

自适应射频干扰对消技术应用研究

丘绎萱, 曾迦健, 孙将斌, 陈家豪
(北京理工大学计算机学院 计算机科学与技术专业)

摘要: 本文主要介绍了射频干扰对消技术的原理和系统模型, 总结了其实现的关键技术点, 指出了自适应射频干扰对消技术在各个领域的应用, 包括通信系统以及在大型舰船平台的应用。提出了对消技术在未来的发展趋势。

关键词: 自适应; 射频干扰对消; 通信系统; 舰船平台

Application Research of Adaptive Radio Frequency Interference Cancellation Technology

You Yi Txuan, Chang Jia Jian, Soon Jiang Bing, Chin Kar Hoe
(Computer science and technology, School of computer science,
Beijing University of Technology)

Abstract: This article primarily introduces the principles and system models of radio frequency interference cancellation technology. It summarizes key technical points for its implementation and highlights the applications of adaptive radio frequency interference cancellation technology in various fields, including communication systems, piloted aircraft, and large naval platforms. The article also outlines the future development trends of interference cancellation technology.

Key words: radio frequency interference cancellation; communication systems; piloted aircraft; naval platforms

0 引言

随着电子设备技术的发展和需求的提升, 越来越多的现代军用电子信息系統由早期各自独立的子系统发展成为集雷达、通信、电子战、侦察等多功能为一体的综合化电子信息系統。为满足各子系统正常工作的需求, 对其电磁兼容特性的要求越来越严苛, 虽然在各子系统中增加滤波器可以解决带外干扰问题, 但仍无法解决带内干扰带来的影响, 而射频对消技术恰好用于解决这类问题, 提高了整个系统的频谱利用率。

1 自干扰信号的来源及对消原理

1.1 自干扰信息的来源

根据图 1, 自干扰来源的路径为 A、B、C。A 是定向耦合器的隔离度不高泄露到接收端的载波。B 是由于天线的阻抗匹配不好, 返回到接收端的载波。C 是由于环境复杂反射回来的载波。

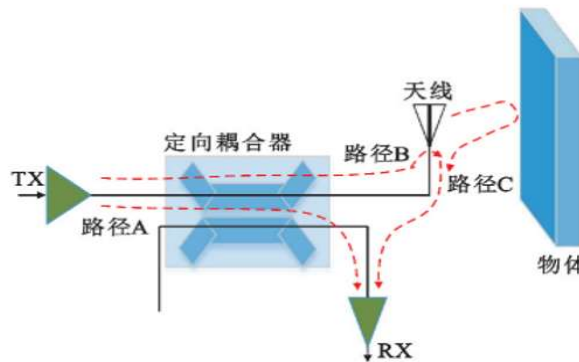


图 1 自干扰信号来源路径图

Fig.1 Path diagram of self interference signal sources

1.2 自干扰信号的对消原理

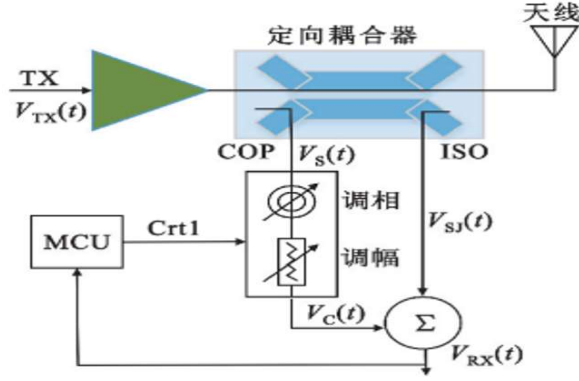


图2 自干扰信号抵消路径图

Fig.2 Path diagram of self interference signal cancellation

假设自干扰信号为一余弦波 $V_{SJ}(t)$ 。将定向耦合器^[2]的耦合端作为参考源信号 $V_s(t)$ ，通过 MCU 调节调幅、调相电路的控制参数，产生抵消信号 $V_C(t)$ 。 $V_{RX}(t)$ 为抵消信号与自干扰信号相互抵消后的接受信号。

$$V_{SJ}(t) = A_{SJ} \cos(\omega_0 t)$$

$$V_C(t) = A_C \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

$$V_{RX}(t) = V_C(t) + V_{SJ}(t)$$

$$|V_{RX}| = \sqrt{A_{SJ}^2 + A_C^2 + 2A_{SJ}A_C \cos \varphi}$$

当 φ 等于 180° 时， $|V_{RX}|$ 的取值最小。令 $\Delta\theta = 180^\circ - \varphi$ ， $\Delta A = 20 \lg(A_C/A_{SJ})$ 。当 ΔA 趋近于 0dB、 $\Delta\theta$ 趋近于 0° ，此时抵消信号与干扰信号幅度相等，相位相差 180° ， $|V_{RX}|$ 的值为 0，自干扰信号完全抵消。

2 射频对消技术介绍

2.1 原理简介

射频对消技术的数学原理是矢量的合成叠加。干扰信号可以比拟为直角坐标空间的一个矢量，利用另一个与该矢量有相同信息特征的等幅反相矢量与之合成，从而抵消掉该干扰信号。

如图 3 所示，干扰信号可以描述为极化图上的矢量 A，该信号包含有幅度和相位两方面的信息。矢量 B 用于对消该干扰信号。当矢量 B 与矢量 A 幅度相同、相位相反时，这样合成矢量 C 才能够趋于零。对消的过程，也

就是调节矢量 B 使其达到与矢量 A 等幅反向的过程。

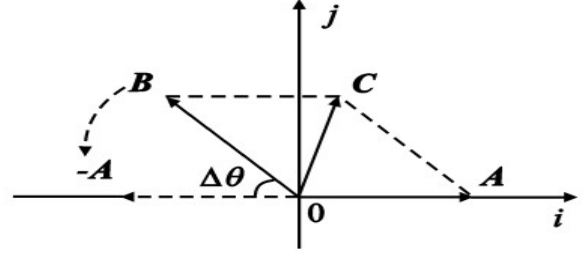


图3 矢量合成对消示意图

Fig.3 Sketch map of vector synthesis cancellation

射频对消技术有两种实现方式：一种是模拟对消方式，该方式是通过在系统接收端添加可调的移相器和衰减器，建立一个跟干扰信号幅度、相位相反的射频信号，与干扰信号合成，实现抵消效果；另一种是数字对消方式，该方式是通过采用数字自适应滤波算法实现对消系统的控制权值调整，最终实现干扰信号的滤除。

2.2 研究模型

根据对消的数学原理，其工程原理模型一般可以表述为图 4 所示的框图。有用信号、干扰信号和经过幅相调整后的采样信号都进入到接收信道中，其中采样信号经过调整后达到与干扰信号等幅反相的效果，实现对干扰信号的消减。对消器的主要部件包括对消效果检测部分、信号控制调整部分和矢量信号幅相调整部分。

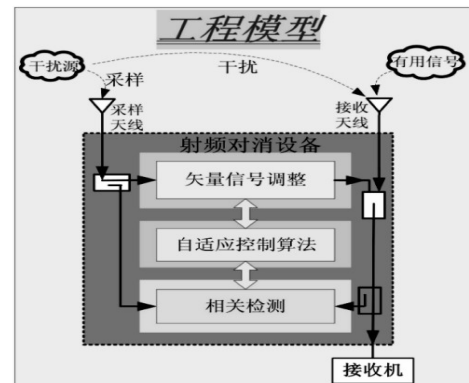


图4 射频对消系统框图

Fig.4 Block diagram of RF interference cancellation

整个对消器与接收信道组成了一个闭环的负反馈系统，实现了对矢量信号的自适应调整。对消效果检测和矢量信号幅相调整决定了系统的对消能力，信号调整控制对整个系统的状态进行控制。

干扰信号经过对消器的处理后，理想的输出特性如图 5 所示。当干扰信号幅度较弱时，没有达到抵消开启门限，对消器不运作。当干扰信号幅度逐渐增加，超过抵消开启门限后，对消器发挥作用，将干扰信号进行抵消处理，输出的干扰信号保持在一个可接受的水平上。

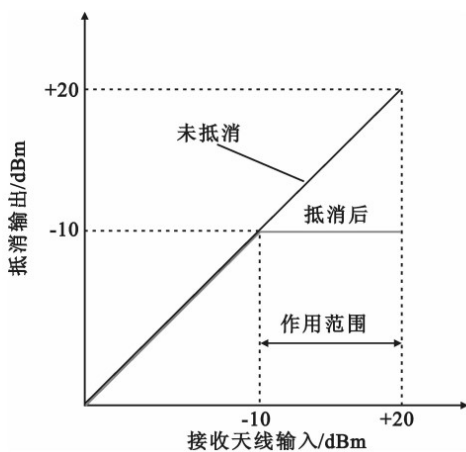


图 5 抵消效能示意图
Fig.5 Result of RF cancellation

对消技术尽管有不同的应用场景，但是其中的对消器的构架和在系统中的接入都与图 2 中的框图类似。在一些场景中也有对消效果检测在前的开环对消技术，但是由于其不具有反馈控制，系统容易发散，在实际应用中应用较少。

2.3 技术研究重点

2.3.1 正交矢量调制技术

在对消技术中，对消的效果关系到对应用场景的能力保障和提升，因此表征对消前后干扰信号幅度比值变化的对消比成为了系统首要的关注指标。

对消器所能实现的対消比由经过幅相调整后的采样信号与干扰信号的合成矢量决定。如

图 1 所示，合成矢量 C 的幅度越小，对消效果越好。对于采样的矢量信号，对消器需要对其进行大动态、高精度的 360° 相位调整和幅度调整难以直接用移相器和衰减器实现。对于矢量调整，在技术上常采用正交矢量调制的方式实现。

正交矢量调制把一个矢量分解到正交坐标系的两个坐标轴上，通过调整这两个极轴上矢量的幅度并调整其反相，即可实现信号在坐标空间里的 360° 相位调整和幅度调整。

按照正交矢量调制的原理，技术实现相对简单，把进入的信号先通过一个 90° 的正交电桥，分解为相互正交的 I 路和 Q 路，再分别对这两路进行 0° 或 180° 的移相，以及幅度调整，最后再通过同向功分成，这样输出的信号就能如图 6 所示，实现在整个坐标空间的 360° 相位调整和幅度调整。

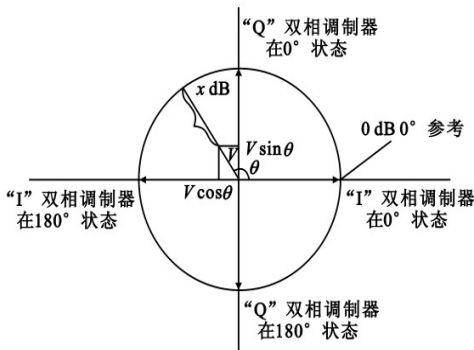


图 6 正交信号合成示意图
Fig.6 Diagram of orthogonal signal synthesis

矢量调整转化为两路正交信号的幅度调整和方向调整，同样地实现高对消比的高精度幅相调整则转化为了对两路正交信号的高精度的幅度调整，因此正交矢量调制器件的研制难度也主要转化到了高精度的幅度控制上。

3 对消技术的应用

3.1 对消技术在通信系统的应用

3.1.1 实现平台通信系统自兼容

在现有的共场地平台中，常常配置了多条超短波通信链路。由于共平台使用，受到平台尺寸的限制，各条链路的天线间隔短，天线隔离度小，不能满足兼容工作需要最小隔离度要求。这种情况下超短波接收机会受到同频段工

作的超短波发射机的主频或 宽带噪声干扰影响,使得接收机饱和或灵敏度降低,不能正常工作,造成系统电磁兼容问题。

为解决上述问题,一般采用的方式包括天线布局设计、射频滤波处理等,但对于尺寸较小的移动平台而言,受到平台体积和载重量的影响,天线隔离度和射频滤波器的指标会受到限制,不能完全满足兼容设计要求。

射频干扰对消技术为通信系统电磁兼容提供了一种解决方法。使用射频干扰对消技术后,相当于通过处理减轻了干扰的作用程度,在一定程度上可以解决因平台天线布局、滤波等技术局限所不能解决的问题。

3.1.2 实现与平台信息系统兼容

除了能帮助通信系统内部多条链路实现兼容工作,射频干扰对消技术还可应用于通信系统与其他系统的兼容设计中,提升整个任务系统电磁兼容能力。

在现代电子化战争中,武器平台上都装备了多种功能的电子设备。在综合化的电子平台中,装备有通信、雷达、导航、电子战等多种电子信息系统。尤其对于飞机、舰船和地面移动站点等平台,天线布局受限于环境因素,不得不密集布局,导致系统间天线隔离度不足;同时多种系统均需要同时工作,因此大大加重了彼此干扰程度。

与通信系统内部干扰情况类似,干扰模式也主要是主频干扰和带外噪声干扰。但是这种多系统的模式干扰功率更大、干扰信号类型更复杂、组合干扰更多,因此解决起来更加困难。解决这种复杂的系统兼容问题,必须将多种手段综合运用,包括天线设计和布局、射频滤波、抗干扰波形、射频对消、频率规划和管理、闭锁和消隐。其中天线布局设计在保证各系统功能性能的基础上,还要获得尽量大的相互隔离度,以降低发射通路对其他接收机的干扰强度。

射频滤波完成对发射信号的整形处理,在对有用信号影响尽量小的前提下,增大对带外无用信号的衰减,从而减小本地噪声影响。

射频对消起到的作用在于降低滤波器通带范围内干扰信号的强度,使得有用信号能够正常解调。下面介绍3个应用场合。

(1) 电子战系统与通信系统——“干中通” 电子战系统和通信系统是信息战争中关键的系统,电子战系统具有大功率宽带干扰能力,而通信系统则要尽量进行隐蔽通信,因此在共平台使用时,电子战的宽带噪声会使得通信系统瘫痪。这是属于宽带信号对窄带接收通路的干扰。合理利用对消技术,有助于降低电子战系统在主干扰频段外的杂散信号对通信系统的影响,实现“干中通”。

(2) 通信系统与侦察系统——“通中侦” 侦察系统为只收不发,且为宽带接收,通信系统属于窄带传输系统。通信系统对侦察系统的干扰属于窄带信号对宽带系统的干扰。利用对消技术可以实现对侦察系统接收机前端的保护,避免饱和使得接收效能丧失,实现“通中侦”。

(3) 电子战系统与侦察系统——“干中侦” 电子战系统对侦察系统的干扰属于的宽带信号对宽带接收通路的干扰,利用对消技术有助于减轻干扰影响,使得“干中侦”成为可能。

3.2 射频干扰对消技术在大型舰船平台中的应用

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。

舰船平台常常受到射频干扰,这可能来自自身设备的辐射、周围舰船或敌对方的电磁活动。这些干扰信号可能导致设备性能下降,甚至影响到关键任务的执行。为了应对上述问题,采用射频干扰对消技术。这种技术通常利用自适应滤波器和最小均方误差算法,以抑制或消除干扰信号,保障舰船上各个系统正常

工。射频干扰对系统中的自适应滤波器能够实时调整其滤波参数,以适应不断变化的电磁环境。这使得系统能够更有效地对抗不同频段和复杂干扰源。具体来说就是解决电磁环境复杂性和射频干扰对设备性能的影响,从而提高舰船平台的电磁兼容性和作战效能。

4 对消技术的未来发展

未来的电子信息系统朝着大动态、宽频段、高灵敏度的方向发展,设备的性能提升和平台中多系统应用给应用其中的对消技术提出了新的技术需求。对消技术作为一种可以通用的电磁兼容防护技术,它的未来发展主要在两方面,一是其自身性能的提升,二是加强在系统电磁兼容中的综合应用。

(1) 高精度、大动态对消技术 未来电子设备的高灵敏度给系统电磁兼容提出了更高的要求。若要对消掉设备受到的干扰,对消设备要有更高的对消比,这对对消设备的矢量调制精度和系统动态范围提出了更高要求。高精度射频部件的研制和系统的大动态功能实现是未来对消技术的研究方向。

(2) 宽带对消 未来电子设备的使用频率越来越高,作用频率范围更宽,对消设备也要适应应用中的宽频带要求,这需要在对消设备的器件宽频带特性研究和系统应用中的信道宽频带特性实现上做出更多的努力。

(3) 频段扩展 现有对消技术的应用多是针对设备和平台电磁兼容出现的问题而进行的一种改进和补偿。目前对消技术在系统中应用主要还是针对通信频段和雷达频段,在未来的电子信息系统设计中,应该把对消技术作为一种系统能力,与系统功能进行综合设计,更好地提升系统效能。随着系统对消需求的增加,将会扩大对消技术的应用频段需求。

5 结论

射频对消技术主要用于解决已知同频干扰问题,可用于增大同一系统中收发隔离度,提升系统间频谱利用率,解决综合系统中发射信号对接收系统的干扰问题。在通信系统集成以及大型舰船平台上得到了广泛的应用和快速的发展。射频干扰对消技术可对消接收机收到的主

频干扰和宽带噪声干扰,改善常规技术手段不能完成的系统间电磁兼容,可应用于多种综合化的电子信息平台,是平台电磁兼容设计不可或缺的重要手段,未来将会得到持续不断的发展

参考文献:

- [1] 袁杰. 射频干扰对消技术在通信系统集成中的应用[J], 电子器件, 2012, 52(12): 1870-1874.
- [2] 余旭, 宋国栋, 刘学观, 等. UHF RFID 自适应射频干扰对消技术[J]. 电讯技术, 2022, 62(11): 1650-1655.
- [3] 高小红, 张强, 冯卉萱. 超短波信号抵消技术应用分析[N]. 航空工业陕西飞机工业(集团)有限公司, 陕西 汉中, 2019: 186-188.
- [4] 陈国强. 全双工通信中射频自干扰消除技术研究[D], 电子科技大学, 2017.
- [5] 杨广超, 王建明, 伍光新. 射频干扰对消技术在大型舰船平台中的应用[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 104-108.
- [6] 蔺雪洁, 王正伟, 洪成, 段超. 射频模拟对消技术研究[J], 微波学报, 2020, 36: 373-375.

作者简介:

丘绎植[组长]: 1820221050

Phone: 15010901562

Email: 1820221050@bit.edu.cn

曾迦隼[组员]: 1820221053

Phone: 15101578062

Email: 1820221053@bit.edu.cn

孙将斌[组员]: 1820221055

Phone: 15010207267

Email: 1820221055@bit.edu.cn

陈家豪[组员]: 1820221047

Phone: 15611891164

Email: 1820221047@bit.edu.cn