

一种基于对消技术的瞬时大动态接收机^{*}

李永波^{**}

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对侦察系统的电磁环境适应性受限于其动态范围的问题,提出了基于对消技术的瞬时大动态接收机,以此来提高侦察系统的动态范围。分析了影响侦察系统动态范围的因素,提出了在固定一中频将同源信号中的强信号分离,并在数字域进行自适应处理,在模拟域内进行功率抵消的接收机构架,同时分析了影响对消比的因素。通过仿真验证了该技术的可行性,并指出该技术路线尚需解决的问题。

关键词:侦察系统;接收机;复杂电磁环境;瞬时动态范围;对消

中图分类号:TN971.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)12-1624-05

A Receiver with Instantaneous Large Dynamic Range Based on Cancellation Technique

LI Yong-bo

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The electromagnetic adaptability of reconnaissance system is restricted to its dynamic range. In view of this, a receiver with instantaneous large dynamic range based on cancellation technique is presented for improving the dynamic range of reconnaissance system. The factors affecting the dynamic range of reconnaissance system are analyzed, and a receiver framework based on cancellation technique is proposed in which the strong signal is separated from multi-signal in the fixed first intermediate frequency and adaptive processing is implemented in digital field and the strong signal is cancelled in analog field. The factors which affect the cancellation rate are also analyzed. The feasibility is validated through simulation and the difficulties to be solved are also indicated.

Key words: reconnaissance system; receiver; complex electromagnetic environment; instantaneous dynamic range; cancellation

1 引言

无线电侦察系统的理想目标是:在没有先验信息的情况下,将所关心空域的无线电辐射信号进行无失真的全概率截获。然而,在复杂电磁环境中,各种强弱信号可能同时存在,当侦察系统的动态范围不足时,存在大信号压制小信号,甚至大信号直接使得接收机阻塞的情况,这制约了侦察系统在复杂电磁环境下的适应能力。常用的解决途径之一是在接

收机前端尽量按频率或方位稀释信号,但这样增加了设备的复杂性,同时也降低了截获概率^[1]。

对消技术是国外发展起来的一项抗干扰技术^[2],在传统雷达接收机中用于抑制发射机强信号对本地接收机的干扰,通常采用开环方式只能抑制已知固定频点的干扰源。此后发展了自适应旁瓣对消技术,其基本原理是通过附加的辅助通道,利用其与主通道接收干扰信号的相关性以及有用信号的

* 收稿日期:2013-09-05;修回日期:2013-12-06 Received date:2013-09-05;Revised date:2013-12-06

** 通讯作者:liyongbo8848@126.com Corresponding author:liyongbo8848@126.com

非相关性,通过一定的自适应算法产生一组权值,然后对辅助通道接收的信号进行加权求和,使得求和后得到的信号尽量接近主通道接收的干扰信号,并随着干扰方向的变化自适应地调整权值,在干扰信号到达的方向上形成零陷,以实现对干扰的抑制。该方法需要增加辅助天线,这样不仅增加了成本,而且当强、弱信号均只从主天线波束方向侦收到时,将无法通过辅助天线实现对消。文献[3]提出了一种直接在宽带射频范围内进行对消的思路,但对接收机的噪声系数较难控制,同时对 ADC 和 DAC 的模拟信号带宽提出了较高要求。

针对战场电磁环境的复杂性,对侦察接收机瞬时动态范围要求越来越高,本文分析了影响侦察系统瞬时动态范围的因素,提出了一种基于对消技术的瞬时大动态接收机思路。

2 影响瞬时动态范围的因素

侦察系统的瞬时动态范围是指系统可同时对同一带内的最强信号与最弱信号正确接收处理的强、弱信号幅度差范围^[4]。

影响侦察系统动态范围的因素有接收机动态范围和 ADC 采样动态范围,其中接收机的动态范围由接收机的非线性特性决定,同时还受接收机本振相位噪声的影响^[5]。

接收机的非线性特性常用单音动态范围或双音无虚假动态范围来衡量,单音动态范围描述的是接收机不失真地处理单一输入信号的能力,当要求接收机不失真地同时处理多个信号时,常用双音无虚假动态范围(SFDR,又称瞬时动态范围),它描述了接收机在存在强信号的环境下对弱信号的侦收能力。其下限由接收机的灵敏度电平确定,上限由接收机中频输出端产生的三阶交调寄生信号大于灵敏度电平检测门限的输入功率电平确定。

$$SFDR=2/3\left(OIP3-P_{\min }-G\right) \quad (1)$$

$$P_{\min }=-174+N F+10 \lg B+S N R \quad (2)$$

其中, $OIP3$ 为接收机的输出三阶截点,单位 dBm; $P_{\min }$ 为接收机的灵敏度,单位 dBm; G 为接收机的增益,单位 dB; NF 为接收机的噪声系数,单位 dB; B 为接收机的中频输出带宽,单位 Hz; SNR 为中频输出信噪比,单位 dB。

输出三阶截点反映接收机对输入信号的非线性容忍程度,通常进入接收机后级的信号是经过前面各级放大的,因此对后级电路的线性范围要求更高,

接收机的输出三阶截点也主要由后级电路的1 dB压缩点决定。

由式(1)可知,为了满足 ADC 的动态范围,侦收系统的灵敏度越高,要求接收机的增益也越高,从而限制了接收机的动态范围。由式(2)可知,在满足中频输出信噪比一定的情况下,中频输出带宽越宽,系统的灵敏度将越低;同时,由于接收机动态范围不足而产生的非线性分量进入中频带宽内的可能性也越大。因此,接收机的宽带、高灵敏度与大动态范围是相互制约的。扩大 ADC 动态范围和接收机动态范围是改善侦收系统瞬时动态范围的两种有效途径。

理论上,ADC 的动态范围为 $6 \times N$ dB, N 为 ADC 的量化位数^[6]。如 14 位的 ADC,其采样理论动态范围为 84 dB,考虑到侦收系统的参数测量及解调信噪比要求,通常只用到 60 dB。假设系统灵敏度为 -130 dBm,接收机增益为 70 dB,则要达到 60 dB 的瞬时动态范围, $OIP3$ 必须达到 30 dBm,这对接收机来说是比较高的。

如图 1 所示,现有超外差接收机在大动态侦收环境中通常是在链路中加入可调衰减器,当侦收环境有强信号时调节衰减器,以此来确保接收后端不出现饱和,该方法虽然使得后端链路没有出现非线性失真,然而可调衰减器对强信号衰减的同时对弱信号也进行了衰减,导致弱信号信噪比不足而无法满足系统的侦收要求。因此,该方法只增加了侦收系统的适应动态范围,但并未扩展侦收系统的瞬时动态范围能力。

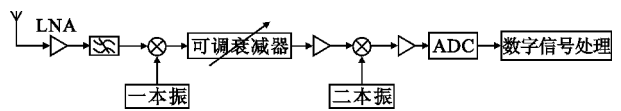


图 1 现有超外差接收机构架
Fig. 1 Existing framework of superheterodyne receiver

本文基于对消的原理,提出了一种适用于宽带侦收系统的自适应对消思路,在确保弱信号不压缩的前提下,减小接收机的中频输出动态范围,达到扩展侦收系统瞬时动态范围的目的。

3 基于对消原理的瞬时大动态接收机

3.1 接收机架构

接收机的非线性失真通常主要由后端链路产生,因此实施对消应尽量选择在接收机的前端。如

选择直接在接收机前端实施纯模拟对消,则较难在宽频段范围内实现高精度的 180°相移控制;而选择在接收机前端实施数字对消,则较难选择与之匹配的宽带、高速率 ADC。因此,本文选择在接收机一中频实施对消,即避免了在强信号导致的非线性严重失真之后,又确保了在固定的频率和带宽进行数字对消处理,对采样 ADC 以及对消 DAC 的要求均相应降低。

该接收机的架构如图 2 所示,为便于描述,图中省略了模拟滤波及放大等功能模块。该方案的基本思路为:从同源信号中分离出强信号,通过自适应算法在一中频实施对消,自适应信号处理在数字域内进行,而功率抵消在模拟域内进行。

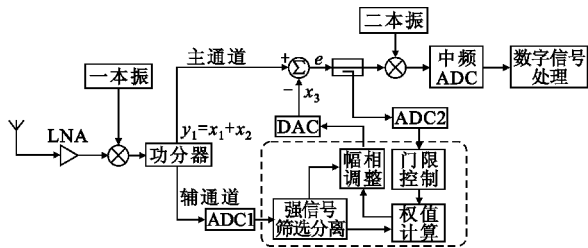


图 2 基于对消的瞬时大动态接收机架构
Fig. 2 Framework of instantaneous large dynamic receiver based on cancellation

侦收信号在一混频后功分为主、辅两个通道,接收信号 y_1 由互不相关的弱信号 x_1 和强信号 x_2 组成。主通道信号在对消器后耦合一部分对消剩余信号 e 并经过 ADC2 转换为数字信号;辅通道信号通过 ADC1 转换为数字信号,其采样动态范围设计为确保侦收系统的上限强信号不饱和,而不考虑是否能真实采样弱信号,采样后的信号在数字域内通过筛选分离出强信号 x_3 ,并由主通道对消后耦合的剩余信号进行自适应滤波控制,达到对主通道的强信号进行对消。假设对消比为 20 dB,则系统的瞬时动态范围将扩大至 80 dB。

如图所示,有

$$e = y_1 - x_3 = x_1 + x_2 - x_3 \tag{3}$$

将上式进行平方:

$$e^2 = x_1^2 + (x_2 - x_3)^2 + 2 \times x_1 \times (x_2 - x_3) \tag{4}$$

于是可得

$$E[e^2] = E[x_1^2] + E[(x_2 - x_3)^2] + 2 \times E[x_1 \times (x_2 - x_3)] \tag{5}$$

环路的自适应滤波过程就是调节环路参数,使得 $E[e^2]$ 最小的过程。上式中第一项为弱信号功率;由于弱信号与强信号不相关,因此第三项等于

0。因此,要使得 $E[e^2]$ 最小,即要求上述第二项最小,即

$$E[e^2] = E[x_1^2] + E[(x_2 - x_3)^2]_{\min} \tag{6}$$

当 x_3 与 x_2 幅度相等、相位相反时, $E[e^2]$ 即为最小,剩余信号只有弱信号 x_1 。

如果不对对消环路进行干预,理论上经过多次迭代运算后主通道的强信号将会完全被对消,这不是设计的初衷。在电子侦察与反侦察中,敌方可能在强信号附近有意放置弱信号,且强、弱信号均有可能传递有用信息。因此,采取对 ADC2 采样的耦合剩余信号进行门限检测控制,当主通道对消后的通道总能量不会致使后端接收链路饱和,且经对消后的强信号在中频 ADC 的动态范围内时,则停止迭代运算并将现有的环路滤波权值保持,以确保强、弱信号均能不失真地进入数字信号处理部分。

3.2 强信号筛选分离

强信号的筛选分离采用如图 3 所示方法,先用数字多相滤波器组将 ADC1 采样的一中频宽带信号在数字域均匀分解成多个可以独立处理的子频带^[7],然后对各子频带进行幅值比较并筛选出信号最强的子频带。采用多相滤波器结构,滤波器在数字抽取之后,降低了后续信号处理的负担,而且当 M 是 2 的幂次方时,DFT 可以用 FFT 高效快速实现。

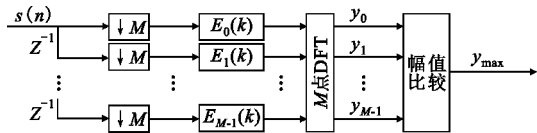


图 3 强信号筛选分离示意图
Fig. 3 The demonstration diagram of separating strong signal

3.3 幅相调整

如图 4 所示,筛选出的强信号与主通道对消后耦合的剩余信号进行自适应滤波权值计算,并通过在数字域中的正交矢量合成原理,将滤波器权值对筛选强信号的幅相控制转化为对其两路正交信号的幅度调整和反向调整,以达到与主通道强信号幅度相等、相位相反^[8]。

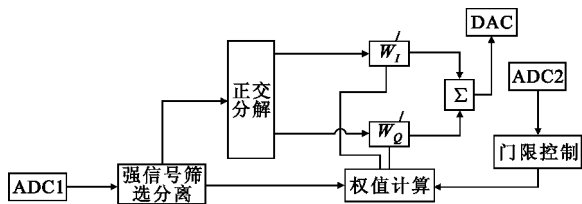


图 4 正交信号控制示意图
Fig. 4 The demonstration diagram of controlling orthogonal signal

3.4 对消比影响因素

在实际的系统环境下,很难实现将强信号完全对消。工程中常用对消比来评价系统的对消性能,它是指在对消器前、后强信号的功率之比。

在本系统中对消比由主辅通道对消信号的相关性、ADC1 及 ADC2 的采样量化精度、DAC 数模变换精度、幅相调整精度等因素共同决定,主、辅通道强信号的相关性越强,即辅通道多相滤波器选择性越强,ADC1 及 ADC2 的采样量化精度及 DAC 数模变换精度越高^[9],幅相调整精度越高,系统对消性能越好。

本接收机架构中,ADC1 及 ADC2 是对一中频信号进行采样,其中频频率及带宽均为已知固定值,所以对 2 个 ADC 的带宽及采样率要求均相应降低。在电子侦察中强、弱信号均有可能是需要侦收的目标信号,该对消系统并不希望将强信号完全对消,而只需将两者的动态差调整到中频 ADC 的采样动态范围之内即可。因此,该系统的优点是并不追求非常高的对消比,这对整个对消系统的精度要求均相应降低。

4 仿真分析

如图 5 所示,侦收环境在相距20 MHz范围内存在幅度为-50 dBm、-130 dBm的两个强、弱单音信号。如果直接采用图 1 所示传统接收机架构对其同时侦收,将导致接收机非线性失真甚至饱和,亦或导致弱信号电平在中频 ADC 动态范围之外。

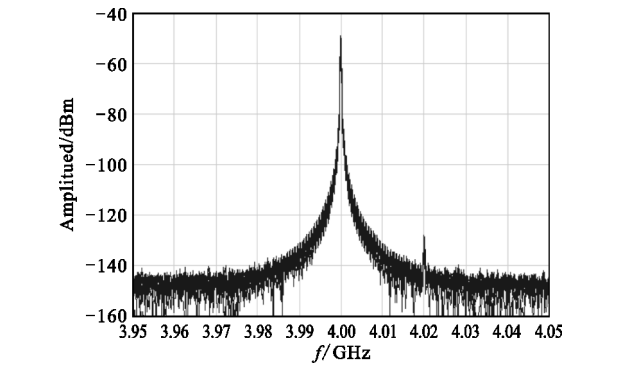


图 5 侦收信号频谱
Fig. 5 The frequency spectrum of reconnaissance signals

如图 6 所示,当采用中频对消环路对强信号进行对消且不实施门限控制的情况下,仿真理论上强信号可完全对消,同时对弱信号无影响。

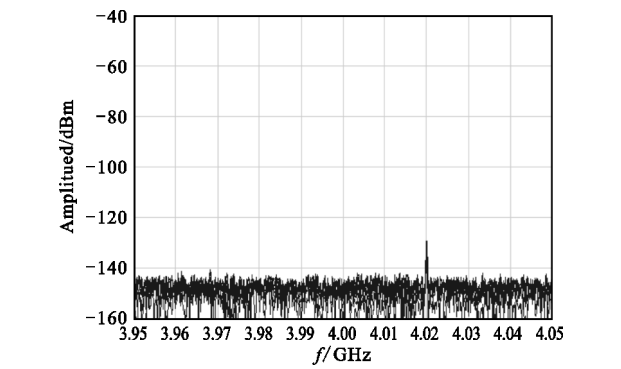


图 6 无门限控制的对消效果
Fig. 6 The effect of cancellation without threshold control

图 7 所示为采用中频对消环路对强信号进行对消且实施门限控制的侦收频谱图。从仿真结果可知,当强信号对消比达到20 dB时,剩余通道总能量不会使后端接收链路饱和,门限控制启动并将对消环路参数保持,使得强、弱信号均在中频 ADC 动态范围之内。由此将接收机的瞬时动态范围由60 dB扩展至80 dB。

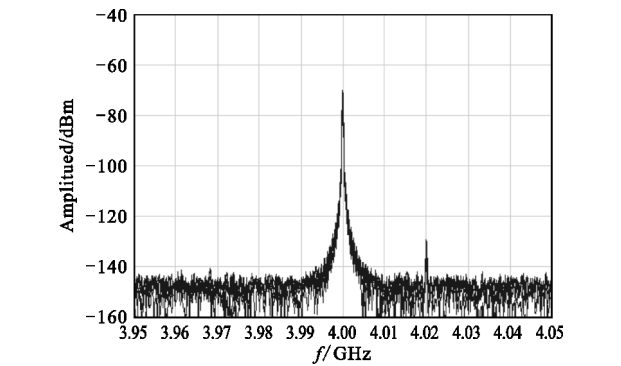


图 7 有门限控制的对消效果
Fig. 7 The effect of cancellation with threshold control

5 总 结

全概率截获是侦收系统所追求的理想目标之一,宽带、高灵敏度和大动态范围因此成为侦察接收机永恒不变的话题。本文提出了一种基于一中频对消的超外差接收机思路,能在宽带侦收系统中有效地扩大系统地瞬时动态范围,提高系统在复杂电磁环境下的适应能力。然而本文仅仿真了单个窄带强信号,未考虑宽带强信号及多个强信号情况下的系统适应性。尽管如此,对消技术具有其不可取代的技术优势,在未来的侦收系统中必将具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵培聪,史雪辉. 现代海军雷达侦察技术发展分析[J]. 舰船电子对抗,2011,34(1):17-21.
ZHAO Pei-cong,SHI Xue-hui. Analysis on The Development of Modern Naval Radar Reconnaissance Technologies[J]. Shipboard Electronic Countermeasure,2011,34(1):17-21. (in Chinese)
- [2] Old J C,Sc B. Multiple Open-Loop Interference Canceller for a Rotating Search Radar[J]. IEEE Radar and Signal Processing,1984,131(2):203-207.
- [3] 陈顺阳,杨小牛,程辉,等. 一种超大动态侦察接收机设想[J]. 通信对抗,2010(3):16-19.
CHEN Shun-yang,YANG Xiao-niu,CHENG Hui,et al. A Design Idea of Ultra-Large Dynamic Range Reconnaissance Receiver [J]. Communication Countermeasures,2010(3):16-19. (in Chinese)
- [4] Vaccaro D D. 电子战接收系统[M]. 付大毛,胡永福,译. 北京:总参谋部第四部,1996:75-76.
Vaccaro D D. Electronic Warfare Receiving Systems [M]. Translated by FU Da-mao,HU Yong-fu. Beijing: The Fourth Department of the General Staff Headquarters,1996:75-76. (in Chinese)
- [5] 李永波. 本振相位噪声对接收机性能的影响[J]. 电讯技术,2012,52(4):562-565.
LI Yong-bo. Effect of Local Oscillator Phase Noise on Receiver Performance [J]. Telecommunication Engineering,2012,52(4):562-565. (in Chinese)
- [6] 马军. ADC 性能及其对接收机性能的影响[J]. 现代电子技术,2007(8):139-140.

- MA Jun. Performance of ADC and Its Influences on the Performance of Receiver[J]. Modern Electronics Technique,2007(8):139-140. (in Chinese)
- [7] 付永庆,李裕. 基于多相滤波器的信道化接收机及其应用研究[J]. 信号处理,2004,20(5):517-520.
FU Yong-qing,LI Yu. The Realization of Channelized Receivers Based on Polyphase Filters[J]. Signal Processing,2004,20(5):517-520. (in Chinese)
- [8] 郑伟强,杜武林. 自适应干扰抵消研究[J]. 电讯技术,1991,31(6):20-27.
ZHENG Wei-qiang,DU Wu-lin. Study of Adaptive Interference Cancelling [J]. Telecommunication Engineering,1991,31(6):20-27. (in Chinese)
- [9] 徐茂,王俊,赵洪立. 数模转换对自适应天线旁瓣相消的影响[J]. 火控雷达技术,2005,34(4):4-7.
XU Mao,WANG Jun,ZHAO Hong-li. Effect of A/D Converting on Performance of Adaptive Antenna Side lobe Cancellation[J]. Fire Control Radar Technology,2005,34(4):4-7. (in Chinese)

作者简介:



李永波(1981—),男,四川雅安人,2007年于重庆大学获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为宽带接收机及航天侦察载荷。

LI Yong-bo was born in Ya'an, Sichuan Province, in 1981. He received the M. S. degree from Chongqing University in 2007. He is now an engineer. His research concerns wideband receiver and space reconnaissance payload.

Email:liyongbo8848@126.com