

高频地波雷达干扰抑制方法研究

李高鹏, 李 雷, 许荣庆

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文提出了新的高频地波超视距雷达抗非平稳射频干扰解决方案, 以改善高频雷达中目标检测的性能. 本文首先给出一种利用微调波束指向的导向矢量, 在允许的误差范围内最大程度抑制干扰的最优算法, 然后本文根据基于海杂波保持的思想提出一种新的算法解决近距离海杂波扩散引起基底抬高的问题. 最后本文总结了两种算法相结合的统一方案, 实验数据处理结果都表明这一方案对抗非平稳射频干扰是有效的.

关键词: 高频雷达; 干扰抑制; 波束形成; 海杂波保持

中图分类号: TN956 93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2005) 03 0514 03

Study of Interference Rejection Methods in High Frequency Surface Wave Radar

LI Gao peng, LI Lei, XU Rong qing

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A novel nonstationary radio interference cancellation scheme was given to improve the performance of target detection in high frequency surface wave Over the Horizon radar. First, the optimum algorithm was proposed that suppresses the nonstationary interference to the utmost by modifying the array steering vector under the permitted error limit; then, a method based on the idea of maintaining the sea clutter response was introduced to settle the problem of floor increasing for the reason of the clutter scatter. The interference cancellation frame was synthesized by the two methods at last. And the experimental results show it is efficient to reject the nonstationary interference.

Key words: HF radar; interference rejection; beam form; sea clutter maintain

1 引言

高频地波雷达工作在短波波段低端, 密集的短波电台占用了绝大部分高频波段的频率, 这使高频波段的可用频率大为减少, 在电台工作高峰期, 甚至找不到任何干净的可用频带^[1]. 因此, 工程技术人员一直都在寻找一些有效的方法来抑制这些干扰, 提高雷达系统中的信干噪比, 改善恶劣环境下的雷达工作性能. 自适应波束形成技术是一种常见的干扰抑制的手段, 其原理是自动的调整波束加权系数来对消进入接收机的干扰.

为了抑制空域/时域不平稳的干扰, 将较长的积累周期分成若干较小的时间段, 在小时间片段内认为干扰相对稳定, 这样波束形成系数将随干扰的变化而作相应的自适应调整. 然而, 高频雷达中的主要干扰是通过电离层传播过来的非平稳信号, 其不仅空间特性随时间快速的变化, 而且受多径效应等的影响干扰信号幅度也剧烈变化^[2]. 不仅如此, 阵列单元还不可避免的存在频率和方位响应等方面的不一致性, 接收通道的频带内也存在不同的幅频特性, 这些都增加了实际系统中的不确定性. 因此, 即使在很短的时间内, 进入接收机的射频干扰也会存在着不稳定地空间特性, 从不同程度上降低了常规自适应干扰抑制方法的性能. 同时, 由于干扰的变化, 必然导致波束系数的随时间变化而调整, 而这种调整只与当前处理单元干扰特性有关, 其结果相当于在积累周期内对回波信

号产生了一些不可预测的调制, 减弱了海面目标信号和海浪回波信号在积累周期上的相关性, 特别是海浪回波较强时(近距离和高海态), 海浪回波的杂散使基底明显抬高^[3].

正是基于高频雷达这些实际应用背景, 本文从提高抗干扰的综合性能出发, 提出新的高频雷达干扰抑制解决方案. 考虑到雷达工作环境中干扰的不稳定性, 采样矩阵所获得的干扰空域特性的不确定性, 以及提取到的干扰信号信息不充分性, 修正波束导向矢量, 以达到最优的干扰抑制性能的目的, 并通过搜索二阶曲面空间来求解波束形成系数. 另一方面, 利用保持海杂波响应的方法保证速度处理后海杂波集中在 Bragg 峰位置, 解决近区基底抬高的问题. 最后, 本文给出了新的抗干扰处理方案, 对不同的距离单元利用不同的干扰抑制处理手段, 同时保证对抗非平稳干扰和海杂波杂散.

2 阵列信号模型与波束形成器

高频地波雷达接收阵列信号的模型可表示为^[3]:

$$\mathbf{x}_t(k) = \mathbf{s}_t(k) + \mathbf{c}_t(k) + \mathbf{i}_t(k) + \mathbf{n}_t(k) \quad (1)$$

这里, $\mathbf{x}_t(k) = [x_t^1(k), \dots, x_t^M(k)]^T$ 是阵列的第 t 个扫频周期内第 k 个距离门的复采样, $\mathbf{s}_t(k)$, $\mathbf{c}_t(k)$, $\mathbf{i}_t(k)$, $\mathbf{n}_t(k)$ 分别是目标信号、海杂波、干扰和噪声的采样, 对于目标信号来说

$$\mathbf{s}(k) = \mathbf{g}(k) \mathbf{a}(\theta) \quad (2)$$

$\mathbf{g}(k)$ 是目标信号波形, $\mathbf{a}(\theta)$ 为对应于 θ 方向的空域响应的导向矢量, 对于理想的目标来说假设, 在一个相参积累周期

(CPI) 中目标的方向是恒定的. 由于干扰与噪声总是同时存在的, 令 $j_t(k) = i_t(k) + n_t(k)$, 各通道的接收噪声被认为是互相独立的, 它的时空相关特性由下式决定

$$E\{n_t(r) n_t^H(s)\} = \delta(r-s) \delta(t-u) \sigma_n^2 \quad (3)$$

σ_n^2 为噪声能量. 外部干扰与噪声的协方差矩阵定义为

$$\begin{aligned} R_t &= E\{(i_t(k) + n_t(k))(i_t(k) + n_t(k))^H\} \\ &= E\{i_t(k) i_t^H(k)\} + \sigma_n^2 I \end{aligned} \quad (4)$$

在实际的数据处理过程中, R 由采样协方差阵来估计:

$$R_t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N j_t(k) j_t^H(k) \quad (5)$$

窄带信号波束形成由下式给出: $y_t(k) = w^H x_t(k)$ (6)

其中, $w = [w_1, \dots, w_M]^T$ 为波束形成系数, $y_t(k)$ 为波束形成的输出, 为了抑制接收数据中存在的干扰, 利用最大信干噪比准则得到线性约束最小方差波束形成系数 $w^{[4]}$:

$$w = [a^H(\theta) R^{-1} a(\theta)]^{-1} a(\theta) \quad (7)$$

3 非平稳干扰的最优波束形成算法

从投影子空间的角度看, 对协方差矩阵求逆的方法等效于得到干扰信号的正交补空间, 而最优加权系数就是保证在波束指向方向响应的同时与干扰的子空间正交. 在实际的处理环境中, 干扰信号大多是非平稳的, 也就是说, 干扰信号的子空间 C 存在着一定的误差, 波束指向的导向矢量 a 也只是假想的导向矢量, 与实际接收系统存在着不一致, 因此导向矢量在干扰正交补空间上的投影并不能够代表实际系统的波束系数同干扰子空间正交. 这样, 总有一部分干扰会落入形成的波束的空间中, 不能被抑制掉, 因此应对 a 进行一定的修正, 使之逼近于实际系统的导向矢量^[5], $\tilde{a} = a + \delta$ (8)

这里, δ 是 $M \times 1$ 维误差矢量, 假设 $\|\delta\| \leq \varepsilon$, 保证在修正后 \tilde{a} 的空间内, 波束响应都大于 1 以维持波束增益, 有:

$$|w^H \tilde{a}| \geq 1 \quad \forall \|\delta\| \leq \varepsilon \quad (9)$$

考虑信号的导向矢量不一致这个因素, 约束方程为:

$$\begin{cases} \min_w w^H R^{-1} w \\ \min_{\|\delta\| \leq \varepsilon} |w^H \tilde{a}| \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

此约束方程可以理解为在保证主瓣增益的条件下, 在某个修正的导向矢量范围内, 干扰抑制效果都能达到最优. 对波束导向矢量的修正, 提高了方法对系统误差, 干扰非平稳等条件的稳健性, 从而更有效的抑制高频雷达接收系统中的非平稳干扰.

为求解该约束方程, 首先对其进行化简, 把公式(8)代入式(10)中, 可得约束为 $\min_{\|\delta\| \leq \varepsilon} |w^H a + w^H \delta| \geq 1$ (11)

利用 Cauchy Schwarz 不等式, 得到

$$|w^H a + w^H \delta| \geq |w^H a| - |w^H \delta| \geq |w^H a| - \varepsilon \|w\| \quad (12)$$

同时, 当 w 旋转某一个相位的时候, 式(10)结果不变, 为了求解问题的方便, 设定如下模型

$$\operatorname{Re}\{w^H a\} \geq 0 \quad \operatorname{Im}\{w^H a\} = 0 \quad (13)$$

于是, 式(10)就可以转化为

$$\begin{cases} \min_w w^H R^{-1} w \\ |w^H a| \geq \varepsilon \|w\| + 1 \\ \operatorname{Im}\{w^H a\} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

转换式(14)为标准的二阶曲面空间^[5], Y. Nesterov 提出二阶曲面空间求解的 interior point 算法, 计算量为^[6], 利用 J. F. Sturm 开发的 Sedimu 工具箱求解该二阶曲面空间^[7], 可以得到最优加权系数.

4 对抗海杂波杂散的干扰抑制方法

杂波扩散是由于时变的波束形成系数导致积累周期内海杂波的相关性被破坏造成的, 因此, 有必要对波束的自适应调整加以约束, 本文通过保持相邻处理单元间同一距离门的海杂波响应, 减小这些不利的影响.

令相邻两个处理单元的波束系数为 w_1, w_2 , 如果保持两组波束系数对海杂波的响应一致, 即 $w_2 c(k) = w_1 c(k)^{[3]}$, 这样就能够避免 Doppler 处理时海杂波的扩散. 然而, 由于干扰和噪声的存在, 接收信号 $x(k)$ 中不能直接观测到海杂波, 但如果扩展协方差矩阵包含第二个处理单元的前 L 个扫频周期接收信号, w_1 就能够去除 $x(k)$ 中的干扰成分. 这样, 此 L 个扫频接收信号利用第一个波束形成系数 w_1 的输出为 $w_1^H x(k) \approx g(k) + w_1^H c(k)$, $g(k)$ 为地杂波或信号等分量, 同样, 第二个波束形成系数 w_2 的输出是 $w_2^H x(k) \approx g(k) + w_2^H c(k)$, 这样, 约束 $w_2 c(k) = w_1 c(k)$ 可以转化为新的约束 $w_2 x(k) = w_1 x(k)$. 定义 $C_2 = [a, x(Q), \dots, x(Q+L-1)]$, $f_2 = [1, w_1^H x(Q), \dots, w_1^H x(Q+L-1)]$ 新的约束条件为:

$$\begin{cases} \min_w w_2^H R_2^{-1} w_2 \\ w_2^H C_2 = f_2 \end{cases} \quad (15)$$

这是传统的线性约束最小方差问题^[8], 求解该方程可以得到:

$$w_2 = R_2^{-1} C_2 (C_2^H R_2^{-1} C_2)^{-1} f_2 \quad (16)$$

5 高频雷达抗干扰解决方案

对于实际高频雷达抗干扰来说, 在处理环境中同时存在着干扰的非平稳和海杂波杂散两种不利因素, 上文的两种抗干扰算法只能解决其中的一个特定的因素. 保持海杂波的波束形成算法由于增加了维持海杂波响应的限制条件, 必然导致对干扰抑制有所不足, 而最优波束形成又会引起海杂波杂散, 针对高频雷达的实际应用, 需要找到一种能够同时解决两种问题的方法. 考虑到实际的高频雷达的检测背景, 只有在近区才会出现较强的海杂波, 随距离的增加, 海浪回波的能量逐渐减少, 海杂波扩散的现象越来越不明显, 因此只需对近区相邻处理单元进行海杂波的保持; 另一方面, 由于开关波门的影响, 在实际处理环境中, 干扰大都出现在较远的距离门. 同时, 与海杂波扩散相比来说, 非平稳干扰的影响要小得多, 综合考虑到两种情况, 设计新的高频雷达抗干扰处理方案, 如图 1. 处理方案中, 对于海杂波占优的近区距离门利用海杂波保持算法, 以防止 Bragg 峰扩散现象, 对远区的非平稳干扰, 则利

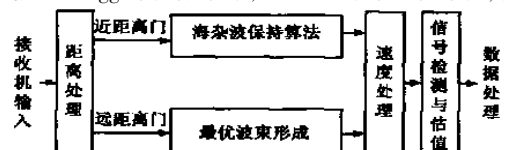


图 1 HF 雷达抗干扰处理方案

用最优的波束形成以保证最大限度的抑制干扰. 这样, 在保证非平稳干扰抑制的同时, 保证近区海杂波相参特性不被破坏.

6 数据处理结果与性能分析

利用高频地波超视距雷达实测数据进行对消效果分析. 本次实验数据取自 8 元线性均匀天线阵列的高频雷达系统. 系统载频为 6.2MHz, 数据里面含有强干扰和海浪回波, 干噪比约为 50dB. 分别对近距离和远距离的数据进行干扰抑制处理比较, 分析新方案的干扰抑制性能.

在远距离 140 公里处注入 400km/h, 信噪比为 20dB 的目标, 分析远区非平稳干扰抑制效果. 分别用固定波束形成, 传统自适应波束形成和最优波束形成方法进行处理, 几种方法

对干扰的抑制效果如图 2 所示. 由于干扰的影响, 固定波束形成根本不能使雷达正常工作, 较多干扰占据了多个多普勒门, 造成无法检测; 传统波束形成的方法对干扰的抑制也有明显的不足; 而修改导向矢量的波束形成方法成功抑制住了所有的干扰, 同传统自适应波束形成相比较, 基底明显降低, 信噪比改善约有 8dB, 表现出最好的非平稳干扰抑制效果, 提高了高频雷达检测能力.

在近距离 30 公里注入目标, 对应近区海杂波较强的地方, 分析海杂波保持算法性能. 在时域提取协方差矩阵, 在距离域进行干扰对消, 每个处理单元为 1 个扫频周期, 取扩展矩阵个数 $L=3$, 用传统自适应波束形成和基于海杂波保持波束形成方法进行数据处理, 得到目标所在距离门的 Doppler 谱如图 3. 可以看出, 传统自适应波束形成的方法虽然能够对消干扰, 但在海杂波对应的距离门, 基底明显抬高, 存在海杂波杂散的现象; 而保持海杂波波束形成方法在抑制干扰的同时, 成功的保证了海杂波的相关性, 突出了目标信息, 对消性能令人满意.

7 结论

本文利用修正导向矢量的方法, 在容许最差的误差环境中搜索出最优的自适应波束, 最大程度地对消了高频地波雷达系统中存在的空间不平稳干扰, 并且本文还利用保持相邻

处理单元海杂波响应的方法解决强海杂波条件下时变自适应波束导致基底抬高问题, 为了保证实际系统能够同时解决海杂波扩散和非平稳干扰问题, 本文设计了一种新的高频雷达抗干扰处理方案. 在近区保持海杂波以防止扩散, 远区利用最优干扰抑制方法对抗非平稳干扰. 实测雷达数据处理结果验证了这一处理方案的有效性.

参考文献:

- [1] Yongtan Liu, Rongqing Xu, Ning Zhang. Progress in HFSWR research at harbin institute of technology [A]. Proceedings of the International Conference on Radar[C]. Adelaide, Australia: 2003. 522- 528.
- [2] Y I Abramovich, N K Spencer, S J Anderson, A Y Gorokhov. Stochastic constraints method in nonstationary hot clutter cancellation Part I: fundamentals and supervised training application[J]. IEEE Trans on AES, 1998, 34(4): 1271- 1230.
- [3] G A Fabrizio, A B Gershman, M D Turley. Non-stationary interference cancellation in HF surface wave radar[A]. Proceedings of the International Conference on Radar[C]. Adelaide, Australia: 2003. 672- 677.
- [4] R A Manzingo, T W Miller. Introduction to adaptive arrays[C]. New York: Wiley, 1980.
- [5] Sergiy A Vorobyov, A B Gershman, Zhi Quan Luo. Robust adaptive beamforming using worst case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem[J]. IEEE Trans on signal processing, 2003, 52(2): 313- 324.
- [6] M Lobo. Applications of second order cone programming[J]. Linear Algebra Application. 1998. 93- 228.
- [7] J F Sturm, Using SeDuMi 1.02 a matlab toolbox for optimization over symmetric cones [J], Optim Meth Softw, 1999, 11(8): 625- 653.
- [8] O L Frost. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. Proc IEEE, 1972, 60: 926- 935.

作者简介:



李高鹏 男, 1976 年出生于湖北省, 现为哈尔滨工业大学电子工程专业博士研究生, 主要研究方向为高频雷达空间干扰抑制技术. E-mail: ligp@rice.hit.edu.cn



李 雷 男, 1980 年 10 月出生于辽宁省锦州市, 2004 年于哈尔滨工业大学电子与通信工程系获得硕士学位, 现为哈尔滨工业大学通信与信息系统博士研究生, 主要研究方向为高频雷达干扰抑制技术.

许荣庆 男, 1958 年出生于黑龙江省, 哈尔滨工业大学工程技术研究所所长, 教授, 博士导师, 主要从事新体制雷达系统技术, 雷达成像技术和现代信号处理技术研究.