

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.002

接收相参雷达相干检波改进设计与仿真

周亚飞¹, 赵修斌¹, 胡健生²

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 武警工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 为提高传统雷达信号处理系统的性能, 提出雷达中频信号数字正交解调和相参信号的提取方法。对接收相参雷达相干检波进行改进研究, 采用中频采样和数字正交解调代替模拟相干检波器, 采用数字混频滤波提取发射信号初始相位, 并采用某型接收相参雷达实际采集信号进行了仿真实验。仿真结果表明: 改进后雷达信号处理效果有明显提升, 改进方案对早期雷达数字化改造和现代雷达信号处理系统设计具有借鉴意义。

关键词: 接收相参雷达; 中频采样; 正交解调; 混频滤波; 数控振荡器

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A

Quadrature Demodulation Improving Design and Simulation for Coherent-on-Receive Radar

Zhou Yafei¹, Zhao Xiubin¹, Hu Jiansheng²

(1. College of Telecommunication Engineering, Engineering University of PLA Air Force, Xi'an 710077, China;

2. College of Armed Police Engineering, Xi'an 710086, China)

Abstract: In order to improve the performance of signal processing system in traditional radar, the IF digital quadrature demodulation and the coherent signal getting method is introduced. The improving method of coherent detection for coherent-on-receive radar is studied, analog coherent detector is replaced by IF sampling and digital quadrature demodulation, digital mixer and filter is used to get the original phase of transmitting signal. Simulation is made with real signal of coherent-on-receive radar, and the result indicates that the signal processing effect is greatly improved and shows that this new method is valuable for the digital update of some early stage radar and the design of modern radar signal processing system.

Keywords: coherent-on-receive radar; IF sampling; quadrature demodulation; mixer and filter; numerical controlled oscillator

0 引言

雷达接收机中的中频回波信号包含了运动目标和运动杂波引起的多普勒频率以及固定杂波引起相位变化信息, 利用这些信息可以判断目标是否存在。相干检波是用来提取雷达收发信号频率差或者相位差的一项技术。一些老式雷达发射机采用自激式振荡, 发射脉冲初始相位具有随机性, 相参处理只能采用接收相参方式, 接收相参雷达采用模拟相干检波器, 相干检波所需的相参信号多是通过定相脉冲触发相干振荡器获得, 由于模拟器件本身固有的不稳定性, 相参信号的幅度和相位会出现偏移, 此外, 平衡式相位检波器还会引起“点盲相”, 这些问题严重影响了雷达信号处理系统的性能。若对雷达进行全相参处理改造, 就必须彻底改造原设备, 成本高, 周期长。故采用中频信号直接采样和数字正交解调代替模拟相干检波器, 解调信号由数控振荡器 (Numerical Controlled Oscillator, NCO) 产生, 能精确提供幅度一致、相位正交的解调信号, 并采用

数字双通道正交解调, 从根本上解决“盲相”问题。

1 数字正交解调

1.1 数字正交解调原理

雷达接收机收到的高频回波信号经模拟混频和滤波后成为中心频率为 f_0 的中频信号:

$$s(t) = a(t) \cos[2\pi(f_0 + f_d)t - 2\pi f_0 R_0/C + \varphi_0] \quad (1)$$

其中, $a(t)$ 为中频回波信号振幅, f_d 为多普勒频率, R_0 为 $t=0$ 时刻目标距离, C 为光速, φ_0 为发射信号初始相位。以 f_s 的采样率对 $s(t)$ 进行采样后得:

$$s(n/f_s) = a(n/f_s) \cos[2\pi(f_0 + f_d)n/f_s - 2\pi f_0 R_0/C + \varphi_0] \quad (2)$$

$$= I_n \cos(2\pi f_0 n/f_s + \varphi_0) - Q_n \sin(2\pi f_0 n/f_s + \varphi_0)$$

式 (2) 中,

$$I(n) = a(n/f_s) \cos(2\pi f_d n/f_s - 2\pi R_0/C), \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$Q(n) = a(n/f_s) \sin(2\pi f_d n/f_s - 2\pi R_0/C)$$

分别称为回波信号的同相分量和正交分量, 它

收稿日期: 2010-05-21; 修回日期: 2010-06-08

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (SJ08F06); 军队装备维修科学研究与改革项目

作者简介: 周亚飞 (1983-), 男, 湖北人, 硕士研究生, 从事军用无线电导航研究。

们包含了幅度调制信息和相位调制信息, 数字正交解调的目的就是要提取这两个相互正交的分量以便后续处理。

采样率 f_s 可根据带通采样定理确定, 即:

$$f_s = \frac{4f_0}{2M-1}, f_s \geq 2B \quad (3)$$

其中, M 为正整数, B 为中频带宽。

一种典型的中频采样数字正交解调相位检波器如图 1。

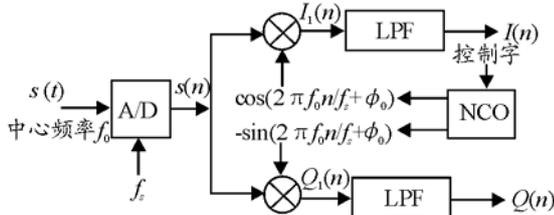


图 1 数字正交相位检波器

中频回波信号 $s(t)$ 经 A/D 采样后成为数字序列信号 $s(n)$, 然后分别与 2 个正交本振序列 $\cos(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0)$ 和 $-\sin(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0)$ 相乘, 得:

$$I_1(n) = s(n) \times \cos(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0) = \frac{a(n/f_0)}{2} \cos[4\pi f_0 n / f_s + 2\pi n f_d / f_s - 2\pi f_0 R_0 / C + 2\phi_0] + \frac{a(n/f_0)}{2} \cos[2\pi f_d n / f_s - 2\pi f_0 R_0 / C] \quad (4)$$

$$Q_1(n) = s(n) \times [-\sin(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0)] = -\frac{a(n/f_0)}{2} \sin[4\pi f_0 n / f_s + 2\pi n f_d / f_s - 2\pi f_0 R_0 / C + 2\phi_0] + \frac{a(n/f_0)}{2} \sin[2\pi f_d n / f_s - 2\pi f_0 R_0 / C] \quad (5)$$

$I_1(n)$ 、 $Q_1(n)$ 经低通滤波器滤除倍频分量和带外信号, 即可得到所需的正交信号 $I(n)$ 和 $Q(n)$ 。

1.2 相参信号获取

对于全相参体制的雷达, 发射信号、本振信号和相参信号均由一个高稳定性和高纯度的信号源同步产生, 它们之间保持着严格固定的相位关系, 现代雷达多使用固态发射机的全相参雷达, 相参信号很容易获取。对于接收相参体制的雷达, 进行数字正交解调时, 就必须获得精确的发射信号初始相位信息来控制 NCO 产生初相与发射脉冲一致的相参信号。

用数字混频滤波提取发射信号初始相位, 可取代相干振荡器等模拟器件, 降低模拟器件不稳定引起的误差, 原理与数字正交相位检波相同, 如图 2。

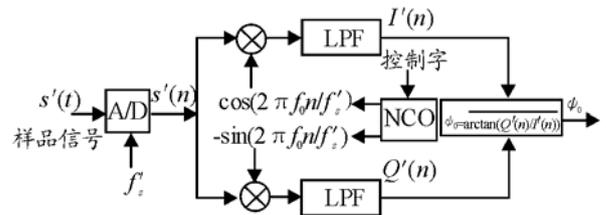


图 2 数字混频滤波法提取发射信号初始相位原理图

携带发射信号相位信息的中频样品信号 $s'(t) = a'(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi_0)$, 其中, $a'(t)$ 为样品信号振幅, 其他参数的定义同式(1)。 $s'(t)$ 在 A/D 中以 f_s' 的频率进行采样, 然后分成两路, 分别与由数控振荡器 (NCO) 产生的相互正交的解调信号 $\cos(2\pi f_0 n / f_s')$ 和 $-\sin(2\pi f_0 n / f_s')$ 相乘, 经低通滤波后得到 $I'(n) = a'(n/f_s') \cos(\phi_0)$ 和 $Q'(n) = a'(n/f_s') \sin(\phi_0)$ 两路信号, 具体推导过程与式 (4) 和式 (5) 类似。将 $I'(n)$ 、 $Q'(n)$ 两路信号相除并求反正切, 即可得到初始相位 $\phi_0(n)$, 再将 $\phi_0(n)$ 在样品信号稳定时间段内求平均, 得到 $\phi_0 = \arctan(Q'(n)/I'(n))$, 经处理后作为正交相位检波器中 NCO 的初始相位控制字, 产生相参信号 $\cos(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0)$ 和 $-\sin(2\pi f_0 n / f_s + \phi_0)$ 。

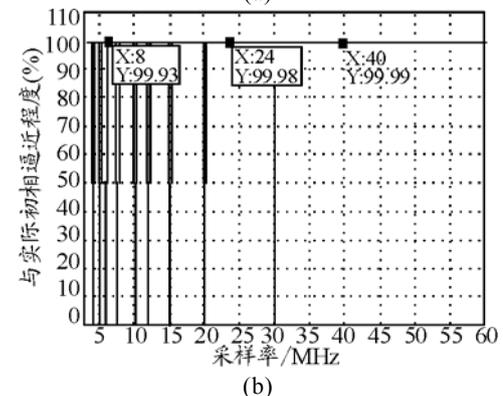
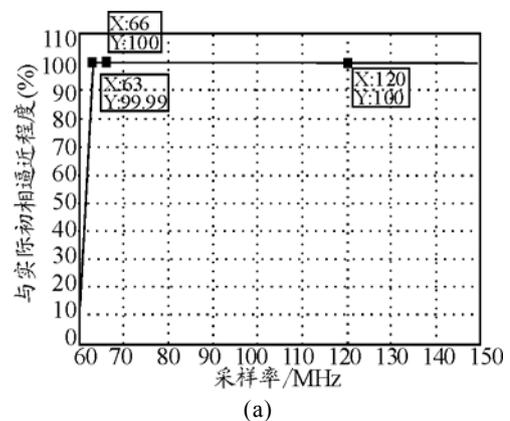


图 3 采样率与 ϕ_0 精度的关系

对样品信号的采样率 f_s' 越高, 获得的 ϕ_0 越精确。仿真实验结果如图 3(a) 所示, 对于 $f_0 = 30$ MHz 的样品信号, 当 $f_s' = 63$ MHz 时, 求得 ϕ_0 的精度可达到 99.99%, 当 $f_s' \geq 66$ MHz 时, 可以达到 100%。

根据带通采样定理, 由式 (3) 确定 f_0' 分别取 8 MHz、24 MHz 和 40 MHz 等值时, 如图 3(b) 所示, ϕ_0 均可以获得 99.9% 以上的精度。在对相位精确度要求不高的情况下可以进一步降低采样率 f_s' 。

对初始相位的提取可以由单独的数字正交解调器完成, 在雷达信号每个脉冲重复周期内只需要求得一个初始相位, 不会给以 DSP、FPGA 等高速运算器件为核心的信号处理单元带来额外的负担。目前, 高速 A/D 器件已经成熟, 成本较低, 完全能够用较高的采样率来保证获取的初始相位精度。

2 仿真分析

根据某型接收相参雷达信号体制, 设置如下仿真条件: 雷达发射信号频率 $f_t = 9\ 370$ MHz, 发射脉冲重复频率 $f_r = 2$ KHz, 脉冲宽度 $\tau = 0.5$ μ s, 回波信号经混频滤波后的中频频率 $f_0 = 30$ MHz, 信号带宽 $B = 2$ MHz, 采样率 f_s 由式 (3) 确定, 取 $M = 8$ 得:

$$f_s = \frac{4f_0}{2M - 1} = 8\text{ MHz}, \text{ 取 } f_s' = 120\text{ MHz}.$$

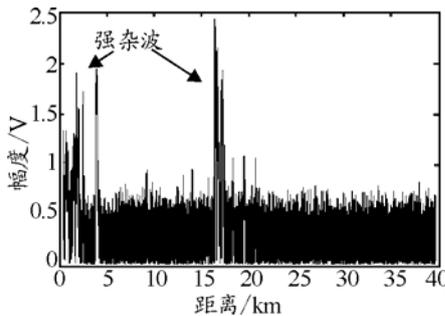


图 4 中频回波信号

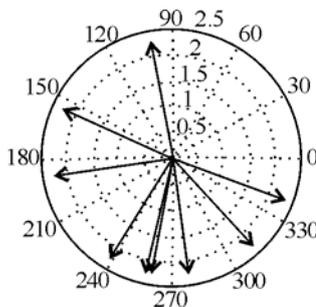


图 5 同一距离单元回波信号相位分布

仿真所用信号来自该型雷达实际采集信号, 由

图 4 可知, 中频回波信号中存在大量强杂波。由于该雷达采用磁控管发射机, 9 个相邻周期回波信号同一距离单元上的相位分布具有随机性, 如图 5。

用相干振荡器输出作为相参信号对中频回波进行正交解调, 9 个相邻周期同一距离单元上的相位分布如图 6, 相位补偿误差较大。将正交解调后的信号进行二次对消后杂波残留较多, 如图 7。

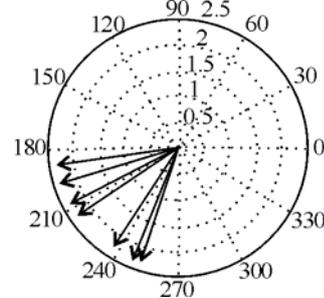


图 6 用相干振荡器输出进行正交解调后的相位分布

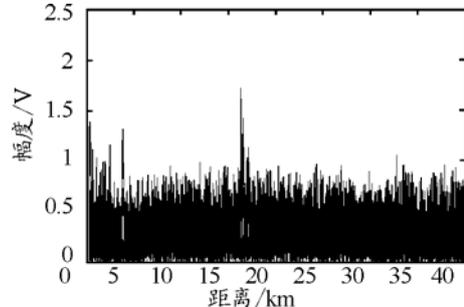


图 7 二次对消后的信号

采用混频滤波法从样品信号中提取发射信号的初始相位, 对中频回波信号进行数字正交解调, 9 个相邻周期同一距离单元上的相位分布如图 8, 相位补偿误差比图 6 明显减小, 二次对消的效果 (如图 9) 也比图 7 有明显提升。

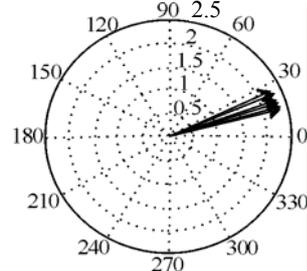


图 8 混频滤波法提取初始相位解调后的相位分布

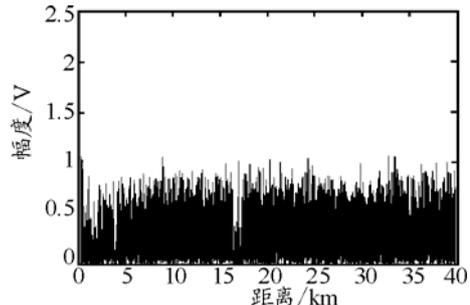


图 9 二次对消后的信号 (下转第 12 页)

2 总舰尾流扰动速度

在舰载飞机进舰速度为 65 m/s, 稳态风速为 18 m/s, 舰船纵摇幅值为 1.05°, 频率为 0.62 rad/s 的条件下, 总的紊流扰动如图 8, 水平扰动速度受各个分量的影响均较为显著, 而垂直扰动速度则主要受周期性空气尾流分量和随机尾流分量的影响, 而另外两个分量的影响并不太明显。

3 结束语

通过计算机仿真得出了总的舰尾流在水平方向和垂直方向产生的扰动速度, 可为后续舰载飞机着舰控制系统的设计提供一定的理论依据。

(上接第 5 页)

参考文献:

[1] 吕俊军. 白蛉导弹战斗能力辨识[J]. 飞航导弹, 1999(8): 13-17.

[2] 顾文锦, 赵红超. 超声速反舰导弹末端非平面机动研究[J]. 飞行力学, 2003, 21(3): 36-40.

[3] 陈万春, 聂蓉梅, 刘佳琪, 等. PAC-3爱国者拦截弹末制导精度仿真研究[J]. 飞航导弹, 1999, 19(7): 57-62.

[4] 崔静, 姜玉宪. 拦截导弹动力学特性对摆动式机动策略突防效果的影响[J]. 宇航学报, 2001, 22(5): 33-38.

[5] Ohlmeyer EJ. Root-mean-square miss distance of proportional navigation missile against sinusoidal target. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(3): 563-568.

[6] Takehira T, Vinh N X and Kabamba P T. Analytical solution of missile terminal guidance. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(2): 342-348.

(上接第 8 页)

相干振荡器的不稳定性会造成相参信号幅度和相位的偏移, 影响视频信号的质量, 进而影响后续 MTI 系统性能。

3 结束语

仿真实验表明, 用数字混频滤波法获得相参信号, 并用数字正交解调代替模拟相位检波器能够明显提升检波精度, 增强后续 MTI 处理的效果。该方法对传统接收相参体制雷达接收机的数字化改造和现代雷达信号处理系统设计都具有一定参考价值。

参考文献:

[1] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.

[2] 刘东红, 张永顺, 田海林. 全数字 MTI 正交双通道的实现[J]. 无线电通信技术, 2004, 30(5): 53-55.

参考文献:

[1] 耿建中, 姚海林, 张宏. 舰尾流对舰载飞机下滑特性影响研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 18(21): 5940-5943.

[2] David J. Moorhouse, Robert J. Woodcock. Background Information and User Guide for MIL-F-8785C, Military Specification Flying Qualities of Piloted Airplanes[S]. 1981, 189-193.

[3] 军用规范有人驾驶飞机的飞行品质(MIL-F-8785C)[S]. 陕西: 飞行力学杂志社, 1982, 48-52.

[4] 肖亚伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 70-71.

[5] 王文涛, 张志春. 直升机着舰动力学特性仿真[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 68-70.

[7] 马良, 姜青山, 等. 反舰导弹对舰空导弹的机动突防模型研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(2): 185-188.

[8] 顾文锦, 毕兰金, 武志东. 基于伴随技术的超音速反舰导弹末端机动突防的脱靶量分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(4): 400-404.

[9] 顾文锦. 反舰导弹的过载控制[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(1): 14-18.

[10] 顾文锦, 赵红超, 等. 导弹末端机动的一体化控制模型[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 677-680.

[11] 马春茂. 弹炮结合防空武器系统总体设计[M]. 国防工业出版社, 2008.

[12] 顾文锦. 变轨与突防概率研究报告[M]. 海军航空工程学院, 2005.

[13] 崔静. 导弹机动突防理论及应用研究[M]. 北京航空航天大学, 2001: 41-58.

[14] 唐震, 王希全, 包小林. 潜射战术导弹模拟训练系统的设计[J]. 四川兵工学报, 2009(4): 30-32.

[3] 宋玉清, 黑立相. 相参雷达接收机建模与仿真分析[J]. 兵工自动化, 2009, 28(2): 36-38.

[4] 马晓岩, 向家彬, 等. 雷达信号处理[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.

[5] Mitola J. The software radio architecture[J]. IEEE Communication Magazine, 1995, 33(5): 26-38.

[6] 吴顺君, 梅晓春, 等. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[7] 黄婷. 雷达信号处理系统的设计与 FPGA 实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

[8] 刑燕. 中频采样和数字正交器的原理及工程实现[J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 42-44.

[9] 范文晶, 王海, 周渭, 等. 基于 MATLAB 的数字下变频器的设计与仿真应用[J]. 测试测量技术, 2009(3): 37-40.

[10] 魏永豪, 袁晓, 安红. 带通采样定理与中频采集数字正交检波[J]. 现代雷达, 2006, 28(12): 36-38.

[11] 杨井胜. 基于 Labview 的雷达接收自动测试系统设计[J]. 四川兵工学报, 2009(7): 24-27.