

文章编号: 1001 - 893X(2010)08 - 0121 - 04

副瓣对消技术在抑制雷达间电磁干扰中的应用*

李圭源, 张 厚, 徐海洋

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:为了更好地抑制地面雷达之间的电磁干扰,通过与随队干扰的干扰样式进行对比,得出了雷达间电磁干扰信号主要通过天线副瓣耦合进入接收机的特点,并在此基础上将副瓣对消技术引入到抑制雷达间电磁干扰中,分析了副瓣对消的基本原理,并采用相关器和增益放大器来自动调整权系数。最后对副瓣对消技术的抗干扰效能进行了验证,实验结果表明:采用副瓣对消技术后的雷达抗干扰效能提高了 20.1 dB,可以有效地抑制雷达间电磁干扰。

关键词:地面防空雷达;电磁干扰;副瓣对消;抗干扰效能

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.025

Application of Sidelobe Cancellation in Interference Suppression between Radars

LI Gui - yuan , ZHANG Hou , XU Hai - yang

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: In order to better suppress the electromagnetic interference(EMI) between ground radars, escort jamming mode is compared, the characteristic of EMI signal coupling to receiver by antenna sidelobe is deduced, sidelobe cancellation is applied in suppressing the EMI between radars, the principle of sidelobe cancellation is analysed, and the weight coefficients are adjusted adaptively by correlator and gain amplifier. Finally, the anti - interference effectiveness of sidelobe cancellation is validated. Experiment results indicate that the anti - interference effectiveness is improved about 20.1dB, and sidelobe cancellation can suppress the EMI between radars effectively.

Key words: ground air defense radar; electromagnetic interference(EMI); sidelobe cancellation; anti - interference effectiveness

1 引言

随着电磁环境的日益复杂,电子设备总会受到各种各样的干扰。当在一个相对有限的区域内大量使用雷达这种大功率电子设备时,相互之间必然存在干扰^[1-2],轻则会降低雷达系统的某些战术性能,重则造成雷达系统的瘫痪,因此,需要对雷达间的电磁干扰进行有效抑制,确保雷达能够正常工作。目前,国内外学者在雷达间电磁干扰的分析和预测中

提出了许多新的思路和分析方法^[1-5],但是如何对雷达间存在的干扰进行有效抑制则鲜见报道。因此,本文针对雷达间电磁干扰的特点,采用副瓣对消技术抑制雷达间电磁干扰,并通过实验验证了其有效性。

2 雷达间电磁干扰特点分析

为分析问题方便起见,将雷达间电磁干扰与随队干扰相比来说明其特点。图 1 所示为随队干扰示

* 收稿日期:2010 - 04 - 19;修回日期:2010 - 06 - 10

意图。可以看出,干扰机位于目标附近,略领先于目标,通过辐射强干扰信号掩护目标。随队干扰信号既可以从雷达天线主瓣进入雷达接收机(此时不能分辨干扰机与目标),也可以从雷达副瓣进入接收机(此时能够分辨开干扰机与目标)。图2所示为雷达间电磁干扰示意图。通过对比可以看出,雷达间干扰与随队干扰有相同之处,即两种干扰的目标一样,均为空中目标,目标与干扰源都不在一个载体之上,存在一定的夹角。然而,对于地面防空雷达来说,它的主要任务是对空中目标进行搜索、定位以及跟踪。经过计算,两部地面搜索雷达主波束对准(方位面和俯仰面均对准)的概率为 1.7×10^{-7} ,即天线主瓣接收到干扰的概率是非常低的^[5]。可知,地面防空雷达间干扰信号主要通过天线副瓣耦合进入接收机。因此,采用副瓣对消技术理论上会较好地抵消雷达间的干扰。

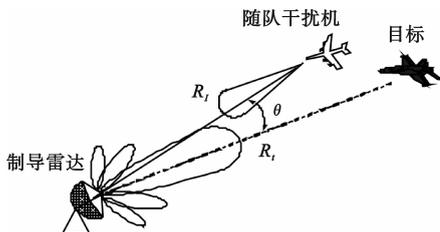


图1 随队干扰示意图
Fig.1 Escort jammer

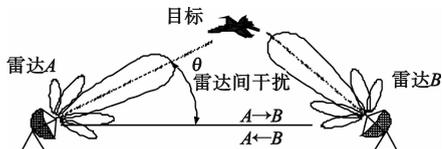


图2 雷达间干扰示意图
Fig.2 Interference between radars

3 副瓣对消技术抑制雷达间电磁干扰

3.1 对消原理^[6-8]

副瓣对消系统由一个主天线和多个辅助天线组成,辅助天线的个数取决于系统期望对消的干扰个数,通常 N 个辅助天线可以对消 N 个从空间不同方向入射的干扰。主天线接收的信号包括主波束内的目标信号和从天线副瓣进入系统的干扰信号。辅助天线同样接收目标回波和干扰信号,但其增益在主天线主波束方向上小于主天线的增益,在副瓣区其增益大于主天线的副瓣增益。理想情况下,辅助天线在主波束方向上形成零点,在干扰方向上形成主

波束可以获得最佳的对消性能,同时不会对目标信号产生相消。在一定性能准则下,即自适应代价函数,通过对辅助天线输出进行加权,然后和主天线输出进行相减可以达到抑制副瓣干扰的目的。

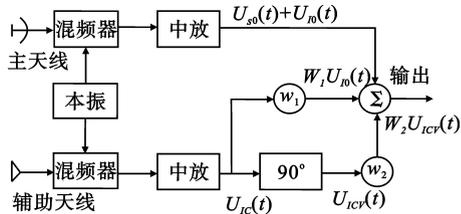


图3 自适应对消原理图
Fig.3 Adaptive sidelobe cancellation principle

如图3所示,主天线接收到的信号,包括回波 $U_{s0}(t)$ 和干扰 $U_{i0}(t)$ 经过接收机处理后送到相加器,副天线接收到的信号分成互相正交的两路: $U_{IC}(t)$ 和 $U_{ICV}(t)$,分别经 W_1 和 W_2 加权后,也送到相加器,3个信号相加的矢量和作为输出信号。适当调节 W_1 和 W_2 的值,使

$$U_{I\Sigma}(t) = U_{i0}(t) + W_1 U_{IC}(t) + W_2 U_{ICV}(t) = 0 \quad (1)$$

就可将主天线和辅助天线接收的干扰对消掉,它们之间的矢量关系如图4所示。

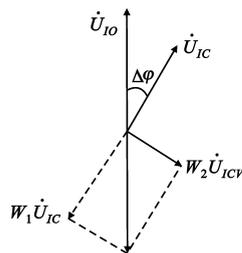


图4 自适应对消矢量关系
Fig.4 Adaptive sidelobe cancellation vectorgraph

设辅助天线与主天线接收到的干扰信号幅度比为 a ,相位差为 $\Delta\varphi$,即 $\dot{U}_{IC} = a\dot{U}_{i0}e^{-j\Delta\varphi}$,则根据矢量关系可求得当 $W_1 = -\cos\Delta\varphi/a$, $W_2 = \sin\Delta\varphi/a$ 时, $U_{I\Sigma} = 0$ 。由于天线是随目标运动而转动的,辅助天线与主天线副瓣所接收的干扰信号的幅度和相位差都在不断地变化,无法用人工控制权系数的方法来实现副瓣对消,因此,必须根据两天线所接收的干扰情况自动地计算和调整 W_1 和 W_2 的值。

3.2 权系数调整实现方案

为了更好地计算和调整权系数,本文采用相关器和增益电控放大器来自动调整 W_1 和 W_2 ,其自适应权系数调整的原理如图5所示。

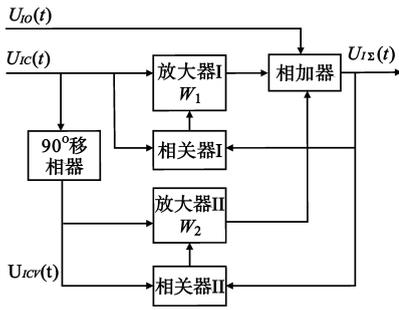


图 5 权系数自动调整原理图

Fig.5 Principle of adaptive weight adjustment

两个增益电控放大器的放大量 W_1 、 W_2 分别正比于相关器 I 和 II 的输出电压,其值分别为

$$\begin{cases} W_1 = K_1 E[U_{IC}(t)U_{I\Sigma}(t)] \\ W_2 = K_2 E[U_{ICV}(t)U_{I\Sigma}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示相关运算, K_1 、 K_2 为比例常数。

由于

$$\begin{cases} E[U_{IC}(t)U_{ICV}(t)] = 0 \\ E[U_{IC}(t)U_{IC}(t)] = \sigma^2 \\ E[U_{ICV}(t)U_{ICV}(t)] = \sigma^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ^2 为干扰分量 $U_{IC}(t)$ 和 $U_{ICV}(t)$ 的方差。

将式(1)和式(3)代入式(2),可得:

$$\begin{cases} W_1 = K_1 E[U_{IC}(t)U_{I0}(t)] / (1 - K_1 \sigma^2) \\ W_2 = K_2 E[U_{ICV}(t)U_{I0}(t)] / (1 - K_2 \sigma^2) \end{cases} \quad (4)$$

在实际应用中,权系数的调整是在没有目标回波信号的扫描回程期间进行的,在扫描正程期间权系数保持不变,副瓣对消系统可进行干扰对消并正常接收目标回波信号。

3.3 抑制雷达间干扰的理论推导及其实验验证

3.3.1 数学推导

这里考虑干扰为雷达间邻近频率干扰,经过接收机后 $U_{I0}(t)$ 、 $U_{IC}(t)$ 和 $U_{ICV}(t)$ 均为窄带随机过程^[8-9]。根据互相关系数的定义可得:

$$\begin{cases} E[U_{IC}(t)U_{I0}(t)] = \sigma\sigma_{I0}\rho_{11} \\ E[U_{ICV}(t)U_{I0}(t)] = \sigma\sigma_{I0}\rho_{12} \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ_{I0}^2 为 $U_{I0}(t)$ 的方差, ρ_{11} 和 ρ_{12} 分别为 $U_{IC}(t)$ 、 $U_{ICV}(t)$ 与 $U_{I0}(t)$ 的互相关系数。

当副、主天线所接收的干扰幅度比为 a , 即 $U_{ICm}(t) = aU_{I0m}(t)$ 时, $\sigma = a\sigma_{I0}$ 。

为分析问题方便起见,不失一般性,考虑一种简单情况,当调整使 $\varphi_{I0}(t) = \varphi_{IC}(t)$ 时, $\rho_{11} = 1$, $\rho_{12} = 0$, 则有:

$$\begin{cases} E[U_{IC}(t)U_{I0}(t)] = \sigma\sigma_{I0} \\ E[U_{ICV}(t)U_{I0}(t)] = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),再代入式(1)可得:

$$\begin{aligned} U_{I\Sigma}(t) &= U_{I0}(t) + \frac{K_1 a \sigma_{I0}^2}{1 - K_1 a^2 \sigma_{I0}^2} U_{IC}(t) = \\ &= U_{I0m}(t) \cos[\omega_i t + \varphi_{I0}(t)] + \\ &= \frac{K_1 a^2 \sigma_{I0}^2}{1 - K_1 a^2 \sigma_{I0}^2} U_{I0m}(t) \cos[\omega_i t + \varphi_{IC}(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

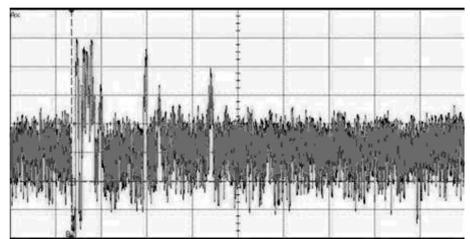
当 $K_1 a^2 \sigma_{I0}^2 \gg 1$ 时, $\frac{K_1 a^2 \sigma_{I0}^2}{1 - K_1 a^2 \sigma_{I0}^2} \approx -1$, 由于

$\varphi_{I0}(t) = \varphi_{IC}(t)$, 所以 $U_{I\Sigma}(t) \approx 0$, 那么此时雷达间干扰可以被对消。

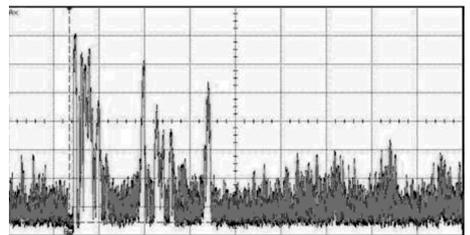
3.3.2 实验验证

以某型地面雷达为实验平台,在该雷达远场架设一台干扰机对其释放瞄准式干扰,雷达天线主瓣对空扫描,天线副瓣对准干扰机方向,通过对数接收机输出到雷达 A 观测其实验效果,调整干扰机输出功率为 500 mW。

经过实验后可以得出结论:在雷达副瓣扫描区存在单一有源干扰的情况下,采用副瓣对消技术后目标回波信噪比改善了 20.1 dB,干扰对消比为 -22.3 dB,信号损失率仅为 -0.8 dB。图 6 所示为采用副瓣对消技术前后目标回波在示波器上显示的图像,可以看出,干扰明显被抑制,而目标回波只有微小损失。



(a)使用副瓣对消技术前



(b)使用副瓣对消技术后

图 6 副瓣对消技术使用前后示波器显示图像

Fig.6 The oscillograms before and after using sidelobe cancellation

4 结束语

本文对副瓣对消技术在抑制雷达间电磁干扰中的应用问题进行了深入分析,对副瓣对消技术的抗干扰性能做了相关实验。实验结果表明:副瓣对消技术防止干扰信号进入雷达天线副瓣的效果明显,能够很好地抑制雷达间电磁干扰。本文的工作对于副瓣对消技术抑制雷达间电磁干扰的系统性分析评估中具有较好的实用性和参考价值。

参考文献:

- [1] 胡皓全,杨显清,赵家升. 雷达之间电磁干扰预测模型研究[J]. 电子科技大学学报,2001,30(1):37-40.
HU Hao-quan, YANG Xian-qing, ZHAO Jia-sheng. Research on Electromagnetic Interference Prediction Model in Radar System[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2001, 30(1): 37-40. (in Chinese)
- [2] 李圭源,张厚,殷雄. 基于作用距离衰减的雷达间电磁兼容模型[J]. 电讯技术,2010,50(3):49-53.
LI Gui-yuan, ZHANG Hou, YIN Xiong. Radar Electromagnetic Compatibility Model Based on Radar Range Attenuation[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(3): 49-53. (in Chinese)
- [3] 赵欣楠,程光伟. 雷达系统间电磁兼容性的计算与预测[J]. 火控雷达技术,2007,36(4):48-51.
ZHAO Xin-nan, CHENG Guang-wei. Prediction and Evaluation of EMC in Radar System[J]. Firepower Control Radar Technology, 2007, 36(4): 48-51. (in Chinese)
- [4] Terry Foreman. Antenna coupling model for radar electromagnetic compatibility analysis [J]. IEEE Transaction on EMC, 1989, 31(1): 85-87.
- [5] 侯民胜. 雷达之间的干扰及概率计算[J]. 雷达与对抗,2006(2):16-18.
HOU Min-sheng. The Analysis of Interference between Radars and the Computation of Interference Probability[J]. Radar and Countermeasure, 2006(2): 16-18. (in Chinese)
- [6] 白渭雄,张文,苗淼. 旁瓣干扰对抗技术研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(1):86-90.
BAI Wei-xiong, ZHANG Wen, MIAO Miao. Study on the Countermeasure Technology against Sidelobe Interference[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1): 86-90. (in Chinese)
- [7] 余继周,陈定昌. 相控阵单脉冲雷达自适应旁瓣对消研究[J]. 航天电子对抗,2005,21(5):4-6.

- YU Ji-zhou, CHEN Ding-chang. Study on Adaptive Sidelobe Cancellation for a Phased Array Monopulse Radar[J]. Spaceflight Countermeasure, 2005, 21(5): 4-6. (in Chinese)
- [8] 张永顺,童宁宁,赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
ZHANG Yong-shun, TONG Ning-ning, ZHAO Guo-qing. Radar Electron Warfare[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
 - [9] 奚玮. 相控阵雷达自适应旁瓣对消效果分析[J]. 现代电子技术,2002(5):3-6.
XI Wei. Effect Analysis of Phased Array Radar with Adaptive Sidelobe Cancellation [J]. Modern Electronic Technique, 2002(5): 3-6. (in Chinese)

作者简介:

李圭源(1983-),男,甘肃庆阳人,2005年获空军航空大学工学学士学位,2008年获解放军信息工程大学军事学硕士学位,现为空军工程大学博士研究生,主要研究方向为雷达系统间电磁兼容、电磁干扰等;

LI Gui-yuan was born in Qingyang, Gansu Province, in 1983. He received the B.S. degree in Aviation University of Air Force and the M.S. degree in Information Engineering University of PLA in 2005 and 2008, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree in Air Force Engineering University. His research concerns radar EMC, EMI, and so on.

Email: kg_liguiyuan@126.com

张厚(1962-),男,河北武安人,分别于1983年、1988年获空军导弹学院学士及硕士学位,于2003年获西安电子科技大学博士学位,现为空军工程大学教授、博士生导师,长期从事天线与电磁兼容领域的研究;

ZHANG Hou was born in Wuan, Hebei Province, in 1962. He received the B.S. degree, the M.S. degree from Air Force Missile Institute and Ph.D. degree from Xidian University in 1983, 1988 and 2003, respectively. He is now a professor and the supervisor of Ph.D. candidate. He is interested in the areas of antenna, electromagnetic compatibility, and so on.

徐海洋(1983-),男,四川广安人,分别于2006年和2009年获空军工程大学工学学士及硕士学位,现为空军工程大学博士研究生,主要从事天线技术及电波传播的应用研究。

XU Hai-yang was born in Guang'an, Sichuan Province, in 1983. He received the B.S. degree and the M.S. degree in Air Force Engineering University in 2006 and 2009, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree in Air Force Engineering University. His research direction is antenna technology.