

# 高频雷达射频干扰自适应对消

陈志群, 权太范, 赵淑清  
(哈尔滨工业大学 338 信箱, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 针对高频雷达中存在的射频干扰空间结构非平稳特性, Fabrizio 提出了一种干扰抑制方法. 然而, 该方法忽视了对目标信号相干积累的影响. 本文分析了这种影响, 在此基础上提出了一种新型的天线方向图综合算法, 并进一步将其应用到射频干扰自适应对消中. 仿真结果表明本文的方法较大地改善了高频雷达的工作性能.

关键词: 高频雷达; 干扰抑制; 天线方向图综合

中图分类号: TN958.93 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2001) 10-1439-03

## The Adaptive Cancellation of RFI in HF Radar

CHEN Zhi-qun, QUAN Tai-fan, ZHAO Shu-qing  
(P. O. Box 338, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: For the existing nonstationary spatial characteristics of radio frequency interference (RFI) in high frequency (HF) radar, Fabrizio came up with an interference rejection method. Nevertheless, the method ignored its side effects on the coherent integration of target signals. This effect is analyzed in this paper. On the basis of the analysis a novel array pattern synthesis algorithm is proposed and further applied to the adaptive interference cancellation in HF radar. Simulation results show that the performance of HF radar is greatly improved.

Key words: HF radar; interference rejection; array pattern synthesis

### 1 引言

随着通信和广播事业的飞速发展, 高频波段 (3 ~ 30MHz) 变得日益拥挤, 高频雷达经常不得不工作在强干扰环境中, 其工作性能受到严重影响. 因此射频干扰的抑制就成了一个亟待解决的问题, 然而射频干扰空间结构的非平稳特性<sup>[1]</sup>却给射频干扰的对消带来了极大的困难.

针对射频干扰空间结构的非平稳特性, Fabrizio 提出了一种自适应的干扰抑制方法<sup>[1]</sup>. 该方法将一个相干积累周期 (CIT) 划分为若干个较小的时间段, 如果分段合理的话, 那么可以近似地认为在这些时间段上干扰的空间结构是不变的. 经过上述近似处理后, 在每个时间段内分别应用采样矩阵求逆 (SMI) 算法求得当前最优的天线阵元加权矢量, 并用来处理该时间段上的接收数据. 该方法的不足之处在于忽视了对从非视在方向进入天线阵列的目标信号产生的不必要的调制, 从而较大地影响了目标信号的相干积累.

本文首先分析了 Fabrizio 方法对目标信号相干积累的影响. 然后基于分析所得出的结论, 构造了一种天线方向图综合方法以兼顾射频干扰的抑制和目标信号的相干积累. 最后, 本文给出了计算机仿真结果.

### 2 数学模型

高频雷达采用了线性调频连续波信号, 一个相干处理周

期由  $T$  个脉冲重复周期组成, 一个脉冲重复周期内有  $K$  个距离采样. 考虑一个  $N$  元均匀线性天线阵列,  $L$  个窄带信号 (包括目标信号和射频干扰信号) 同时进入天线阵列, 那么在第  $t$  个重复周期的第  $k$  个距离采样上的阵列快拍可以写成

$$x_k(t) = A s_k(t) + n_k(t), t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (1)$$

式中  $A = (a^{(1)} \ a^{(2)} \ \dots \ a^{(L)})$ ,  $a^{(l)}$  表示第  $l$  个信号的方向矢量, 且  $a^{(l)} = (1 \ e^{-j \theta_l} \ \dots \ e^{-j(N-1)\theta_l})^T, l = 1, \dots, L, \cdot^T$  表示转置. 而  $\theta_l = 2\pi (d/\lambda) \sin \theta_l$ , 其中  $d$  表示天线阵元间距,  $\lambda$  表示天线阵列的工作波长,  $\theta_l$  表示第  $l$  个信号来波方向与天线阵列法线的夹角.  $s_k(t)$  表示信号矢量, 且  $s_k(t) = (s_k^1(t) \ s_k^2(t) \ \dots \ s_k^L(t))^T$ .  $n_k(t)$  表示噪声矢量, 且  $n_k(t) = (n_k^1(t) \ n_k^2(t) \ \dots \ n_k^N(t))^T$ .

### 3 Fabrizio 方法对目标信号相干积累影响的分析

为了适应射频干扰空间结构的变化, 假设将整个 CIT 分成了  $p$  段, 且第  $p$  段中包含  $q_p$  个脉冲重复周期. 不失一般性, 对于任意一个目标信号而言, 假设其对应方向的天线增益为  $g_p$ , 并将整个 CIT 上的采样写成矢量形式为  $v$ , 经过天线阵列处理后的输出矢量为  $v$ , 那么二者之间有如下关系

$$v = \begin{pmatrix} g_1 & \dots & g_1 & \backslash & g_2 & \dots & g_2 & \backslash & \dots & \backslash & g_p & \dots & g_p \end{pmatrix}^T v = g \ v$$

式中  $\cdot$  表示点乘.

为了简便起见,假设随机变量  $g_p$  同分布,且均值为  $\bar{g}$ ,则增益误差矢量可以表示为

$$g = g - \bar{g} \times \mathbf{1}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$= \mathbf{B}$$

式中  $\mathbf{1}_{TK \times 1} = (1 \dots 1)^T$ . 假设  $\tilde{g}$  为增益误差矢量  $g$  的离散付立叶变换,且随机变量  $p$  的方差为  $\sigma^2$ ,由帕塞瓦尔定理可知

$$E\{\tilde{g}^H \tilde{g}\} = \frac{1}{TK} E\{\mathbf{B}^H \mathbf{B}\} = \sigma^2 \quad (2)$$

式中  $E\{\cdot\}$  表示数学期望,  $\cdot^H$  表示共轭转置.

由式(2)可以看出,在一个 CRT 的不同分段内采用不同的天线阵元加权矢量对目标信号相干积累的影响与目标信号方向处天线增益的方差成正比.

### 4 改进的射频干扰自适应对消方法

基于上述分析,问题的关键在于如何兼顾射频干扰的抑制和目标信号的相干积累. 天线方向图综合方法可以提供这样的灵活性,但是要求知道射频干扰的方位. 为了避免发生所谓的自抑制现象<sup>[2]</sup>,射频干扰的方位可以由第  $p$  个分段的前半部分数据,即  $x_k(t), t = 1, \dots, q_p, k = 1, \dots, K/2$ ,通过空间谱估计算法,例如 MUSIC 算法<sup>[3]</sup>求得. 由于已有的一些天线方向图综合方法<sup>[4~6]</sup>不能解决上述问题,因此下面将构造一种合乎实际要求的新方法.

综上所述,问题可以描述为求约束干扰方向的天线增益为零,并使天线方向图与目标天线方向图的加权均方差积分最小的最优天线阵元加权矢量,即

$$W_{opt} = \min_{C^H W = 0} \frac{1}{2} \int w(\theta) |G(\theta) - D(\theta)|^2 d\theta \quad (3)$$

式中  $w(\theta)$  为一非负的加权函数,用来控制不同区域内天线方向图与目标天线方向图之间的相似程度;天线方向图  $G(\theta) = W^H a(\theta)$ ,  $W$  为对应的天线阵元加权矢量;目标天线方向图  $D(\theta) = W_d^H a(\theta)$ ,  $W_d$  为对应的天线阵元加权矢量,约束矩阵  $C = (a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_l))$ ,  $a(\theta_i)$  表示受约束的方向矢量.

令目标函数

$$O = W^H C + \frac{1}{2} \int w(\theta) |G(\theta) - D(\theta)|^2 d\theta \quad (4)$$

式中  $\lambda$  表示拉格朗日加权矢量,且  $\lambda = (\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_l)^T$ .

进一步将式(4)改写为

$$O = W^H ZW - 2\text{Re}\{\lambda^H ZW_d\} + W^H C + c$$

式中常数  $c = \frac{1}{2} \int w(\theta) |D(\theta)|^2 d\theta$ ,

$$Z = \frac{1}{2} \int w(\theta) a(\theta) a^H(\theta) d\theta \quad (5)$$

令  $\frac{\partial O}{\partial W} = 0$ ,并与约束条件联立可求得天线阵元最优加权矢量

$$W_{opt} = W_d - Z^{-1} C (C^H Z^{-1} C)^{-1} C^H W_d \quad (6)$$

式中  $Z^{-1}$  表示逆矩阵.

矩阵  $Z$  是非奇异的,可以用反证法来证明这一点.

证明:假设  $|Z| = 0$ ,  $|Z|$  表示矩阵的行列式,那么方程组  $ZW = 0$  应该有非零解,在方程组两边的左端分别乘上  $W^H$ ,则有

$$W^H ZW = 0$$

将式(5)代入上式,那么

$$W^H ZW = \frac{1}{2} \int w(\theta) |W^H a(\theta)|^2 d\theta = 0$$

因此就有  $W^H a(\theta) = 0$ ,这与  $W$  是非零解矛盾. 证毕.

由于矩阵  $Z$  是非奇异的,而矩阵  $C$  为列满秩矩阵,矩阵  $C^H Z^{-1} C$  显然也是非奇异的,因此式(6)的最优解是存在的.

最后,将所得天线阵元最优加权矢量应用于第  $p$  个分段的后半部分数据,就可以在抑制射频干扰的同时,减小对目标信号相干积累的影响了.

### 5 计算机仿真结果与分析

在高频雷达的实测数据中,在多普勒谱的 37Hz 处有一个射频干扰,另外在 20Hz 处加入了一个人造的目标信号. 常规波束、Fabrizio 方法和改进的射频干扰自适应对消方法的处理结果分别如图 1 的点划线、短划线和实线所示. 由于改进的方法充分考虑了目标信号相干积累的因素,因此与其它两种方法相比,输出信号干扰噪声比有较大程度改善,大量的仿真结果证实了这一点.

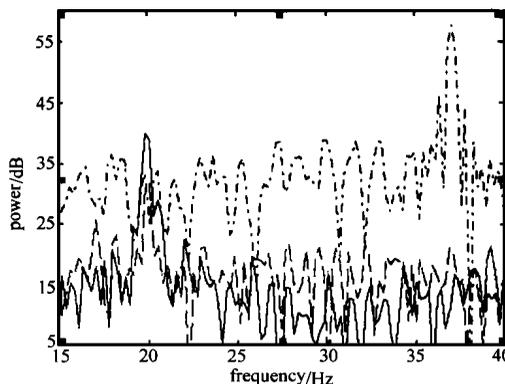


图 1 多普勒谱

### 6 结论

本文分析了 Fabrizio 方法对目标信号相干积累的影响,得出了其影响与目标信号方向处的天线增益的方差成正比的结论. 基于上述结论,本文进一步提出了一种天线方向图综合新算法. 该算法在设置零陷的同时,能够约束综合所得天线方向图与目标天线方向图的加权均方差积分最小. 最后本文将该算法应用到高频雷达的射频干扰自适应对消中,计算机仿真

结果表明,与 Fabrizio 方法相比获得了较大的性能改善.

#### 参考文献:

- [ 1 ] G A Fabrizio , Y I Abramovich , et al. Adaptive cancellation of nonstationary interference in HF antenna arrays [ J ] . IEE Proc. Radar Sonar Navig. , 1998 , 145 ( 1 ) : 19 - 24 .
- [ 2 ] Y I Abramovich , V N Mikhaylyuvov , I P Malyavin. Test of interference stationarity in adaptive filtering systems [ J ] . Sov. J. Commun. Technol. Electron. , 1992 , 37 ( 3 ) : 1 - 10 .
- [ 3 ] R O Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation [ J ] . IEEE Trans. on AP , 1986 , 34 ( 3 ) : 276 - 280 .
- [ 4 ] M J Buckley. Synthesis of shaped beam antenna patterns using implicitly constrained current elements [ J ] . IEEE Trans. on AP , 1996 : 192 - 197 .
- [ 5 ] R Verscovo. Constrained and unconstrained synthesis of array factor for circular arrays [ J ] . IEEE Trans. on AP , 1995 : 1405 - 1410 .

- [ 6 ] S L Sim , M H Er. Constrained optimization technique for general array pattern synthesis [ J ] . Electron. Letters , 1996 , ( 10 ) : 861 - 862 .

#### 作者简介:



陈志群 男. 1974 年 11 月出生于湖南邵阳县. 哈尔滨工业大学电子工程技术研究所博士研究生. 感兴趣的研究方向为阵列信号处理、数字信号处理、数字波束形成和自适应信号处理等.

权太范 男. 1949 年出生于吉林省. 教授, 博士生导师, 哈尔滨工业大学电子工程技术研究所副所长. 感兴趣的研究方向为近代信号处理、多目标跟踪、神经网络、模糊推理和数据融合等.

## 电子学报

2001 年第 10 期 Acta Electronica Sinica No. 10 2001

(总期 212 期) (Monthly) (Series No. 212)

|       |                            |   |
|-------|----------------------------|---|
| 主办单位  | 中国电子学会                     | Published by the Chinese Institute of Electronics , Beijing                               |
| 协办单位  | 中国计算机报社                    | China Infoworld   |
| 编辑    | 《电子学报》编辑委员会                | Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica                                      |
| 主编    | 王守觉                        | Chief Editor : Wang Shoujue   |
| 总编辑   | 刘力                         | Director : Liu Li   |
| 通信处   | 北京 165 信箱<br>(邮政编码 100036) | Editorial Office of Acta Electronica Sinica ( P. O. Box 165 ,<br>Beijing 100036 , China ) |
| 电话    | (010) 68279116 , 68285082  | Tel 86-10-68279116 , 68285082   |
| 传真    | (010) 68173796             | Fax 86-10-68173796  |
| 排版印刷  | 中国纺织印刷厂                    | Printed by Textile Printinghouse , China  |
| 国内总发行 | 北京市报刊发行局                   | Distributed by<br>Domestic : Beijing Baokan Faxingju , China                              |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司                | Foreign : China International Book Trading Corporation                                    |
| 国内订购处 | 全国各邮电局                     | Subscription Office — All Local Post Offices in China                                     |

国际标准刊号 : ISSN 0372 - 2112 国内统一刊号 : CN11 - 2087 / TN 邮发代号 (国内 / 国外) : 2 - 891 / M436  
国内定价 20.00