

圆柱型阵机载雷达杂波抑制新方法

谢文冲^{①②} 王永良^②

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(空军雷达学院雷达兵器运用工程军队重点实验室 武汉 430019)

摘要: 圆柱型阵天线相对于常规的平面阵天线具有空间全方位扫描、搜索跟踪方式灵活和波束方向性好等优点。该文首先从圆柱型阵机载雷达杂波协方差矩阵特征值分布和杂波功率谱距离向分布两个方面分析了圆柱型阵列与均匀平面阵列之间的区别,得到杂波功率谱随距离变化的结论。然后根据圆柱型阵机载雷达杂波分布特点提出了两种不同的杂波抑制方法,它们能够很好地解决圆柱型阵机载雷达杂波距离向分布非均匀的问题。最后通过仿真实验验证了该文方法的正确性。

关键词: 圆柱型阵天线; 机载雷达; 杂波抑制; 空域角频移; 协方差矩阵加权

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2371-04

New Clutter Suppression Methods for Airborne Radar with Cylindrical Array Antennas

Xie Wen-chong^{①②} Wang Yong-liang^②

^①(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

^②(Key Research Lab, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Cylindrical array antennas have three merits relative to common planar array antennas such as all-orientation space scanning, flexible search and track mode and good beam bearing etc. In this paper, firstly the differences between cylindrical array and uniform planar array are discussed in terms of eigenvalue distribution of the clutter covariance matrix and clutter distribution at range, and the conclusion of space-time clutter spectrum's nonhomogeneity at range for airborne radar with cylindrical array antennas is gained. Secondly two different clutter suppression methods are proposed according to the clutter characteristic of airborne radar with cylindrical array antennas, which can resolve the problem of clutter spectrum's nonhomogeneity at range. Finally, the simulation results verify the correctness of the proposed methods.

Key words: Cylindrical array antennas; Airborne radar; Clutter suppression; Space angular frequency shift; Covariance Matrix Taper (CMT)

1 引言

机载相控阵雷达受到世界上许多国家的高度重视,现已成为雷达界的一个重点研究方向,其主要原因是在相控阵体制下可采用先进的空时二维自适应处理(STAP)杂波抑制技术,从而使未来新一代的机载雷达具有更加优越的性能。相对于常规的平面阵天线,圆柱型相控阵天线具有以下 3 个方面的优势: (1)空间 360° 扫描; (2)搜索跟踪方式灵活; (3)波束方向性好。因此,圆柱型相控阵天线技术在机载雷达中的应用将是未来机载雷达发展的一个重要趋势。圆柱型相控阵机载雷达与常规平面阵机载雷达的主要区别在于其杂波功率谱随距离的变化而变化,各个距离门的回波数据不是独立同分布的,在近程区域尤其严重。因此对于圆柱型相控阵机

载雷达,常规的统计型 STAP 方法不再适用。文献[1, 2]提出采用随距离变化的自适应权矢量方法来解决圆柱型阵机载雷达杂波非均匀问题,但是该方法处理的一个前提条件是假设自适应权值是距离的线性函数,而实际情况并非如此,因此这种方法的杂波抑制性能较差。

本文首先介绍了机载圆柱型相控阵天线的工作原理,然后分别从杂波协方差矩阵特征值分布和杂波功率谱距离向分布两个方面对圆柱型阵列与均匀平面阵列之间的区别进行了分析和比较,得到圆柱型相控阵天线机载雷达杂波功率谱随距离变化的结论。最后,本文根据圆柱型相控阵机载雷达杂波分布的特点提出了空域角频移法和 SMI_{CMT} 法,并通过仿真实验证明了其有效性。

2 圆柱型阵天线

2.1 阵列模型

假设圆柱型天线每一列由 M 个阵元组成,在圆柱体的

2006-03-17 收到, 2006-08-14 改回

国家部级基金和教育部高等院校青年教师教学科研奖励计划 (TRA POYT)资助课题

每个圆周上均匀分布着 P 个阵元。圆柱型天线的模型如图 1(a)所示,其列内、列间阵元间距均为半个波长,载体沿着 Y 轴正向方向以速度 v 匀速运动,波束指向的方位角为 θ ,俯仰角为 φ ,锥角为 ψ 。通常,考虑到相控阵雷达设备和处理的复杂性,一般先将 P 个列子阵进行微波合成。图 1(a)所示的圆柱型阵列经过列子阵合成后可以等效成一个圆周上均匀分布着 P 个阵元的圆阵,如图 1(b)所示,圆周的半径为 R 。

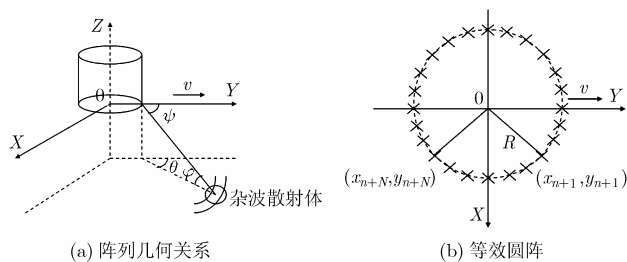


图 1 圆柱型相控阵天线示意图

2.2 圆柱型阵机载雷达工作原理

在任意工作时刻,圆柱型阵天线仅选取圆周上的 N 个相邻阵元,即仅有 M 行, N 列阵元进行工作。在下一时刻利用有源相控阵天线技术实现阵元选择,即去掉第 $n+1$ 个阵元,接入第 $n+N+1$ 个阵元,这样便可以实现 360° 的空域扫描。如果圆周上均匀分布着 P 个阵元,则某一时刻 N 个相邻阵元的相扫范围仅需达到 $(-360^\circ/2P, 360^\circ/2P)$ 即可。对于 P 的选取应该注意:如果选得过小,则波束扫描间距将偏大,对波束指向的控制带来困难。如果选得过大,在波长一定的情况下又会造成圆周半径太大,带来许多实际的困难,因此 P 的选取应该适中。假设 $P=36$,则任意时刻 N 个阵元的所需相扫范围仅为 $(-5^\circ, 5^\circ)$,在这样小的相扫范围内阵列容易保持良好的方向性。

3 圆柱型阵机载雷达杂波特性

圆柱型天线的杂波在空时二维平面(即 $(2f_d/f_r, \cos\psi)$,其中 f_d 表示杂波多普勒频率, f_r 表示雷达脉冲重复频率)上的分布特性与平面阵天线基本相同。这是因为在空时二维平面上的杂波分布特性关键取决于杂波多普勒频率与锥角余弦之间的关系。对于任意分布的阵列,其杂波功率谱在空时二维平面上的分布特性与阵列内部阵元的相对位置无关,仅与整个阵面波束指向与载体飞行速度方向之间的关系有关。下面重点从杂波特征值分布特性和杂波谱距离向分布特性两个方面比较圆柱型天线与平面阵天线之间的区别。

3.1 杂波特征值分布特性

对天线阵列回波的杂波协方差矩阵进行特征分解,可以得到杂波特征值的分布情况(特征值按照从大到小顺序排列)。图 2 给出了 3 种不同阵面放置情况下平面阵和圆柱型阵杂波特征值的分布情况。杂波协方差矩阵的大特征值个数对应于杂波自由度,杂波自由度越小,进行杂波抑制所需的

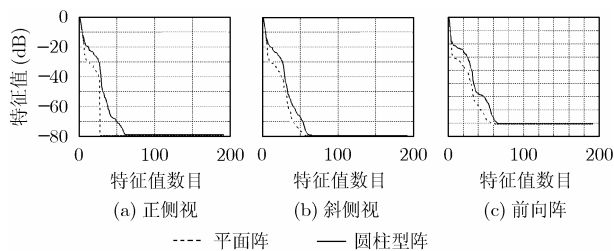


图 2 杂波特征值分布情况

系统自由度也就越小。从图 2 中可以看出,圆柱型阵杂波自由度大于平面阵的杂波自由度,在正侧视情况相差较多,斜侧视和前向阵情况则基本相同。因此,在同样的阵列放置情况下,对圆柱型阵列的接收杂波进行抑制需要更多的系统自由度,尤其是在正侧视情况。需要指出的是在斜侧视和前向阵时平面阵与圆柱型阵杂波大特征值个数虽然基本相同,但圆柱型阵杂波大特征值的幅度值要更大一些。

3.2 杂波功率谱距离向分布特性

本节中比较平面阵天线和圆柱型天线的杂波功率谱在距离向的分布情况,如图 3 所示。这里以阵列正侧视放置为例进行说明,图中给出的是杂波协方差矩阵的对角线元素在 $(2f_d/f_r, \cos\psi)$ 平面上的分布随距离变化的情况。图 3 给出了波束指向 50km, 100km, 200km 和 400km 4 种情况。从图中可以看出,平面阵天线的杂波功率谱在距离向没有任何变化,而圆柱型天线的杂波功率谱在距离向的分布则是不相同的,在近程区域变化较快,远程变化较缓慢,这主要是由于圆柱型阵列经过微波合成后的圆弧型阵列并不是在一直线上分布的缘故。与常规的平面阵天线相比表现在阵列的空域导向矢量的数学表达式的不同,其中圆柱型阵列的空域导向矢量表达式为

$$\mathbf{S}(\psi) = \left\{ \begin{aligned} & \exp \left[j2\pi \frac{1}{\lambda} (x_1 \sin\theta \cos\varphi + y_1 \cos\theta \cos\varphi) \right] \\ & \exp \left[j2\pi \frac{1}{\lambda} (x_2 \sin\theta \cos\varphi + y_2 \cos\theta \cos\varphi) \right] \\ & \dots \exp \left[j2\pi \frac{1}{\lambda} (x_N \sin\theta \cos\varphi + y_N \cos\theta \cos\varphi) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

圆柱型阵天线的杂波功率谱在距离上的分布不同造成了距离向回波数据的非均匀性,即不满足独立同分布(I.I.D)的条件。传统的空时自适应算法是通过估计待检测距离单元的杂

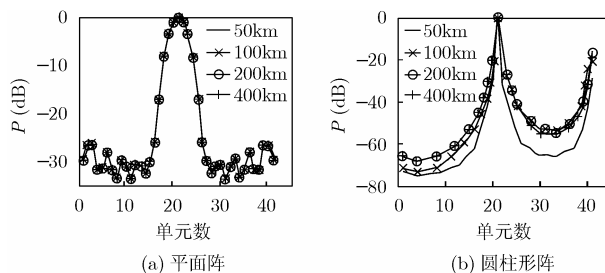


图 3 杂波功率谱距离向分布图

波协方差矩阵来形成自适应权值来实现杂波抑制的, 杂波协方差矩阵由邻近距离门的回波数据估计得到, 这些距离门的回波数据必须与待检测样本是独立同分布的。圆柱型阵列天线在近程区域, 由于非均匀性比较严重, 常规的统计型 STAP 方法不再适用。注意到造成这种非均匀性的根本原因在于圆柱型阵的特殊阵列流型, 其非均匀表现形式与常规的功率非均匀以及由于干扰目标、孤立干扰等造成的样本非均匀不同, 因此常规非均匀 STAP 算法在圆柱型阵列情况下不再有效。

4 杂波抑制方法

假设 \bar{r}_i 表示某距离环的第 i 个距离单元的回波强度, N_c 表示某距离环所包含的距离单元数, \mathbf{S}_i 表示第 i 个距离单元的空时二维导向矢量, K 表示一次相干处理时间内的脉冲数, λ 表示雷达工作波长, f_r 表示雷达脉冲重复频率, 则圆柱型阵列某距离环的杂波回波信号为

$$\mathbf{X}_c = \sum_{i=1}^{N_c} \bar{r}_i \mathbf{S}_i \quad (2)$$

其中 $\mathbf{S}_i = \mathbf{S}_{i1} \otimes \mathbf{S}_{i2}$, \otimes 表示 Kronecker 积, $\mathbf{S}_{i1} = [1 \ e^{jw_{i1}} \ \dots \ e^{j(K-1)w_{i1}}]^T$, $w_{i1} = \frac{4\pi v}{\lambda f_r} \cos \theta_i \cos \varphi$, $\mathbf{S}_{i2} = [e^{jw_{i2}1} \ e^{jw_{i2}2} \ \dots \ e^{jw_{i2}N_c}]^T$, $w_{i2} = \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta_i \cos \varphi + y_n \cos \theta_i \cos \varphi)$ 。对于均匀线阵, 其空域角频率 $w_{\sin p} = \frac{2\pi}{\lambda} (n-1)d \cos \theta_i \cos \varphi$ 。可以看出圆柱型阵列(用 C 代表)与均匀线阵(用 p 代表)回波信号的主要区别在于空域角频率的不同, 这也是圆柱型阵列杂波谱在距离向产生非均匀现象的本质所在。下面分别从两个方面来考虑圆柱型阵列的杂波抑制问题。

4.1 空域角频移补偿法

本节参考机载非正侧面阵雷达中多普勒频移预处理技术的思路^[3], 提出一种空域角频移补偿法。其基本思想是: 首先以均匀线性阵列在波束指向处的空域角频率值为基准, 对圆柱型阵列各个距离单元的回波数据进行补偿, 对消掉回波中由于阵列配置造成的空域角频率的不同部分, 然后再利用常规 STAP 方法进行杂波抑制。假设圆柱型阵列天线的主波束指向的方位角为 θ_0 , 对某个距离单元回波进行补偿时的空域角频率补偿量为

$$w_{s0_n} = w_{s0_n c} - w_{s0_n p} \quad (3)$$

则该距离单元的回波补偿因子为

$$\mathbf{T}_1 = \text{diag}(\mathbf{S}_s) \otimes \mathbf{I}_N \quad (4)$$

其中 $\mathbf{S}_s = [e^{jw_{s0_1}} \ e^{jw_{s0_2}} \ \dots \ e^{jw_{s0_N}}]^T$, \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 维的单位矩阵。经过空域角频率补偿后的回波信号为

$$\mathbf{X}' = \mathbf{T}_1^H \mathbf{X} \quad (5)$$

经过上述空域角频率补偿预处理以后, 由于阵列结构特性而造成的杂波距离向非均匀分布现象将得到一定程度的抑制, 使得各个距离单元的回波数据基本满足独立同分布的条件, 这样便可利用 STAP 算法进行杂波抑制处理。

4.2 SMI_{CMT}法

本节利用协方差矩阵加权(CMT)技术^[4-6]来解决圆柱型阵机载雷达杂波抑制问题, 提出一种新的杂波抑制方法——SMI_{CMT}法, 其自适应权值为

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\text{SMI}_{\text{CMT}}} &= \widehat{\mathbf{R}}_{\text{SMI}_{\text{CMT}}}^{-1} \mathbf{S} \\ &= [\widehat{\mathbf{R}}_{\text{SMI}} \odot \mathbf{T}_2 + \delta \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{S} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\widehat{\mathbf{R}}_{\text{SMI}} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^{2L} X_l X_l^H$, L 表示等效圆型天线所对应的均匀线阵的系统自由度, δ 表示对角加载因子, \mathbf{I} 表示单位矩阵, \mathbf{S} 表示空时二维导向矢量。圆柱型天线对应的协方差矩阵加权因子 $\mathbf{T}_2 = (\mathbf{O}_K \otimes \mathbf{S}_s) (\mathbf{O}_K \otimes \mathbf{S}_s)^H$ 代表圆柱型机载雷达杂波距离向的非均匀信息, 其中 $\mathbf{O}_K = \overbrace{[1 \ 1 \ \dots \ 1]^T}^K$, \mathbf{S}_s 表达式同式(4), \odot 表示 Hardamard 积。

5 仿真分析

5.1 参数设置

圆柱型天线每一列均由 16 个等间距的阵元(阵元间距为半波长)组成, 圆柱体的圆周上均匀分布着 P 个阵元, 相邻阵元间的直线距离为半个波长。这里选择 $P = 36$, 则波束跃度为 10° 。其它主要参数如下: 脉冲数 $K = 16$, 脉冲重复频率 $f_r = 2434.8\text{Hz}$, 发射脉冲带宽 $B = 1\text{MHz}$, 载机高度 $H = 8\text{km}$, 载机速度 $v = 140\text{m/s}$, 工作波长 $\lambda = 0.23\text{m}$, 单元输入杂噪比 $\text{CNR} = 60\text{dB}$, 噪声功率为 0dB , 阵元间幅相误差为 2% 。

5.2 杂波抑制性能

本文比较了 4 种方法的杂波抑制性能。Opt法^[7]代表最优处理器, 即利用全部的阵元和脉冲数据进行自适应处理, 它给出了各种自适应处理方法的性能上限。空域角频移法指的是首先经过空域角频移处理然后再利用 3DT方法^[7]进行杂波抑制。常规处理指的是实际中通常采用的时空级联处理法^[7]。图 4 给出了 4 种方法的改善因子性能对比图。纵坐标 IF 表示改善因子, 即输出信杂噪比与输入信杂噪比之比。

本文分别从算法的性能和运算量两个方面进行分析。由图 4 的仿真结果可以看出: 空域角频移法的性能仅次于最优处理器, SMI_{CMT}方法性能比空域角频移法要差一些, 但是

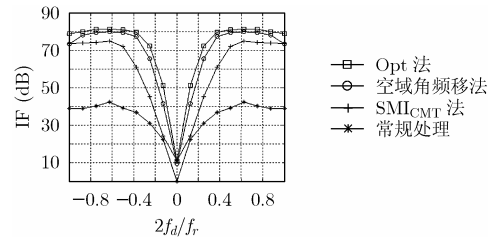


图 4 4 种算法杂波抑制性能比较

相对于常规处理方法其性能还是要好得多。这是因为圆柱型

阵机载雷达杂波特征值相对于平面阵其整个大特征值的幅度值均有不同程度的增加,同时伴有部分小特征值的抬升。因此在未对圆柱型阵机载雷达回波空域角频率进行补偿的情况下,通过 $2L$ 个训练样本来估计主杂波分量存在很大的误差,造成 SMI_{CMT} 方法性能下降。空域角频移法由于首先对各个距离单元的回波进行了补偿,消除了部分杂波非均匀的影响,因此性能要稍好一些。在运算量方面, SMI_{CMT} 方法运算量相对于空域角频移法要小得多,因为空域角频移法需要首先对每个距离单元的回波数据进行补偿,然后再估计杂波协方差矩阵,而 SMI_{CMT} 方法首先估计出协方差矩阵,然后再对矩阵进行加权补偿处理。

6 结束语

圆柱型相控阵天线相对于平面阵天线具有 360° 空域覆盖,搜索跟踪方式灵活和波束方向性好等优点。本文首先从杂波协方差矩阵特征值的分布和杂波功率谱距离向的分布两个方面分析了圆柱型阵列与均匀平面阵列之间的区别,得到杂波功率谱随距离变化的结论。最后,根据圆柱型相控阵机载雷达杂波分布的特点提出了两种不同的杂波抑制方法,经过仿真得到其能够消除非均匀杂波的影响,实现对运动目标的检测。

参 考 文 献

- [1] Zatman M. Circular array STAP [A]. IEEE National Radar Conference, Boston, MA, 1999: 108-113.
 - [2] Zatman M. Circular array STAP [J]. *IEEE Trans. on AES*, 2000, 36(2): 510-517.
 - [3] Borsari G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array [A]. IEEE National Radar Conference, Dallas, TX, 1998: 135-140.
 - [4] Guerci J R. Theory and application of covariance matrix tapers for robust adaptive beamforming [J]. *IEEE Trans. on SP*, 1999, 47(4): 977-986.
 - [5] Guerci J R. Space-Time Adaptive Processing for Radar [M]. Boston: Artech House, 2003: 151-156.
 - [6] Guerci J R and Bergin J S. Principle components, covariance matrix tapers, and the subspace leakage problem [J]. *IEEE Trans. on AES*, 2002, 38(1): 152-162.
 - [7] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 133-143.
Wang Yongliang and Peng Yingning. Space-Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 133-143.
- 谢文冲: 男, 1978 年生, 助教, 博士生, 研究方向为空时二维信号处理及 SAR 成像。
王永良: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事空时信号处理、阵列信号处理和自适应信号处理等领域的研究。