

# 超视距雷达中窄带干扰抑制技术研究

杨志群<sup>1,2</sup>, 倪晋麟<sup>2</sup>, 刘国岁<sup>1</sup>

(11 南京理工大学电子工程研究中心, 江苏南京 210094; 21 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

**摘 要:** 超视距雷达中, 发射信号带宽的选择受到密集的大功率干扰的限制, 很难找到较宽的且未被污染的干净频带, 导致了很低的距离分辨率和信干噪比, 较为理想的方法是在一定的带宽要求下抑制干扰。考虑到直接用凹口滤波零陷干扰时, 脉冲压缩后副瓣迅速抬高, 目标信号淹没在干扰的旁瓣之中, 本文提出了抑制旁瓣干扰的投影算法和时域自适应对消方法。理论分析和仿真结果表明: 投影法计算量小, 副瓣得到一定的降低, 但需要设计子带滤波器组, 且引入了暂态响应; 而自适应对消方法虽然计算量稍大, 但通过自适应调整权值可很好地抑制掉旁瓣干扰, 脉压后副瓣电平大大降低, 有效地提高了目标检测能力。

**关键词:** 距离分辨率; 凹口滤波; 投影算法; 自适应对消

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-1112-03

## Research on the Suppression Technology of Narrow Band Interference in OTHR

YANG Zhiqun<sup>1,2</sup>, NI Jinlin<sup>2</sup>, LIU Guosui<sup>1</sup>

(11 Electronic Engineering Research Center of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

21 Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

**Abstract:** In over-the-horizon radar (OTHR), the selection of transmitted bandwidth is limited by lots of crowded and powerful interference. It is difficult to find a broad and uncontaminated frequency band which results in low range resolution and signal-to-interference and noise ratio (SINR). A desired method is suppressing interference within a definite bandwidth. Considering the poor sidelobe of notch filtering method, in which target signal is masked in the sidelobes of interference, the projection algorithm (PA) and adaptive cancellation algorithm (ACA) are introduced. It follows that PA has the advantage of low complexity of computation and low sidelobe by designing sub-band filter group though the temporal response will be introduced. By adjusting the weights, ACA can eliminate sidelobe interference effectively at the cost of heavy burden of computation. The sidelobe level of pulse compression was reduced greatly which will increase target detection probability effectively.

**Key words:** range resolution; notch filter; projection algorithm; adaptive cancellation

## 1 引言

超视距雷达由于具有超视距、监视面积大等优点, 在早期预警、海洋遥感等领域得到了广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。但其工作在十分拥挤的高频段(3~30MHz), 该频段存在大量的广播电台、短波通信和工业干扰。为使雷达发射信号不受这些干扰的影响, 需要找到相对“寂静”的连续频带, 使该频带内无干扰存在。实际中由于大量密集而强大的干扰, 使得带宽的选择受到限制, 很难找到较宽的且干净的频带, 要么降低带宽, 造成超视距雷达距离分辨率很低; 要么在满足带宽的前提下抑制干扰<sup>[4~6]</sup>。通常, 对飞机目标带宽在10kHz以下, 对应的距离分辨率为15km; 而舰船目标, 为了提高信杂比, 应缩短分辨距离, 即需要更大带宽, 如20kHz、25kHz或更宽。因此带宽的选择要兼顾距离分辨率和带内干扰的影响, 较为理想的办法是在满足带宽的要求下抑制干扰。

为了使OTHR在恶劣的环境中获得足够的带宽, 不少学者提出了频谱不连续的思想<sup>[7,8]</sup>。用凹口滤波器零陷被干扰污染的频段, 得到间断的频谱, 各带宽之和满足总带宽的要

求。缺点是零陷干扰的同时将有用信号也滤除掉了, 脉压后的相对旁瓣会抬高, 且对凹口滤波器的设计提出较高的要求。

众所周知, 抑制副瓣对于提高目标检测概率尤为重要, 抑制副瓣的方法有两类: 一是致力于雷达发射波形的设计, 设计出低副瓣的发射波形; 另一类是通过抑制干扰来降低副瓣。文献[8]提出利用已估计的目标信号频谱代替凹口滤波器挖除的频段, 以降低副瓣, 该方法中目标频谱估计的精度是成功的关键, 要获得更低的副瓣电平, 需要循环叠代估计, 计算相当复杂。

为此, 本文介绍了在一定带宽内利用投影算法和自适应对消的方法抑制窄带副瓣干扰的技术, 并对其抑制性能进行了分析和比较。

## 2 投影算法

天波超视距雷达中, 功率强大的外干扰具有明显的空域和频域特性, 其频率范围占接收机带宽的一部分, 可以看成是大功率的窄带干扰, 能否有效地抑制这类干扰直接关系到超视距雷达的正常工作。投影法抑制干扰的思路如下: 首先, 由

空间谱估计得到信号的入射方向(由于空间谱估计技术已相当成熟,这里不再赘述);将阵列对准信号入射方向,空域滤波可部分抑制掉旁瓣方向的干扰;然后将任意两路相减得到的纯干扰和噪声通过子带滤波器,利用其输出构造投影矩阵,保证投影后干扰为零,而回波信号保持不变,从而达到抑制副瓣干扰的目的.实现示意图如图 1.

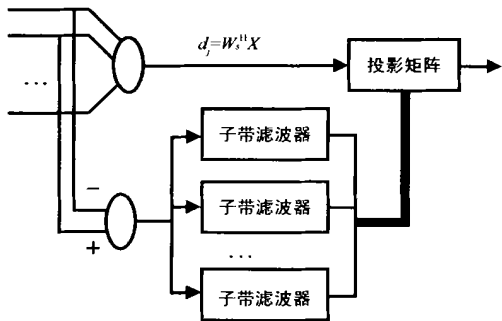


图 1 投影算法示意图

图中,阵列接收数据矢量为

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \quad (1)$$

$$x_i = s(t) e^{j \frac{2\pi d}{\lambda_0} (i-1) \sin(\theta_0)} + J_1(t) e^{j \frac{2\pi d}{\lambda_0} (i-1) \sin(\theta_1)} + \dots + J_K(t) e^{j \frac{2\pi d}{\lambda_0} (i-1) \sin(\theta_K)} + n(t) \quad (2)$$

由于窄带干扰的带宽远小于载波频率,波长可以都用  $\lambda_0$  表示.常规 DBF 输出为

$$d_j = W_s^H X \quad (3)$$

其中,  $W_s$  为空域傅立叶权矢量,  $j$  表示时间序列.很明显, DBF 输出中包含了主瓣进入的回波信号和从旁瓣进入的干扰剩余,且干扰剩余远大于回波信号,下面将构造投影矩阵来抑制干扰.

根据投影矩阵的正交性和幂等性<sup>[9]</sup>,投影矩阵  $P$  构造为

$$P = [I - U(U^H U)^{-1} U^H] \quad (4)$$

式中  $I$  为单位阵,设  $C, C^L$  分别为  $U$  张成的空间及其补空间,当向量  $x \in C, y \in C^L$  时,满足

$$\begin{cases} Px = 0 \\ Py = y \end{cases}$$

只剩下干扰和噪声.将其通过子带滤波器组,输出可构成矩阵:

$$U = [j_1(t), j_2(t), \dots, j_i(t)] \quad (6)$$

其中,  $j_i(t)$  为第  $i$  个子带滤波器的输出,即第  $i$  个子频段的干扰信号矢量.如将式(3)的 DBF 输出投影到矩阵  $P$  上则干扰剩余为 0,而信号矢量保持不变,从而达到抑制干扰的目的.

子带滤波器组的总带宽由频率监测仪提供的干扰频率范围确定,其中心频率间隔要满足频率采样定律.假设子带滤波器组将干扰频带均匀划分,其频响函数可表示为

$$H_k(X) = H(X - (k - 0.5)G - X_1) \quad (7)$$

$H_k(X)$  是由一个低通滤波器经频移得到的,  $G$  为滤波器带宽,

$N$  为滤波器的个数,  $k = 1, 2, \dots, N$ .

理想的矩形低通滤波器:

$$H(X) = \begin{cases} 1, & |X| \leq G/2 \\ 0, & |X| > G/2 \end{cases} \quad (8)$$

分析表明,上述方法实质上是一种频域概念上的简单投影法,各子带滤波器采用等带宽矩形滤波器,其输出并未作加权处理,计算量小,能在抑制干扰的同时保持信号谱的连续性,脉压后的副瓣电平得到降低.不足的是需要设计子带滤波器组,不可避免地引入滤波器的暂态响应,对干扰的抑制造成不利影响.为此,下面考虑用自适应对消器抑制干扰.

### 3 自适应对消器抑制干扰

自适应对消器由于其相当好的对消性能已在各个领域得到了广泛地应用,其实现框图如图 2<sup>[10]</sup>.图中 DBF 输出包含了由主瓣进入的回波信号和从旁瓣进入干扰剩余,干扰剩余远大于回波信号,需要在时域中进一步对消.问题的关键是要获得用以对消的参考信号,即纯干扰信号矢量.与投影法一样,由空间谱估计得到信号的入射方向,将阵列法向对准信号入射方向,假设  $v_{ij}$  为任意两路接收数据相减得到的纯干扰和噪声,其中已不包含信号分量,故用之作为实时的参考信号可对消掉 DBF 输出中占一定带宽的干扰剩余.对消器输出:

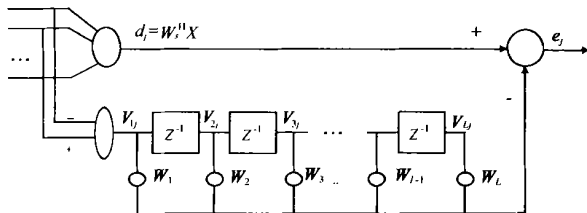


图 2 自适应对消法示意图

$$e_j = d_j - W_i^H V_j \quad (9)$$

其中:  $W_i$  为时域权矢量,  $V_j$  为  $V_{ij}$  经过不同时延后的列矢量.

$$V_j = [V_{1j}, V_{2j}, \dots, V_{Lj}]^T \quad (10)$$

根据最小均方准则,满足  $E\{e_j^2\} = E\{d_j - W_i^H V_j\}^2$  最小的权矢量:

$$W_i = R_w^{-1} P \quad (11)$$

其中

$$R_w = E\{V_j V_j^H\} \quad (12)$$

$$P = E\{V_{1j} d_j^*, V_{2j} d_j^*, \dots, V_{Lj} d_j^*\}^T \quad (13)$$

此时,对消后输出  $e_j$  中只剩下信号分量.定义干扰对消比

$$G = 10 \log_{10} \frac{P_0}{P_i} \quad (14)$$

其中,  $P_i$  为对消前的干扰总功率,  $P_0$  为对消后的剩余干扰功率.

需要指出的是,横向滤波器阶数的选择影响对消的效果.

实际中,由 Akaike 信息论判据(AIC)<sup>[11]</sup>

$$AIC(l) = (N - 1) \ln R_l^2 + 2l \quad (15)$$

其中  $N$  为序列长度,  $l$  为滤波器阶数,  $R_l^2$  为  $l$  阶的拟合的残余方差,满足等式(15)最小时的  $l$  为滤波器的最佳阶数.分析表明,最优阶数与干扰带宽占总带宽的比值有关.

### 4 仿真实验

超视距雷达发射信号为 LFM 连续波,假设中心频率 10MHz,带宽  $B = 12.8 \text{ kHz}$ ,时宽  $T = 10 \text{ ms}$ ,采样频率 25.6MHz,干扰位于  $[0.8, 0.9]$  倍带宽处,占总带宽的 10%,功率设为

40dB, 远大于接收机的内部噪声, 故可不考虑白噪声的影响。仿真时, 空域采用常规 DBF, 所有脉压过程中均作了频域 Hamming 加权。

图 3(a) 给出了凹口滤波器零陷后的 LFM 信号不连续频谱, 该谱中被挖除频带占总带宽的 10%, 相应的脉压输出最大副瓣达 -17dB。而且, 挖除宽度加大时, 副瓣性能急剧恶化, 图 3(b) 示意了在某一固定位置零陷时, 最大副瓣电平随零陷宽度的变化情况。

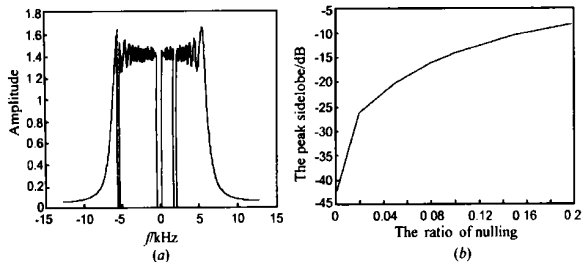


图 3 凹口滤波后的 LFM 信号间断频谱  
及最大旁瓣电平随零陷宽度的变化

图 4 比较了凹口滤波、投影法及自适应对消器三种方法的脉压输出。可见, 自适应对消器的最大旁瓣相对于凹口滤波法改善了 18dB, 比投影算法改善了 9dB, 与理想无干扰时 -42dB 只相差 8dB。自适应对消前后信号

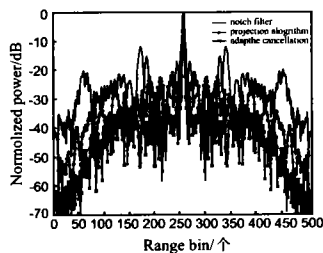


图 4 三种方法的脉压输出比较

号加干扰剩余的功率谱比较示于图 5, 比较可见, 占一定带宽的强干扰已被自适应对消器对消了, 在计算量增加的同时, 其对消效果是很明显的, 从而大大降低了检测门限。

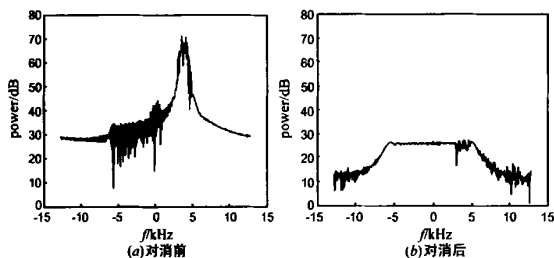


图 5 自适应对消前后信号加干扰剩余的功率谱

分析可知, 凹口滤波零陷干扰的同时, 信号也被滤去, 得到的是间断的信号谱, 而投影法和自适应对消器在滤除旁瓣干扰的同时, 保持了信号谱的连续性, 因此副瓣电平得到降低。而且, 自适应对消方法相对于投影法而言, 做了自适应加权, 计算量增加的同时, 抑制效果更好是可以预期的, 仿真结果与分析结论相一致。

## 5 结论

本文讨论了超视距雷达中窄带干扰抑制的几种方法, 并对它们的优缺点进行了分析比较, 得出以下结论:

(1) 直接凹口滤波零陷法虽然简单, 但脉压输出的副瓣很高, 而且零陷的宽度严重影响了旁瓣性能。

(2) 投影算法能在抑制旁瓣干扰的同时, 保持信号谱的连续性。由于未进行权值计算, 计算量较小, 但要设计子带滤波器组, 其暂态响应使投影矩阵不能最大程度地抑制掉干扰。

(3) 自适应对消法通过实时地计算权值, 计算量有所增加, 但只要选择合适的滤波器阶数, 即可很好地对消掉带内的旁瓣干扰, 脉压后的副瓣大大降低, 有效地降低了检测门限, 或者说, 这种方法应用在恶劣的干扰环境中带宽可以放宽。

需要指出的是, 如果干扰方向与信号方向一致, 即对于主瓣方向的干扰, 两路接收数据相减时, 干扰也被减掉, 无法提取干扰信号矢量。因此本文提的两种方法对于主瓣干扰不适用, 对主瓣干扰的抑制我们已在另文中加以详述。

## 参考文献:

- [1] J M Headrick, J F Thomason. Application of high frequency radar [J]. Radio Science, 1998, 33(4): 1045- 1054.
- [2] J M Headrick, M I Skolnik. Over the horizon radar in the HF band [J]. Proceeding of the IEEE, 1974, 62(6): 664- 673.
- [3] E Ferraro, D Garter. Cold war to counter drug [J]. Microwave Journal, 1998, 41(3): 82- 92.
- [4] J R Bamum. Ship detection with high resolution HF skywave radar [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1986, 11(2): 196- 209.
- [5] G A Fabrizio, S J Anderson. Adaptive cancellation of nonstationary interference in HF antenna arrays [J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 1998, 145(1): 19- 24.
- [6] J David, R Kramer, Jr Ronald, T Williams. High frequency atmospheric noise mitigation [A]. 1994 IEEE National Radar Conference [C]. USA: IEEE, 1994.
- [7] Khan R H, Mitchell D. Waveform analysis for high frequency FMCW radar [J]. IEE Proc. F, 1991, 138(5): 411- 419.
- [8] S D Green, S P Kingsley. Improving the range/time sidelobes of large bandwidth discontinuous spectra HF radar waveforms [J]. IEE Conference Publication Proceedings of the 7th International Conference on HF Radio System and Techniques, 1997, (7): 246- 250.
- [9] 程云鹏, 张凯院, 徐仲. 矩阵论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989.
- [10] B Widrow, S D Stearns. Adaptive signal processing [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1985.
- [11] H Akaike. A bayesian extension of the minimum AIC procedure of autoregressive model fitting [J]. Biometrika, 1979, 66(1): 237- 241.

## 作者简介:



杨志群 男, 1972 年 1 月生于江苏泰兴, 1999 年获南京电子工程研究中心硕士学位, 现为南京理工大学博士研究生, 主要研究方向阵列信号处理、干扰抑制、多载频雷达等。E-mail: yyangzq@163.com