2)$$

$X_k(t)$  为第  $t$  个脉冲重复周期内第  $k$  距离单元对应回波(不含期望信号)的阵列快拍,  $T$  为脉冲累积数,  $K$  为所选距离单元的个数,  $H$  表示共轭转置. 在双基雷达情况下, 不包含期望信号的  $R(t)$  可由直达波到达之前的回波进行估计; 单基雷达工作时由较远距离单元处对应的回波求得. 为了获得高的速度分辨率, 高频地波雷达的相干累积时间(CPI)一般达到十几分钟. 高频干扰一般持续时间仅有几秒到几十秒, 相对于相干累积时间来说很短, 通常称之为“瞬态干扰”. 为了在自适应波束形成干扰抑制过程中能够对这种非平稳的“瞬态干扰”快速响应, 这里将地波雷达的相干累积时间(若对应  $P$  个发射脉冲)分成  $M$  个短时间段(简称“次累积时间”), 则每个次累积时间内对应  $Q = P/M$  个脉冲. 自适应波束形成时,  $Q$  的选择既要能够快速响应非平稳“瞬态干扰”的变化; 又要兼顾次累积时间内估算  $R(t)$  所必需的足够次数的阵列快拍, 即满足条件  $KQ \geq 2N$ , 其中  $K$  为式(2)中的距离单元数,  $N$  为阵元数. 第  $m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) 个次累积时间内的干扰协方差矩阵可由下面估计:

$$R_m = \frac{1}{KQ} \sum_{t=Q(m-1)}^{Qm-1} \sum_{k=1}^K X_k(t) X_k^H(t) \quad (3)$$

地波超视距雷达探海工作期间, 上述求解干扰协方差矩阵过程可简单概括如下: 先快时间域(距离之间)平均, 后慢时间域(重复脉冲之间)平均. 若记第  $m$  个次累积时间内使用的权矢量为  $w_m$ ,  $m = 1, \dots, M$ , 则第  $m$  个次累积时间内  $t$  时刻对应距离检测单元回波波束形成后的阵列输出为:  $y(t) = w_m^H X(t)$ ,  $t = Q(m-1), \dots, Qm-1$ , 其中  $X(t)$  为距离检测单元在  $t$  时刻对应的阵列快拍. 第一个次累积时间内波束形成权矢量为采样矩阵求逆算法的解:  $w_1 = R_1^{-1} a(\theta_s) / a^H(\theta_s) R_1^{-1} a(\theta_s)$ .

下面详述本文计算  $w_m$  ( $m = 2, \dots, M$ ) 的主要思路与具体推导与计算公式.

地波超视距雷达探海工作期间干扰主要为几个未知入射方向的高频源, 理论上通过窄带波束形成方法即可在空域将其滤除. 海杂波来自于观测范围内连续分布的各个角度上, 其主要特点是频谱中存在两个位于  $f_b = \pm \sqrt{g/\lambda\pi}$  处的一阶 Bragg 峰. 如果表面洋流的平均径向速度为  $v_s$ , 则接收回波中一阶海杂波频率为  $f_c = f_s + f_b$ , 其中  $f_s = 2v_s/\lambda$ . 同时, 海杂波还存在位于其它频率处的高阶谱, 但高阶谱峰比一阶 Bragg 峰电平低 20~25dB<sup>[8]</sup>, 这里先不予考虑. 针对海杂波空间和频率的上述特点, 在干扰和杂波抑制时, 一般首先在空间上滤除干扰, 然后在频域上去掉海杂波. 假定第  $m$  个次累积时间内自适应波束形成对应的方向图为  $P_m(\theta)$ , 则某距离单元内一阶海杂波(这里考虑  $I$  个连续分布的海杂波点)在  $t$  时刻的

阵列输出可表示为  $\sum_{i=1}^I A_i P_m(\theta_i) \exp\{j2\pi(f_s + f_b) T_r t\}$ , 其中  $A_i$  为  $\theta_i$  方位入射的海杂波点复振幅,  $T_r$  为脉冲重复周期,  $Q(m-1) \leq t < Qm-1$ . 可见, 由于  $P_m(\theta_i)$  随次累积时间序列  $m$  变

化, 一阶海杂波的阵列输出在频率上沿  $f_s + f_b$  发生展宽. 也就是说, 上文引入“次累积时间”以有效抑制非平稳“瞬态干扰”时, 接收波束方向图在次累积时间之间的变化将对时域慢变海杂波产生调制作用<sup>[9]</sup>. 影响主要发生在次累积时间的连接时刻, 应该在这些时刻加入约束条件来减小接收方向图随时间变化对海杂波产生的调制; 否则频谱上一阶 Bragg 峰向临近区域“虚假”扩散, 不利于后续相干积累处理中对落入一阶 Bragg 峰附近的舰船等目标进行检测. 下面进一步推导说明.

考虑回波包含  $L$  个杂波成份(本文中  $L = 3$ , 表示杂波有三个主要成份: 零频附近杂波和两个一阶海杂波), 使第  $m-1$ 、第  $m$  个次累积时间内波束形成权矢量  $w_{m-1}$  和  $w_m$  满足如下约束方程:

$$w_m^H X(t) = w_{m-1}^H X(t), \quad t = Q-L+1, \dots, Q, \dots, Q+L-1, w_{m-1} \neq w_m \quad (4)$$

$X(t)$  表示某距离单元回波  $t$  时刻对应的阵列快拍, 假设波束形成对期望信号为单位增益, 并且有效抑制了干扰(干扰矩阵由式(3)估计); 即使其存在, 与海杂波相比可忽略不计, 则联合式(1)有:

$$w_{m-1}^H X(t) \approx s(t) + w_{m-1}^H C(t), \quad t = Q-L+1, \dots, Q, \dots, Q+L-1, w_{m-1} \neq w_m \quad (5)$$

$$w_m^H X(t) \approx s(t) + w_m^H C(t), \quad t = Q-L+1, \dots, Q, \dots, Q+L-1, w_{m-1} \neq w_m \quad (6)$$

由式(4)、(5)与(6)得到:  $w_m^H C(t) \approx w_{m-1}^H C(t)$ ,

$$t = Q-L+1, \dots, Q, \dots, Q+L-1, w_{m-1} \neq w_m \quad (7)$$

至此, 在上述推导假设条件下, 可以看出波束形成权矢量约束方程式(4)与(7)等价. 而式(7)表明: 用通过加入第二个次累积时间内的前  $L$  个阵列快拍估计的  $w_{m-1}$  对第二个次累积时间内所有快拍做波束形成. 海杂波输出结果与使用  $w_m$  相同. 也就是说, 次累积时间之间权矢量由  $w_{m-1}$  变为  $w_m$  时波束形成没有对回波中的海杂波成份产生调制作用, 即  $(w_m^H - w_{m-1}^H) C(t) = 0$ .

记:  $C_m = [a(\theta), X(Q(m-1)-L+1), \dots, X(Q(m-1)), \dots, X(Q(m-1)+L-1)]$

$$G_m = [1, w_{m-1}^H X(Q(m-1)-L+1), \dots, w_{m-1}^H X(Q(m-1)), \dots, w_{m-1}^H X(Q(m-1)+L-1)]$$

则在上述假设条件下(波束形成对期望信号为单位增益, 并且有效抑制了干扰)权矢量约束方程式(4)的解即为对如下最优问题求解:

$$\begin{aligned} & \min_{w_m} w_m^H R_m w_m \\ & \text{s.t. } w_m^H C_m = G_m \end{aligned}$$

解得第  $m$  个次累积时间内自适应波束形成权矢量:

$$w_m = R_m^{-1} C_m [C_m^H R_m^{-1} C_m]^{-1} G_m, \quad m = 2, \dots, M$$

### 3 实测数据检验

实测数据由武汉大学研制的高频地波雷达 OSMAR2000 提供. 该雷达采用“一发八收”单基工作模式, 工作频率为 7.5MHz, 接收阵列为八根间距 16m 的天线阵. 文献[10]对 OSMAR2000 的工作参数进行了详细说明. 图 1 为观测期间接收

天线在某距离单元处(112.5km)回波功率的时间变化序列.可以看出在 184~190 时段回波功率突然增大,该时段接收天线在其他距离单元也出现类似情况,可以断定该时段存在高频干扰.图 2 为对接收回波的时间序列进行 256 点相干累积后的频率分析结果(采用 40dB 旁瓣的切比雪夫加权),横坐标为由一阶 Bragg 峰对应频率归一化  $f_b$  的回波多普勒频率.可以看出,1.57Hz 与 1.69Hz 处功率(最大功率归一化)分别为 -14.0dB、-13.3dB,总体上比周围平均高出 5.2dB, -1.81Hz 处功率为 -13.5dB,比周围平均高出了 4.9dB.分析发现,这些频率附近较大的回波功率正是由于相干积累期间某些时段高频干扰引起的.

图 3 为上述距离单元回波经波束形成后进行 256 点相干累积得到的频域分析结果.虚线对应参考文献[4]中由式(3)估计干扰协方差矩阵做波束形成后计算得到的频域结果,实线为改进方法处理后得到的结果(其中干扰协方差矩阵由第 58 到第 68 距离

单元的空间平均估计得到).可以看出,虚线对应方法使 1.57Hz、1.69Hz 与 -1.81Hz 处的干扰分别降低到了 -29.6dB、-22.6dB 和 -24.1dB;改进方法对三处干扰的抑制分别达到了 -25.1dB、-27.7dB 和 -28.4dB,除 1.57Hz 处干扰抑制效果略差于文献[4]中方法外,改进方法在其他干扰处的抑制是同样有效的.同时看出,图 3 中改进方法使两个一阶 Bragg 峰海杂波谱变细,其中归一化频率 1 处的效果更为显著一些.图 4 为另一时段相同距离单元处(112.5km)实测数据的处理结果.可以看出,由于海态及环境场随时间的变化,同一距离单元海杂波回波在不同观测时段存在微小差异;与图 3 类似,本文改进方法取得了较好的干扰抑制效果.

## 4 结论

本文针对地波超视距雷达探海工作期间的特殊环境,在“次累积时间”内构造干扰协方差矩阵做自适应波束形成抑制“瞬态干扰”时,考虑了这种时间分段干扰抑制处理对海杂波调制所产生的频谱展宽影响,从而有利于空域干扰抑制后对频域落入海杂波一阶 Bragg 峰附近的舰船目标进行检测.通过实测数据初步检验,说明本文改进的干扰抑制方法对地波超视距雷达探海工作期间干扰杂波处理是切实有效的.

致谢 感谢武汉大学高频地波雷达小组提供的实测数据.

## 参考文献:

- [1] RAFAAT K, BRIAN G, DESMOND P, et al. Target detection and tracking with a high frequency ground wave radar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(4): 540-548.
- [2] GEORGES T M, HARLAN J A, LEBEN R R. A test of ocean surface current mapping with Over-the Horizon radar[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(1): 101-109.
- [3] 邢孟道, 保铮, 强勇. 天波超视距雷达瞬态干扰抑制[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 823-826.  
XING M D, BAO Z, QIANG Y. Transient interference excision in OTHR[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2002, 30(6): 823-826. (Chinese Source)
- [4] 苏洪涛, 保铮, 张守宏. 地波超视距雷达高频通信干扰抑制[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(4): 442-445.  
SU H T, BAO Z, ZHANG S H. HF communication interference mitigation in HF GWR[J]. JOURNAL OF XIDIAN UNIVERSITY, 2003, 30(4): 442-445. (Chinese Source)
- [5] RAFAAT K, DESMOND P, JOHN W. Ocean clutter suppression for an HF ground wave radar[J]. IEEE, CCECE'97: 512-515.
- [6] BENJAMIN R. HF ship detection through clutter cancellation[J]. IEEE, National Radar Conference, Dallas: 1998, 281-286.
- [7] FABRIZIO G A, ABRAMOVICH Y I, et al. Adaptive cancellation of nonstationary interference in HF antenna arrays[J]. IEE Proc Pt F, 1998, 145(1): 19-24.
- [8] SHEARMAN E D R. Propagation and scattering in MF/HF groundwave radar[J]. IEE Proceedings, Part F, 1983, 130(7): 579-590.
- [9] FABRIZIO G A, Gershman A B, Turley M D. Non-stationary interference cancellation in HF surface wave radar[J]. Radar Conference, 2003: 672-677.
- [10] 扬子杰, 柯亨玉, 文必洋. 高频地波雷达波形参数设计[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 47(5): 528-531.  
YANG Z J, KE H Y, WEN B Y. Waveform parameters design for sea state detecting HF ground wave radar[J]. J. Wuhan Univ (Nat. Sci. Ed.), 2001, 47(5): 528-531. (Chinese Source)

## 作者简介:



张雅斌 男, 1976 年 3 月生于陕西宝鸡, 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室博士生, 研究方向为地波超视距雷达信号处理.  
E-mail: ddusa@yeah.net.

尚海燕 女, 1969 年 11 月生于黑龙江, 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室博士生, 研究方向为信号与信息处理.  
E-mail: haiyanshangismc@yahoo.com.cn.

张守宏 男, 1938 年生于安徽六安, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 长期从事雷达和雷达信号处理等领域的科研与教学工作.