

射频干扰对消技术在大型舰船平台的应用

杨广超 王建明 伍光新

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 针对大型舰船平台中电磁环境复杂,不同设备之间互相干扰的问题,研究了射频干扰对消技术。分析了射频干扰对消的数学原理、系统模型,并对对消性能与幅度误差、相位误差的关系进行分析。通过分析自适应滤波器的原理,结合大型舰船平台 X 波段雷达的特点,提出了一种射频干扰对消技术。该方案采用最小均方误差(LMS)算法,通过仿真验证了该对消方案算法实现的可行性。仿真结果表明,该射频对消系统的对消比可达 40 dB 左右,能够实现高对消比。

关键词: 射频干扰对消;最小均方误差;自适应滤波;舰船平台

中图分类号: TP391.9; TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.1040

Application of radio frequency interference cancellation technology in large ship platform

Yang Guangchao Wang Jianming Wu Guangxin

(Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Aiming at the problem of complex electromagnetic environment and interference between different devices in large-scale ship platform, the technology of RF interference cancellation is studied. The mathematical principle and system model of RF interference cancellation are analyzed, and the relationship between cancellation performance and amplitude error and phase error is analyzed. By analyzing the principle of adaptive filter and combining the characteristics of X-band radar of large ship platform, a kind of radio frequency interference cancellation technology is proposed. The scheme uses the least mean square error (LMS) algorithm to verify the feasibility of the cancellation scheme. The simulation results show that the cancellation ratio of the RF cancellation system can be up to about 40 dB, and the high cancellation ratio can be achieved.

Keywords: radio frequency interference cancellation; minimum mean square error; adaptive filtering; ship platform

0 引言

随着雷达电子战的发展,现有的舰船上装备了越来越多的雷达、通信以及反干扰设备。不同波段、不同系统的设备在有限的舰船平台上同时工作,使得舰船上的电磁环境极其复杂,不同设备之间相互干扰,尤其是高灵敏度的设备极易受到平台上其他设备的干扰,造成接收机饱和甚至灵敏度下降,为舰船平台内部设备的集成简化提出了挑战,这是发展大型电子平台所亟待解决的问题^[1-2]。

共用平台的射频泄漏问题,会使接收机受到以下几种影响^[3]:1)为了保证接收机不饱和,考虑到泄漏功率相对于目标回波较大,需要保证接收机有足够大的动态范围来处理回波和泄漏功率的加和;2)射频泄漏信号的噪声边带会使接收机降灵,这种噪声边带包括调幅噪声边带和调相噪

声边带;3)当有泄漏功率存在时,机械振动有可能使泄漏信号产生调频边带,形成虚假的多普勒信号,造成误判。

目前所采取的解决措施主要有3种:1)以信号处理为基础的杂波抑制技术^[4],此方法是基于接收信号算法进行处理;2)以收发波形控制为基础的隔离技术^[5-6],此方法大多是基于收发信号通道上的处理;3)以硬件系统架构为基础的射频干扰对消技术^[7],此方法与前2种方法不同,前2种方法注重软件或者算法来实现,比较被动,此方法注重硬件架构来实现,为主动对消抑制。而对于共用平台收发设备之间的干扰,采用杂波抑制和隔离技术作用都比较有限,无法解决进入接收机主频的干扰信号,而射频干扰对消技术可以很好地对消主频干扰和宽带噪声干扰。

本文针对在大型舰船共用平台中,不同设备之间的相互干扰问题,结合射频干扰对消技术的特点,提出了系统方

案,并进行了仿真分析。该方法能够有效地解决大型共用平台的电磁兼容问题,具有工程参考价值。

1 射频频干扰对消技术

1.1 原理分析

射频频干扰对消技术的数学原理是矢量的合成叠加,可将干扰信号比作为直角空间坐标系下的一个矢量,射频频干扰对消技术就是利用一个与该矢量信号有相同特征的等幅反相矢量叠加,进而抵消该干扰信号。数学理论如图1所示,其中干扰矢量为 $\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$,对消矢量为 $\mathbf{b} = b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j}$,其中 \mathbf{i}, \mathbf{j} 分别为坐标平面上 x, y 方向上的单位矢量, \mathbf{c} 为矢量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 的合成矢量。由图1可知,只有当矢量 \mathbf{a}, \mathbf{b} 等幅反相时,其合成矢量 \mathbf{c} 才趋于零。由此可见,干扰对消过程也就是调整对消矢量 \mathbf{b} ,使其与干扰矢量 \mathbf{a} 等幅反相的过程。

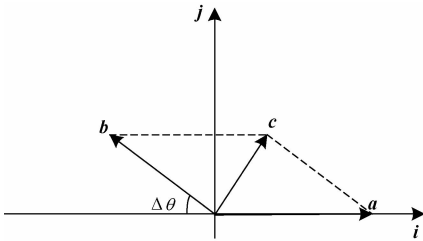


图1 射频频干扰对消数学原理分析

1.2 模型分析

射频频干扰对消的系统模型如图2所示^[8]。其主通道信号 $d(n)$ 不但包括有用信号 $s(n)$,还包括通过耦合或者泄漏进来的干扰信号 $x_0(n)$ 。 $x(n)$ 为参考通道的干扰信号,由于 $x(n)$ 与 $x_0(n)$ 来自同一干扰源,所以两者相关,但两者幅度和到达时间并不相同。对 $x(n)$ 进行加权调整,改变其相位和幅度,得到参考信号 $y(n)$ 。使 $y(n)$ 在某一准则(如最小均方准则、最小二乘准则等)下最近接主通道干扰信号 $x_0(n)$,然后使用加法器使两个通道信号相减,在理想情况下即可将主通道干扰信号 $x_0(n)$ 对消掉,得到目标信号 $s(n)$ 。

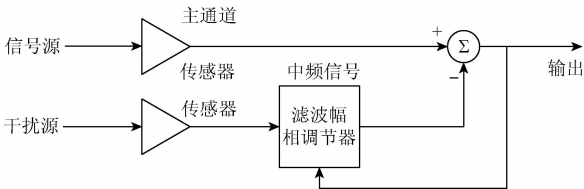


图2 射频频干扰对消系统框图

根据图2可知,误差信号为

$$e(n) = d(n) - y(n) = s(n) + x_0(n) - y(n) \quad (1)$$

将上式平方得:

$$e(n) = s^2(n) + [x_0(n) - y(n)]^2 + 2s(n)[x_0(n) - y(n)] \quad (2)$$

对式(2)求期望,考虑到 $s(n)$ 与 $x_0(n), y(n)$ 不相关,得到:

$$\begin{aligned} E[e(n)] &= E^2[s(n)] + E^2[x_0(n) - y(n)] + \\ 2E\{s(n)[x_0(n) - y(n)]\} &= E^2[s(n)] + E^2[x_0(n) - y(n)] \end{aligned} \quad (3)$$

又因为 $E^2[s(n)]$ 不受滤波器加权值的影响,因此当 $E^2[e(n)]$ 最小时,最小误差的输出功率为:

$$E^2[e(n)]_{\min} = E\min\{[x_0(n) - y(n)]^2\} = E^2[e(n)] + E\min\{[x_0(n) - y(n)]^2\} \quad (4)$$

由式(4)可知, $y(n)$ 为主通道干扰信号 $x_0(n)$ 的最佳均方估计。这表明,在最小均方误差的意义下,系统误差 $e(n)$ 最小,而此时,滤波器输出 $y(n)$ 与主通道干扰信号 $x_0(n)$ 最接近,也就是系统输出误差 $e(n)$ 最接近有用信号 $s(n)$,这使得输出端的信干比大幅度提高。

1.3 对消性能分析

在实际的对消中,参考信号与干扰信号不可能完全同幅反相,即误差信号不可能完全为0。为了进一步分析幅度和相位误差对于对消性能的影响,引入对消比(R_{cancel})的概念,即对消后的剩余误差信号功率与泄漏信号功率之比。假设滤波器输出的参考信号 $y(n)$ 与主通道干扰信号 $x_0(n)$ 的幅度误差为 Δa ,相位误差为 $\Delta\varphi$,则对消比为:

$$R_{cancel} = -20\lg \left| \frac{y(n) - x_0(n)}{x_0(n)} \right| \quad (5)$$

因为 $y(n) = (x_0(n) + \Delta a)e^{j\Delta\varphi}$,则式(5)可以写为:

$$R_{cancel} = -10\lg \left| 1 - 2 \left(1 + \frac{\Delta a}{x_0(n)} \cos(\Delta\varphi) + \left(1 + \frac{\Delta a}{x_0(n)} \right)^2 \right) \right| \quad (6)$$

根据式(6)进行 MATLAB 仿真,可以得到对消比与幅度误差、相位误差三者之间的三维关系,如图3~4所示。

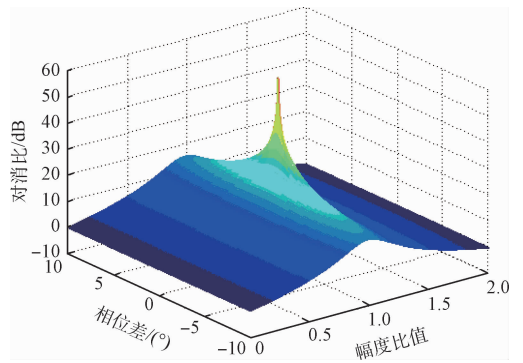


图3 对消比与幅度误差和相位误差的关系

由图3和图4可以看出,对消比对于幅度误差和相位误差的变化非常敏感。幅度误差在 $e_1(n), e_2(n)$ 以内,相位误差在 $\pm 6^\circ$ 以内,对消比才能达到 20 dB 以上;如果要求达到 30 dB,则幅度误差要在 $\pm 10\%$ 以内,相位误差在 $\pm 2^\circ$ 以内。并且所要求的对消比越高,对消矢量的幅度和相位的要求就越苛刻^[9]。

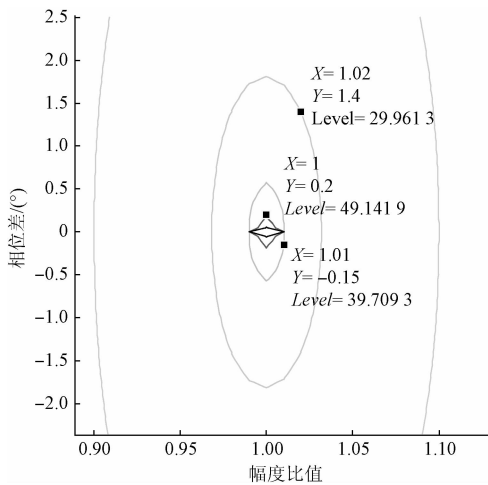


图 4 等对消比曲线

2 基于 LMS 算法的仿真分析

2.1 算法介绍

考虑到对消要求实现实时性高对消比,所以自适应滤波器的核心是自适应算法。该算法应该具有能够根据输入、输出以及误差值来自动修改滤波器,是自适应滤波器能快速跟踪外部环境的变化。

目前最常用的算法主要有以下 3 种^[10]:1)基于维纳滤

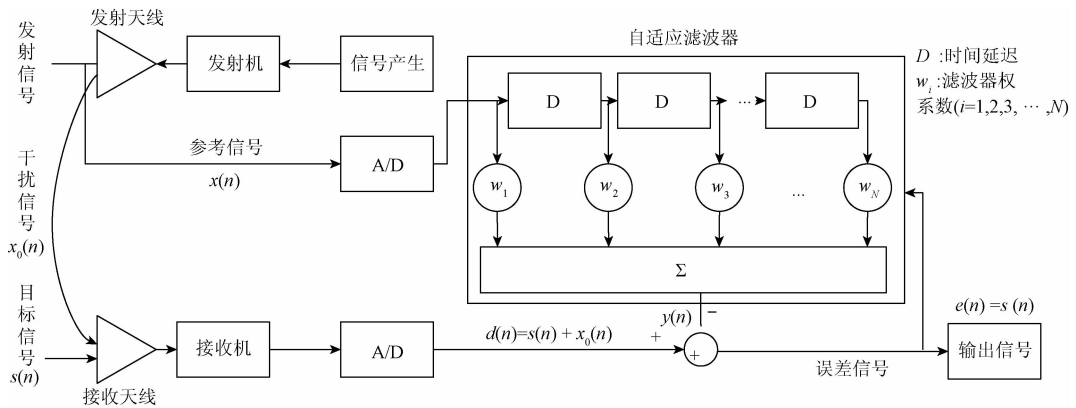


图 5 自适应射频干扰对消系统

由式(4)可知,采用 LMS 算法实现均方误差 $E[|e|^2]$ 最小化,滤波器权值向量 $\omega(n)$ 的递推公式为^[17]:

$$\omega(n+1) = \omega(n) + 2\mu e^*(n)x(n) \quad (7)$$

式中 μ 为 LMS 算法的步长因子。

假设 n 时刻的输入参考信号 $x(n)$, $x_i(n)$ 、 $x_q(n)$ 分别为参考信号的同相分量和正交分量;误差信号为 $e(n)$, $e_i(n)$ 、 $e_q(n)$ 分别为误差信号的正交分量和同相分量,则式(7)可以改写为:

$$\omega_i(n+1) = \omega_i(n) + \mu \times x_i(n) \times e_i(n) \quad (8)$$

$$\omega_q(n+1) = \omega_q(n) + \mu \times x_q(n) \times e_q(n) \quad (9)$$

波器理论的最小均方误差(LMS)算法。该算法计算量小并且易于实现,广泛应用于自适应控制、自适应校准、雷达、系统辨识及信号处理等领域^[11-12]。缺点是步长的选择对于 LMS 算法至关重要,步长选择过小,有可能会不收敛,或者收敛速度过慢;在收敛的前提下,选择较大的步长,虽然可以提高收敛速度,但有可能引起噪声失调,导致对消性能下降。所以使用固定步长的 LMS 算法时,要考虑收敛速度与收敛精度的折中。针对这个问题,好多学者提出改进变步长的 LMS 算法,使该问题得到一定的解决^[12-13]。

2)基于维纳滤波器的时间递推算算法——最小二乘(RLS)算法。该算法的关键是利用二乘方的时间平均最小化准则来取代最小均方准则,并按照时间进行迭代运算。其优点是收敛速度快,在快速信道均衡、实时系统辨识和时间序列分析中得到广泛应用^[14-15]。缺点是需求逆矩阵,算法复杂,导致应用受限。3)基于卡尔曼滤波理论的卡尔曼算法。该算法优点是收敛性能好、跟踪能力强、收敛速率具有鲁棒性,并且在平稳随机过程和非平稳随机过程中均适应。缺点是需使用矩阵表达式,算法复杂,稳定性差。

综合考虑算法的复杂性以及收敛性能,本文使用 LMS 算法进行仿真。

2.2 LMS 算法实现

在工程实现中,自适应射频干扰对消系统如图 5 所示^[16]。

则初始对消信号 $y(n)$ 的同相分量和正交分量分别为:

$$y_i(n) = \mathbf{x}_i^T(n) \times \boldsymbol{\omega}_i(n) + \mathbf{x}_q^T(n) \times \boldsymbol{\omega}_q(n) \quad (10)$$

$$y_q(n) = \mathbf{x}_q^T(n) \times \boldsymbol{\omega}_i(n) - \mathbf{x}_i^T(n) \times \boldsymbol{\omega}_q(n) \quad (11)$$

式中:

$$\mathbf{x}_q(n) = [x_q(n), x_q(n-\Delta t), \dots, x_q(n-(M-1)\Delta t)]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_i(n) = [x_i(n), x_i(n-\Delta t), \dots, x_i(n-(M-1)\Delta t)]^T \quad (13)$$

$$\omega_i(n) = [\omega_{1i}(n), \omega_{2i}(n - \Delta t), \dots, \omega_{Mi}(n - (M - 1)\Delta t)]^T \quad (14)$$

$$\omega_q(n) = [\omega_{1q}(n), \omega_{2q}(n - \Delta t), \dots, \omega_{Mq}(n - (M - 1)\Delta t)]^T \quad (15)$$

Δt 为自适应滤波器的延迟间隔; M 为自适应滤波器的阶数。初始对消信号与主通道的参考信号以及干扰信号经过求和器之后,生成实际的射频对消信号,可表示为:

$$e_q(n) = d_q(n) - y_q(n) \quad (16)$$

$$e_i(n) = d_i(n) - y_i(n) \quad (17)$$

式中: $d_i(n)$ 、 $d_q(n)$ 为接受信号的同相及正交分量,包括泄漏信号、目标回波信号以及宽带噪声。

2.3 仿真结果

根据大型舰船平台的实际情况,假设舰船上有一台 X 波段雷达,其一个周期内的发射信号形式如下:

$$T(t) = A \cos\left(2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right) \quad (18)$$

各项参数如下:中心载频 f_0 为 10 GHz;调频带宽 B 为 1 000 MHz;调频周期 T_M 为 10 μ s;采样频率 f_s 为 24 00 MHz;泄漏信号比雷达发射功率小 30 db;雷达接受信号的信噪比为 20 db;LMS 算法的步长 μ 为 0.05;LMS 算法阶数 M 为 10。

假设数字信号处理模块具有理想的数据处理能力,其响应时间对系统的对消性能影响可以忽略不计。使用 MATLAB 仿真,如图 6 和图 7 所示。图 6 为没有对消系统时的频谱图,图 7 为有对消系统时对应的频谱图。

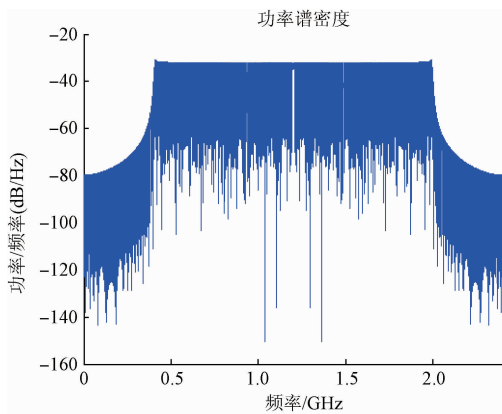


图 6 无对消系统时的功率谱密度

通过对比两图中对消前后的频谱图效果可以看出,本文所提出的在大型舰船平台中应用的射频对消系统具有较好的对消效果。该对消系统可以大大减小基底噪声,使被噪声淹没的信号重新被检测到。通过对比图 6 和图 7 的功率谱密度可知,该对消系统可以实现 40 db 的对消比。

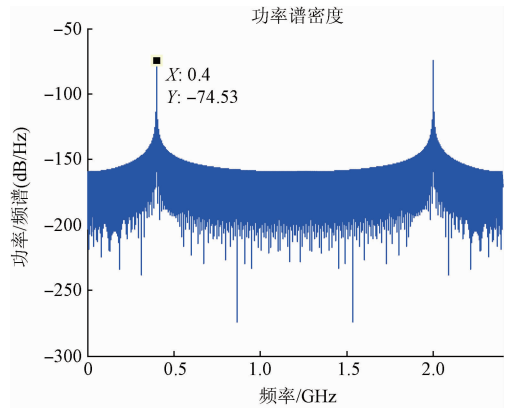


图 7 有对消系统时的功率谱密度

3 结 论

本文针对大型舰船平台电磁环境复杂,干扰多的情况,针对性的提出了将射频干扰对消技术应用到大型舰船平台的方案。从射频干扰对消技术入手,着重分析了其数学原理及系统模型,并对其对消性能进行仿真分析。接着本文分析了自适应滤波器最常用的 3 种算法,并最终选用 LMS 算法进行仿真实验分析,给出系统实现框图。结合具体的实例,由仿真结果可知,该方案可以实现 40 db 左右的对消比,具有较好的对消效果。虽然本文所提出的对消系统只是理论分析,没有进行实物验证,实际的对消性能可能会稍有偏差,但该系统为工程实践提供了理论基础,有指导实践的意义。

参考文献

- [1] 赖鑫. 射频干扰对消技术的系统设计与仿真分析[J]. 电讯技术, 2013, 53(3): 259-264.
- [2] 复杂电磁环境雷达干扰模拟器的实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 10-12, 18.
- [3] 宋妍, 王洪, 汪学刚, 等. 基于 LMS 算法的 FOD 雷达射频泄露对消技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(1): 34-39.
- [4] LUCW, LIU X J, ZHAO B, et al. Clutter suppression method in GPR using particle clustering[J]. Journal of Electronics(China), 2009, 26(5): 584-587.
- [5] PABLO A G, JOSÉ-TOMÁS G P, MATEO B G, et al. Millimeter-wave sensor with FMICW capabilities for medium-range high-resolution radars [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(6): 1479- 1486.
- [6] 刘高辉, 高勇. 一种基于分时发射技术的双线性间断调频连续波雷达的研究[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 695-699.
- [7] 代传堂, 柴文乾. 一种基于射频对消的连续波雷达

- 收发前端设计[J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(2): 88-90,94.
- [8] 龙戈农, 童宁宁, 李洪兵, 等. 改进的 LMS 算法及其在雷达干扰对消系统中的应用[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(5): 31-34.
- [9] 杨天虹, 屈乐乐, 邵清亮, 等. 连续波雷达同频干扰微波对消技术研究[J]. 微波学报, 2011, 27(6): 32-36.
- [10] 蒋云昊. 辐射干扰对消系统自适应控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [11] 陈红梅, 黄超, 邓红辉, 等. 带参考通道的时间交叉 ADC 数字后台校准方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1739-1745.
- [12] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1822-1830.
- [13] 宁小玲, 刘忠, 冯成旭, 等. 快速收敛变换域自适应滤波算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(3): 240-245.
- [14] 邵亚勇, 竺小松. RLS 算法及其改进形式在信号分离中的应用分析[J]. 电子测试, 2012, 1(1): 23-26.
- [15] WANG Z Q, WANG H R, MENG Q M. RLS and LMS blind adaptive multi-user detection method and comparison in acoustic communication[J]. Instrumentation, 2015, 2(2): 47-54.
- [16] 严争通, 肖素娟, 白志科, 等. 基于自适应对消的鱼雷电磁引信目标模拟系统收发耦合干扰抑制[J]. 鱼雷技术, 2015, 23(4): 269-275.
- [17] 蒋云昊, 马伟明, 赵治华. 斩波稳零下自适应干扰对消系统的性能分析[J]. 通信学报, 2010, 31(3): 65-74.

作者简介

杨广超, 1992 年出生, 硕士研究生, 研究方向为通信与信息系统、雷达总体系统研究等。

E-mail: yangguangchao1992@126.com

王建明, 1970 年生, 博士, 研究员级高工, 研究方向为雷达系统工程、自适应阵列处理等。

伍光新, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为相控阵雷达总体技术、雷达目标识别技术等。