

文章编号:1004-9037(2013)02-0123-06

辅助天线配置对自适应旁瓣对消系统性能的影响

邱朝阳¹ 刘铭湖² 饶妮妮² 徐国公² 蒋浩² 王宇翔¹ 郝志梅¹

(1. 中国航空工业集团公司雷达与电子设备研究院, 无锡, 214063;

2. 电子科技大学生物医学工程系, 成都, 610054)

摘要:为了研究辅助天线配置方法对机载相控阵雷达中自适应旁瓣对消系统性能的影响,设计了独立阵元、子阵面和阵元组合等辅助天线配置方案。仿真实验结果表明,在大多数辅助天线配置方案下,对消系统性能都比较好,无明显差别。只有当辅助天线在同一行或同一列时,对消系统性能严重下降;采用单个阵元作为辅助天线比采用多个阵元组合成辅助天线的方法更具有优势,对消系统的干扰抑制效果也更好。因此,在机载相控阵雷达中,建议不要将某一行或某一列配置为辅助天线,尽可能采用单个阵元作为辅助天线。

关键词:自适应旁瓣对消;辅助天线;天线配置;机载相控阵雷达

中图分类号:TN911.7

文献标志码:A

Effect of Allocation of Auxiliary Antenna on Performance of Adaptive Sidelobe Canceller

Qiu Chaoyang¹, Liu Minghu², Rao Nini², Xu Guogong²,
Jiang Hao², Wang Yuxiang¹, Hao Zhimei¹

(1. Radar and Avionics Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, 214063, China;

2. Department of Biomedical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

Abstract: The allocation approaches of auxiliary antenna based on the independent array elements, sub-array region and array element combination are designed for studying the impact of allocation of auxiliary antenna on the performance of adaptive sidelobe canceller in air-borne phased array radar. Results show that the performance of cancellers are good and there are no obvious differences in most of the proposed allocation approaches. The performance of canceller is seriously deteriorated when the auxiliary antenna are allocated in the same row or column. The auxiliary antenna based on single array elements have better interference suppression effect than those based on multiple array element combination. Therefore, the auxiliary antenna should be avoided allocating in one row or one column and be constructed using single array elements as many as possible.

Key words: adaptive sidelobe canceller; auxiliary antenna; antenna allocation; airborne phased array radar

引 言

在机载雷达所面临的干扰中,比较难以解决的是有源干扰。解决这种有源干扰的一个有效方法是采用自适应旁瓣对消技术^[1-2]。自适应旁瓣对消

技术是当存在有源干扰时,自适应地修正辅助天线的权值,使干扰信号输出功率最小,即在方向图上表现为在干扰到达的方向上形成零点,从而抑制旁瓣的干扰。

理论上自适应旁瓣对消系统可以实现比较理想的干扰对消,但在机载雷达的实际应用中,由于

存在通道噪声、时延带宽积、带宽不一致、中心频率不一致、幅度相位特性差异、主天线旁瓣敏感性以及辅助天线选择等诸多因素影响,使其对消效果明显下降^[3-4]。目前,已经有大量针对上述影响因素对对消系统性能影响的研究^[5-7]。然而,有关辅助天线选择对自适应旁瓣对消系统性能影响的研究报道较少,仅有的报道大多偏向于定性讨论^[8-9]。在大型面阵的自适应旁瓣对消系统中,辅助天线主要从阵列中抽取部分阵元组成,不需要设置独立的辅助天线,因此,讨论辅助天线配置对自适应旁瓣对消系统性能的影响是十分必要的。

本文系统全面地设计了几种辅助天线配置方案,分析和研究了各种配置方案对自适应旁瓣对消系统性能的影响。通过仿真实验验证本文方法的可行性和有效性,并试图找出最优的辅助天线配置方法,并排除一部分对消效果较差的辅助天线配置方法。

1 自适应旁瓣对消的基本原理

基于自适应旁瓣对消的相控阵雷达天线阵元按照一定规则可以分为主阵和子阵。假设 $\mathbf{d}(t)$ 表示 t 时刻机载雷达主天线接收的信号采样电压, $\mathbf{X}(t)$ 表示 t 时刻辅助天线接收的采样电压向量,且辅助天线数为 N , \mathbf{W} 表示自适应旁瓣对消系统的最优权矢量,则辅助通道上信号由最优权矢值加权求和后与主通道信号相减,得到系统的对消输出为

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (1)$$

式中 H 表示向量或者矩阵的共轭转置。式(1)表明,自适应旁瓣对消器通过自适应调节辅助天线的权矢量使主、辅通道对消后干扰的输出功率最小。在最小均方误差(Minimum mean square error, MMSE)准则下,计算最优权矢量的方法为^[10-11]

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_X^{-1} \mathbf{r}_{Xd} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_X = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_{Xd} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{d}^*(t)]$$

再考虑一个含有 $M \times N$ 个阵元(M 行和 N 列)的天线面阵。阵元在行和列方向均等间隔放置,间距为 d , 并设 $d = \frac{\lambda}{2}$ (λ 为工作波长)。对于从 (θ, ϕ) 方向入射的源信号,其导向矩阵 $\mathbf{b}(\theta, \phi)$ 为

$$\mathbf{b}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\tau_X} & \dots & e^{j\tau_X(N-1)} \\ e^{j\tau_Y} & e^{j\tau_X + \tau_Y} & \dots & e^{j\tau_X(N-1) + \tau_Y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j\tau_Y(M-1)} & e^{j\tau_X + \tau_Y(M-1)} & \dots & e^{j\tau_X(N-1) + \tau_Y(M-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: θ 为方位角, ϕ 为高低角, $\tau_X = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\phi) \cdot \cos(\theta)$, $\tau_Y = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\phi)$ 。

为方便后面的计算,本文将矩阵 $\mathbf{b}(\theta, \phi)$ 的所有列依次排成一列,得到一个新的向量^[9],即

$$\mathbf{a}_{\theta, \phi} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\{-j[\tau_Y]\} \\ \vdots \\ \exp\{-j[\tau_Y(M-1)]\} \\ \exp\{-j[\tau_X]\} \\ \exp\{-j[\tau_X + \tau_Y]\} \\ \vdots \\ \exp\{-j[\tau_X + \tau_Y(M-1)]\} \\ \vdots \\ \exp\{-j[\tau_X(N-1)]\} \\ \exp\{-j[\tau_X(N-1) + \tau_Y]\} \\ \vdots \\ \exp\{-j[\tau_X(N-1) + \tau_Y(M-1)]\} \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设期望信号 $s_0(t)$ 从 (θ_0, ϕ_0) 方向入射, 干扰信号 $s_i(t)$ ($i=1, \dots, K-1$) 从 (θ_i, ϕ_i) 方向入射, 则第 k 个阵元接收到的信号为

$$x_k(t) = \sum_{i=0}^{K-1} s_i(t) a_{\theta_i, \phi_i}(k) + n_k(t) \quad (6)$$

式中: $k=1, \dots, MN$; $n_k(t)$ 为阵列噪声。整个阵列接收到的信号可表示为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{x} \quad (7)$$

对于主天线通道, \mathbf{W} 的值全部取 1, 辅助天线通道 \mathbf{W} 的值通过最小均方自适应算法调节。

2 辅助天线配置方法设计

2.1 多个独立阵元组成的辅助天线

对于一个 M 行和 N 列的矩形天线阵列, 假设辅助天线由多个独立阵元组成。为了研究辅助天线在不同排列形式及位置变化时对自适应旁瓣对消系统性能的影响, 本文设计了 19 种辅助天线配置方案, 如图 1 所示, 其中 M 和 N 均为 21。

在图 1(a~f) 中, 每一幅图中具有相同符号的阵元代表一种辅助天线位置的配置情况, 未加标示符号的其他阵元则通过线性叠加组合成为主天线。其中, 图 1(a) 包含了 3 种辅助天线的配置情况。每一种辅助天线由 8 个独立阵元组成, 分别用符号“*”“o”和“Δ”表示。3 种辅助天线将阵列中点围

在中间,其差别在于距离阵列中点的距离不同。在图 1(b)中,每一种辅助天线由 9 个排列成一行的独立阵元组成,分别用符号“*”“o”和“Δ”表示。3 种辅助天线的差别在于距离阵列中线的距离不同。在图 1(c)中,“Δ”点组成的辅助天线位置与图 1(b)中“Δ”点的辅助天线位置相似,它们的区别在于是否将阵列中点设为辅助天线。“*”点和“o”点组成的辅助天线排成四边形,对称地分布在阵列中线两边,只是离中线的距离不同。在图 1(d)中,“Δ”点和“*”点组成的辅助天线都来自阵列的对角线,二者的区别是“Δ”点组成的辅助天线包含阵列中点,而“*”点的不包含阵列中点。“o”点组成的辅助天线排列成三角形的形状。在图 1(e)中,组成 3 种辅助天线的独立阵元位置都是随机分布,只是“o”

点组成的辅助天线离阵列中心比较远,而“Δ”点和“*”点组成的辅助天线离阵列中心比较近,且“Δ”点组成的辅助天线包含阵列中心,而“*”点不包含阵列中心。图 1(f)配置有 4 种辅助天线。一种配置方案是由“*”和“Δ”点的 8 个独立阵元分别组成两种不包含阵列中点的辅助天线;另一种配置方案是由“*”和“Δ”点的 8 个独立阵元分别组成两种包含阵列中点的辅助天线。因此,后两种辅助天线是由 9 个独立阵元组成。图 1(f)中辅助天线的阵元是按十字形排列的,“Δ”点阵元排在阵列的垂直和水平线上,而“*”阵元排列在阵列的对角线上,这两种是否包含阵列中心的辅助天线配置具有比较的价值。因此,图 1 包含了 19 种辅助天线的配置方案。

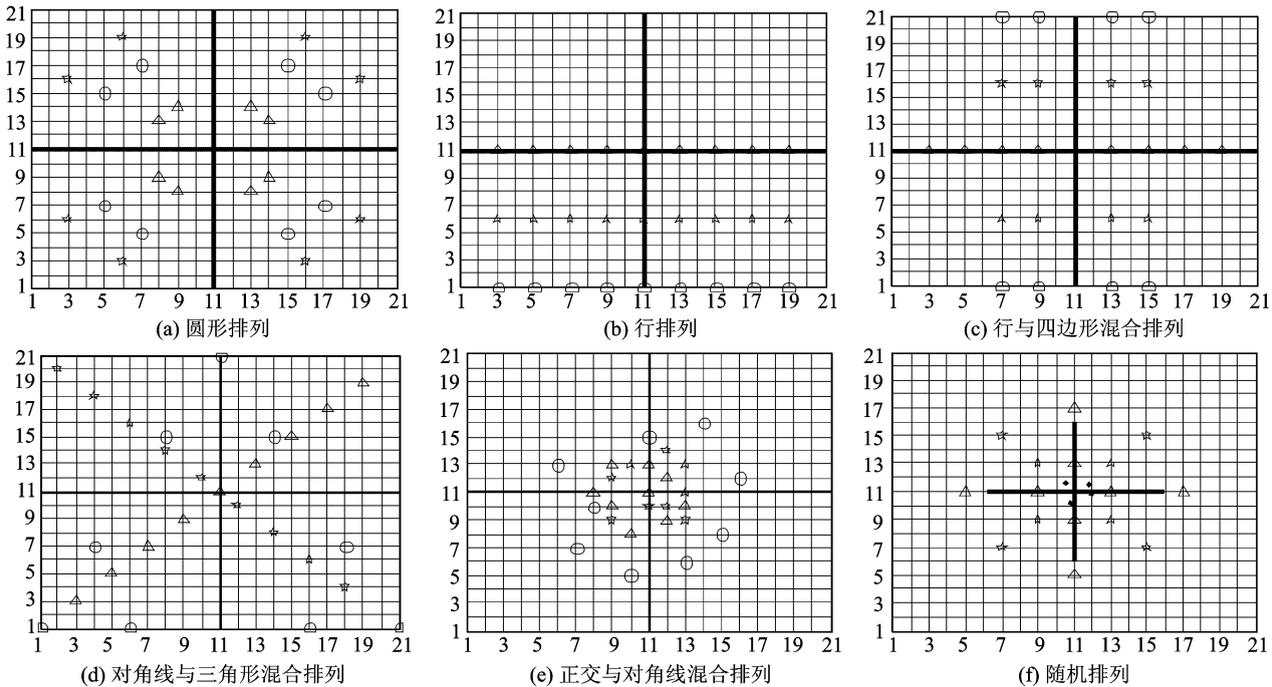


图 1 独立阵元组成的辅助天线配置方案

2.2 子阵面和阵元组成的辅助天线

将一个 M 行和 N 列的阵面分为 N 个子阵面。当取 $M=N=8$ 时,8 个子阵面的划分方法按图 2(a)所示,从中任意选取 2~3 个子阵面作为辅助天线。在一个 M 行和 N 列天线阵面的上下左右各选一组阵元(如 7~9 个阵元)组合来组成 4 个辅助天线,配置方案示意图如图 2(b)所示。

3 仿真实验与结果分析

3.1 多个独立阵元组成的辅助天线

对 19 种不同的辅助天线配置方案分别进行仿

真,分析辅助天线位置变化对对消系统性能的影响。本实验中,设信噪比 $SNR=0$ dB,干信比(Jam to signal ratio, JSR)从 30~45 dB 变化,以雷达抗干扰改善因子(ECCM improvement factor, EIF)

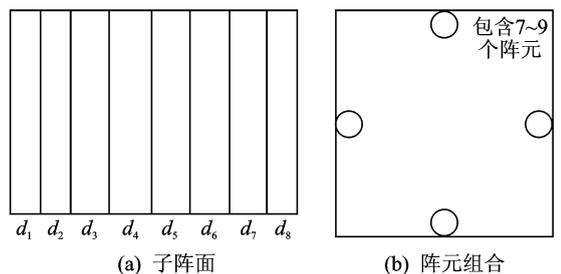


图 2 采用子阵面和多个阵元组合组成辅助天线的示意图

作为衡量系统性能好坏的指标。图 3 为 19 种不同辅助天线配置方案下的对消系统性能。其中,图 3(a)是图 1(a, b, c)的仿真结果;图 3(b)是图 1(d, e, f)的仿真结果。

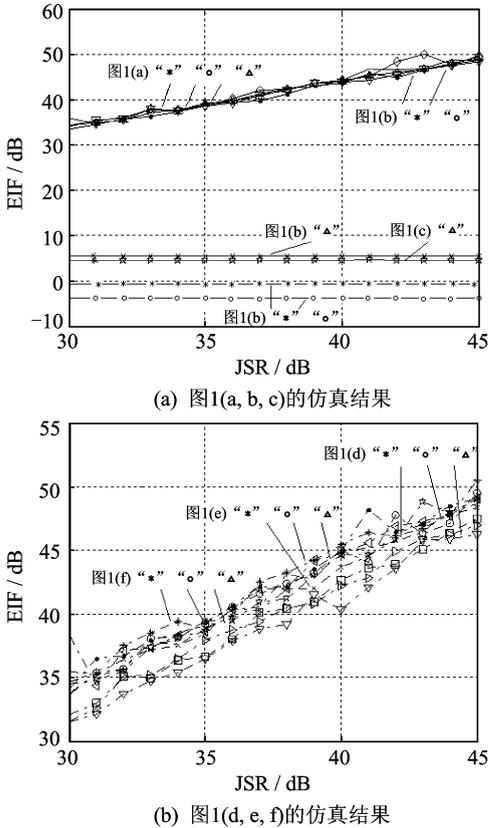


图 3 不同辅助天线配置方案下,对消系统 EIF 随 JSR 的变化

从图 3 中可以看出,图 1(b)中 3 种辅助天线配置方案和图 1(c)中“ Δ ”阵元表示的辅助天线配置方案下的 EIF 特别小。因此,在配置辅助天线时应避免出现图 1(b)和图 1(c)中“ Δ ”阵元表示的辅助天线配置情况。进一步分析图 1 的辅助天线配置方案后发现,图 1(b)和图 1(c)中“ Δ ”点组成的辅助天线都有一个共同点,即这些辅助天线的阵元都排列在阵列的某一行或一列上。这是因为一行或一列的辅助天线排列方式会导致各个辅助天线之间的相关性增强,而使各个辅助天线与主天线之间的相关性减弱,因而导致对消系统的对消效果变差。同时还发现,在图 1(d, e, f)(9 个阵元)中“ $*$ ”阵元组成的辅助天线方案下,对消系统性能略比其他辅助天线配置方案差。

从上述实验结果可知,在选配辅助天线时,只有极少数配置方案才会使对消系统的性能严重下降,大多配置方案下对消系统都能很好地对消干

扰。只要在选择辅助天线时避免出现所有的辅助天线出现在阵列的同一行或者同一列,就不会出现对消系统性能严重下降的情况。除此之外,面阵中的辅助天线不管阵列中点是否被围在中间,还是分布在阵列的对角线上,不管是配置成某一特定的形状(如三角形或者十字形),还是随机地分布在阵列中点的周围,对自适应旁瓣对消系统的对消性能都没有十分明显的影响。

3.2 子阵面组成的辅助天线

在本实验中,假设期望信号从天线法向进入,信噪比为 0 dB,有一个干扰从($90^\circ, 40^\circ$)入射,干噪比从 30 dB 变化到 45 dB,分别选取图 2(a)中的第 2,7,1,8 以及第 4,5 个子阵面作为辅助天线。在此实验条件下对消系统的 EIF 随输入干噪比变化曲线如图 4 所示。

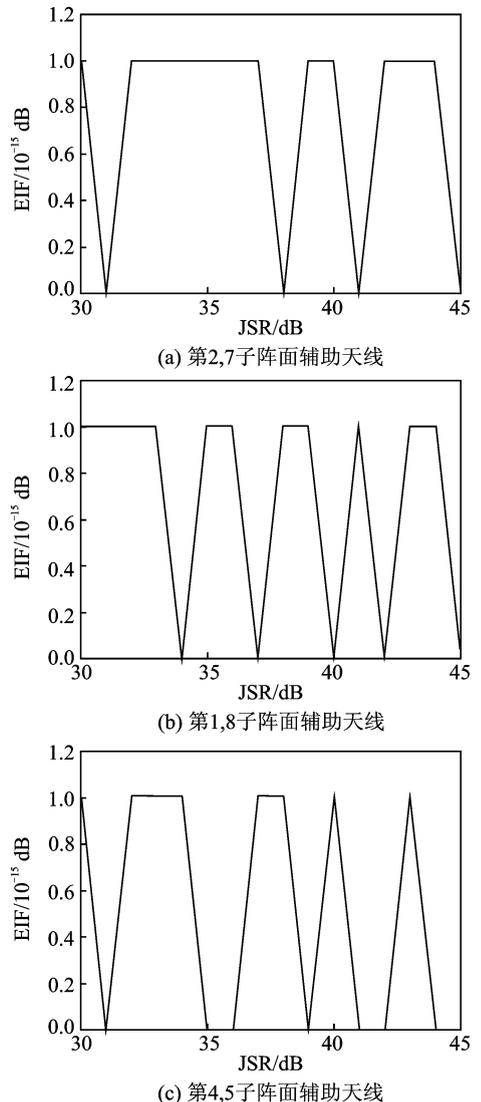
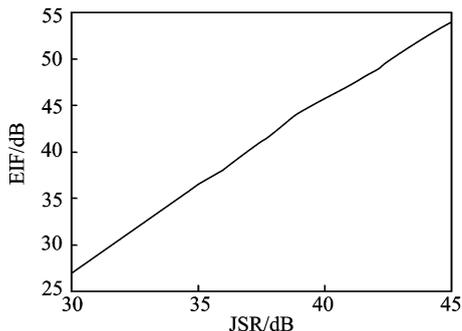


图 4 采用子阵面方法得到的对消系统 EIF 随输入 JNR 的变化

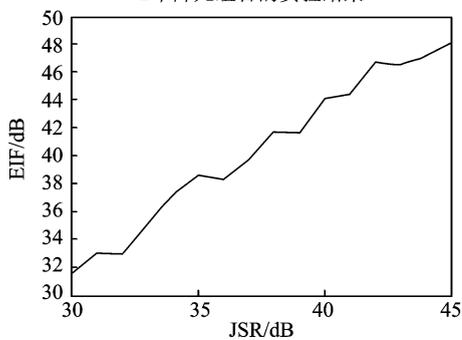
选取第2和7,第1和8以及第4和5个子阵面作为辅助天线的实验结果分别如图4(a,b,c)所示。从图4的结果可以看到,无论输入干噪比多大,对消系统的EIF数值都非常小,在 10^{-15} 数量级。因此,按图2(a)所示将阵面分为几个子阵面,再取其中的2~3个子阵面作为辅助天线的配置方法没有应用价值,对消系统的对消效果非常差。

3.3 阵元组合组成的辅助天线

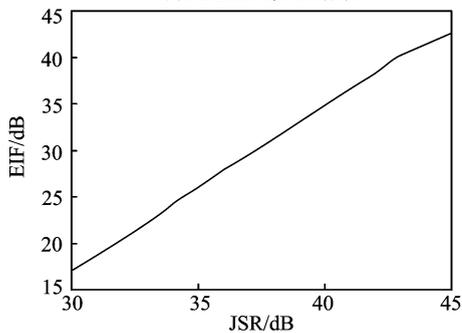
在本实验中,假设期望信号从天线法向进入,信噪比SNR为0 dB;3个干扰分别从 $(90^\circ, 40^\circ)$, $(50^\circ, 50^\circ)$ 和 $(150^\circ, 60^\circ)$ 3个不同的角度入射,干噪比JNR从30 dB变化到45 dB,在此实验条件下得到对消系统EIF随输入干噪比JNR变化的曲线,如图5所示。其中,图5(a)为在一个8行和8列天



(a) 8行8列天线阵面上下左右选取2个阵元组合的实验结果



(b) 21行21列天线阵面选取2个阵元组合的实验结果



(c) 21行21列天线阵面选取9个阵元组合的实验结果

图5 多阵元组合辅助天线得到的系统EIF与输入干噪比之间的关系

线阵面的上下左右分别选取2个阵元组合来组成4个辅助天线的实验结果;图5(b)为在一个21行和21列天线阵面的上下左右分别选取2个阵元组合来组成4个辅助天线的实验结果;图5(c)为在一个21行和21列天线阵面的上下左右分别选取9个阵元组合来组成4个辅助天线的实验结果。

从图5可以看到,3种阵元组合下的对消系统EIF均随着输入干噪比的增加而增大。在图5(a)中,当输入干噪比为30 dB时,EIF已经超过了25 dB,且EIF随着输入干噪比的增加而增大,在这种辅助天线配置方案下,对消系统的性能能够满足实际机载相控阵雷达的要求;在图5(b)中,当输入干噪比为30 dB时,EIF已经超过了30 dB,且EIF随着输入干噪比的增加而增大,同理,这种辅助天线配置方案也具有实际应用价值。对比分析图5(a)和图5(b)后可发现,在上下左右分别取两个阵元组合成4个辅助天线时,21×21阵列的对消效果要比8×8阵列的对消效果好。因此,阵列规模越大,则对消效果越好;在图5(c)中,当输入干噪比约为32 dB时,EIF能够超过20 dB,且EIF随着输入干噪比的增加而增大,在这种辅助天线配置方案下,对消系统的性能也能够满足实际需要。将图5(b,c)以及图3(b)对比分析后发现,在同样的阵元规模下用9个阵元组合的辅助天线的对消效果比用2个阵元组合的辅助天线的对消效果差,而用2个阵元组合辅助天线的对消效果又要比用单个阵元作为辅助天线的对消效果差。换句话说,采用单个阵元作为辅助天线要比采用多个阵元组合来组成辅助天线的方法更具有优势,同时对消系统的干扰抑制效果也更好。因此,每一个辅助天线中包含的阵元数越少越好,但不得少于1个阵元。

4 结束语

本文通过理论分析和仿真实验,研究了各种辅助天线配置方法对自适应旁瓣对消系统性能的影响。仿真结果表明,在本文建议的大多数辅助天线配置下,对消系统的对消性能都比较好,没有十分明显的差别,能够满足机载雷达系统的技术指标要求。只有当辅助天线在同一行或者同一列时,对消性能严重下降。因此,建议尽量不要将某一行或者某一列设为辅助天线。由于本文发现了几种对消效果非常差的辅助天线位置配置情况,只要在工程实现的时候避开这几种情况就可以得到理想的对消效果。此外,采用单个阵元作为辅助天线要比采

用多个阵元组合成辅助天线的方法更有优势,对消系统的干扰抑制效果也更好。因此,本文的研究对工程上机载相控阵雷达辅助天线的配置具有指导意义。

参考文献:

- [1] Yang Zhaocheng, De Lamare R C, Li Xiang. L1 regularized STAP algorithm with a generalized sidelobe canceler architecture for airborne radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(99): 329-332.
- [2] 胡可欣,胡爱明. 自适应旁瓣对消在雷达中的应用[J]. 火控雷达技术, 2006, 35(2): 42-45.
Hu Kexin, Hu Aiming. Application of adaptive sidelobe canceling in radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2006, 35(2): 42-45.
- [3] 保铮. 自适应天线旁瓣相消的几个主要问题[J]. 西北电讯工程学院学报, 1980, 7(2): 1-7.
Bao Zheng. Several main problems of adaptive sidelobe canceling [J]. Journal of Xidian University, 1980, 7(2): 1-7.
- [4] 余非,范文江,张青苗,等. 自适应旁瓣对消性能分析与仿真[J]. 舰船电子对抗, 2011, 34(3): 20-22.
Yu Fei, Fan Wenjiang, Zhang Qingmiao, et al. Analysis and simulation of adaptive side lobe cancellation performance[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(3): 20-22.
- [5] 林育梅,李明. 通道均衡对自适应旁瓣相消性能影响的研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(9): 70-73.
Lin Yumei, Li Ming. Study on influence of channel equalization to SLC performance[J]. Modern Radar, 2007, 29(9): 70-73.
- [6] 冉小凤. 自适应旁瓣对消系统的对抗性能研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
Ran Xiaofeng. Study on countermeasure performance of adaptive side-lobe cancellation system[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2011.
- [7] 王鼎,李长胜,吴瑛. 基于辅助阵元的阵元位置误差和信源方位联合估计算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(5): 567-575.
- Wang Ding, Li Changsheng, Wu Ying. Sensor position errors and direction of arrival joint estimation algorithm based on instrumental sensors[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(5): 567-575.
- [8] 沈福民,保铮. 自适应天线旁瓣相消系统辅助天线放置的研究[J]. 西北电讯工程学院学报, 1984(1): 1-12.
Shen Fumin, Bao Zheng. The exploration of the auxiliary antenna position in the adaptive antenna sidelobe cancellation system[J]. Journal of Xidian University, 1984(1): 1-12.
- [9] 苏保伟,王永良,周良柱. 辅助天线不同排列形式及位置变化对 SLC 影响[J]. 信号处理, 2005, 21(S1): 69-72.
Su Baowei, Wang Yongliang, Zhou Liangzhu. Impact of auxiliary antenna position and array geometries on sidelobe cancellation[J]. Signal Processing, 2005, 21(S1): 69-72.
- [10] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974, 10(6): 853-863.
- [11] Widrow B, Glover Jr J R, Mccool J M, et al. Adaptive noise cancelling; Principles and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63(12): 1692-1716.
- 作者简介:**邱朝阳(1963-),女,研究员,研究方向:机载雷达系统;刘铭湖(1986-),男,硕士研究生,研究方向:空时二维信号处理;饶妮妮(1963-),女,教授,研究方向:信号与信息处理及应用, E-mail: Raonn@ uestc. edu. cn;徐国公(1987-),男,硕士研究生,研究方向:信号与图像处理;蒋浩(1989-),男,硕士研究生,研究方向:空时二维信号处理;王宇翔(1977-),男,硕士研究生,研究方向:机载雷达信号处理;郝志梅(1972-),女,高级工程师,研究方向:机载雷达信号与数据处理。

