

## 单脉冲雷达的一种角误差提取方法

梁士龙, 郝祖全

(中国航天科工集团二院 25 所, 北京 100854)

**摘要:**给出了单脉冲雷达数字接收机的一种角误差提取方法,采用中频直接采样和数字下变频技术,可以克服模拟接收机合并通道方法中方位与俯仰通道互耦的问题,也可以克服零中频接收机模拟下变频正交双通道幅相不一致问题。与一种零中频正交通道检测方法进行了比较,结果表明,这种方法可以有效克服零值深度对单脉冲雷达角误差测量的影响,性能优于后者。

**关键词:**单脉冲雷达;角误差提取;零值深度

**中图分类号:**TN957.51 **文献标识码:**A

## A Method of Angle Error Extraction for Monopulse Radar

LIANG Shi-long, HAO Zu-quan

(Institute No. 25, the Second Academy, CASIC, Beijing 100854, China)

**Abstract:** A method of angle error extraction for monopulse radar is provided. IF direct sampling and digital down converting techniques are adapted in the new method. With this method, the coupling problem between azimuth and elevation channel occurred in channel emerging method is avoided, and also, the amplitude and phase imbalance between I and Q channel existed in analog down converting technique eliminated. It is compared with a traditional extraction method utilizing zero IF quadrature channels technique. Results show that the new method overcomes the non-ideal null depth effect on angle error extraction of monopulse radar, and the performance is better than the traditional method.

**Keywords:** Monopulse radar; Angle error extraction; Null depth

## 1 引言

单脉冲和差比幅测量角误差的公式为

$$\delta = \frac{\Delta}{\Sigma} \cos \varphi \quad (1)$$

式中  $\delta$ ——角误差;  $\Delta$  和  $\Sigma$ ——差信号与和信号的幅度;  $\varphi$ ——和差信号的相位差。从式(1)可看出,当和差通道的幅频特性和相频特性不一致时,将引起和差信号幅度比值和相位差的偏移,从而引起测量角误差的偏移。为了减小和差通道幅相不一致的影响,在模拟接收机中经常采用和差接收通道合并的方法,即采用频分复用或时分复用技术,在一个通道内传输和差三通道信号,然后设法恢复各通道的信号,进行比幅和鉴相,提取角误差,但这种方案的缺点是产生方位角与俯仰角通道的互耦和信噪比损失。

对于零中频接收机,雷达工作者提出采用和差三通道正交解调,如图1所示。中频信号经过正交解调后,转换成零中频正交信号。

和差通道正交解调的输出信号为

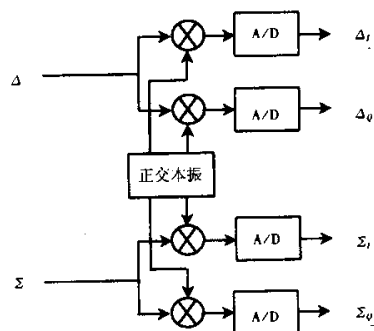


图1 正交解调提取角误差方法

$$\begin{aligned} \Sigma_I &= \frac{1}{2} \Sigma \cos \varphi_\Sigma & \Sigma_Q &= \frac{1}{2} \Sigma \sin \varphi_\Sigma \\ \Delta_I &= \frac{1}{2} \Delta \cos \varphi_\Delta & \Delta_Q &= \frac{1}{2} \Delta \sin \varphi_\Delta \end{aligned} \quad (2)$$

因此

$$\begin{aligned} \Sigma &= 2\sqrt{\Sigma_I^2 + \Sigma_Q^2} & \Delta &= 2\sqrt{\Delta_I^2 + \Delta_Q^2} \\ \Sigma_I \Delta_I + \Sigma_Q \Delta_Q &= \frac{1}{4} \Sigma \Delta \cos(\varphi_\Sigma - \varphi_\Delta) = \frac{1}{4} \Sigma \Delta \cos \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

然后,通过比较差信号与和信号的模值确定角误差大小,通过判断正交信号经运算后的符号来确定角误差的方向<sup>[1]</sup>。角误差计算公式为

$$\delta = \operatorname{sgn}(\Sigma_I \Delta_I + \Sigma_Q \Delta_Q) \frac{\sqrt{\Delta_I^2 + \Delta_Q^2}}{\sqrt{\Sigma_I^2 + \Sigma_Q^2}} \quad (4)$$

当和差通道的相移小于  $\pm 90^\circ$  时,角误差符号判决正确,且不影响角误差的大小,因此仅从和差通道混频器和中频放大器的相频特性的角度考察,这种方法是适用的。但是这种方法也存在两个缺点(1)在引入正交解调的同时,也引入了  $I$ 、 $Q$  通道幅相特性不一致的新问题(2)由于馈源结构和微波电路的不对称,在和差器前面的微波系统中要引入高频相移,和差器的两个输入信号就不同相,如图 2 所示,即使等信号轴对准目标,进入和差器的两个信号虽然幅度相同,但由于相位不同,而使得差信号不为零。因此,如果利用式(4)计算角误差,则角误差不为零。也就是说,由于零值深度的影响,在角误差接近零时,测量结果有可能找不到角误差零点。这对于跟踪雷达是致命的,因为它直接影响到角跟踪精度。

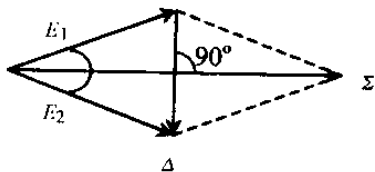


图 2 高频相移对和差信号的影响

## 2 数字接收机的角误差提取方法

数字接收机是在中频直接对信号采样,然后采用数字下变频进行正交解调,其示意图如图 3 所示。与零中频测角方法比较,数字接收机采用数字正交载波进行解调,可以有效避免模拟正交通道幅相特性不一致的问题。

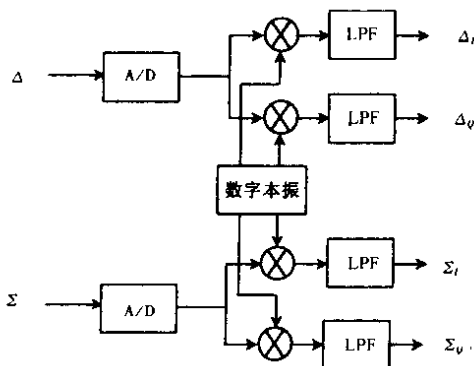


图 3 数字接收机测角框图

在角误差提取方法上,由式(1)与式(3)可以看到

$$\delta = \frac{\Delta}{\Sigma} \cos \varphi = \frac{\Sigma_I \Delta_I + \Sigma_Q \Delta_Q}{\Sigma_I^2 + \Sigma_Q^2} \quad (5)$$

比较式(4)和式(5)可以看到,式(5)采用了模拟接收机

的处理方法,即相位信息不但用于确定角误差的方向,而且参与角误差大小的计算。这样做的好处是,当等信号轴对准目标时,如果在和差器前面的微波系统中只存在高频相移,而不存在幅度不平衡,则和差器两个输入信号大小相同,因而输出的和信号和差信号的相位差保持为  $90^\circ$ ,如图 2 所示。因此,即使差信号  $\Delta$  不为零,由于  $\cos \varphi$  等于零,因此用式(5)计算角误差仍然为零。

## 3 性能分析与仿真

影响单脉冲和差比幅测角误差的幅相因素有和差器前面两个输入信号的高频相移  $\varphi$  和幅度不平衡  $\alpha$ ,和差器后面和差通道引入的中频相移  $\theta$  和中频幅度不平衡  $\beta$ ,它们对用式(4)和式(5)计算角误差的两种方法的影响不尽相同。在下面的仿真实验中,考虑上述因素,和差器的两个输入信号幅度分别为  $\alpha E_1$  和  $E_2$ ,两个信号之间的相位差为  $\psi$ ,利用向量叠加方法,可获得的和差信号幅度分别为

$$E_\Sigma = \sqrt{(\alpha E_1)^2 + E_2^2 + 2\alpha E_1 E_2 \cos(\psi)} \quad (6)$$

$$E_\Delta = \sqrt{(\alpha E_1)^2 + E_2^2 + 2\alpha E_1 E_2 \cos(\psi)} \quad (7)$$

通过几何关系可以求出和差信号之间的相位差

$$\omega = \arccos\left(\frac{E_\Sigma^2 + (\alpha E_1)^2 - E_2^2}{2\alpha E_1 E_\Sigma}\right) + \arccos\left(\frac{E_\Delta^2 + (\alpha E_1)^2 - E_2^2}{2\alpha E_1 E_\Delta}\right)$$

如果再考虑中频相移和幅度不平衡,则式(4)和式(5)可分别用式(9)和式(10)表示为

$$\delta = K \frac{\beta E_\Delta}{E_\Sigma} \quad (9)$$

$$\delta = K \frac{\beta E_\Delta}{E_\Sigma} \cos(\theta + \omega) \quad (10)$$

式中  $K$ ——定向斜率,本文中定向斜率取  $0.05^\circ/\%$ 。

仿真结果如图 4 所示。为了便于说明问题,把式(9)的计算方法称为方法 1,计算曲线称为  $m_1$ ,式(10)计算的方法称为方法 2,计算曲线称为  $m_2$ 。

对于方法 1:

(a) 和差器前面的高频相移  $\psi$ ,使得角误差测量值在零值附近不连续,找不到过零点;

(b) 和差器前面的幅度  $\alpha$  不平衡,引起瞄准轴偏移;

(c) 中频相移  $\theta$  对角误差测量无影响;

(d) 中频幅度  $\beta$  不平衡,使实际定向斜率偏离理想斜率(测角灵敏度降低)。

对于方法 2:

(a) 和差器前面的高频相移  $\psi$  对角误差测量无影响;

(b) 和差器前面的幅度  $\alpha$  不平衡,引起瞄准轴偏移;

(c) 中频相移  $\theta$  或中频幅度不平衡  $\beta$ ,使实际定向斜率偏离理想斜率(测角灵敏度降低)。

从上面的比较结果看出,高频和中频幅度不平衡对两种方法的影响是相同的,但在相位方面,方法 1 对于中频相移特

性不敏感,但对高频相移敏感,方法2对于高频相移特性不敏感,但中频相移对它有影响。综合考虑各种因素,两种方法各有利弊。在实际应用中,要看哪些因素的影响容易排除。

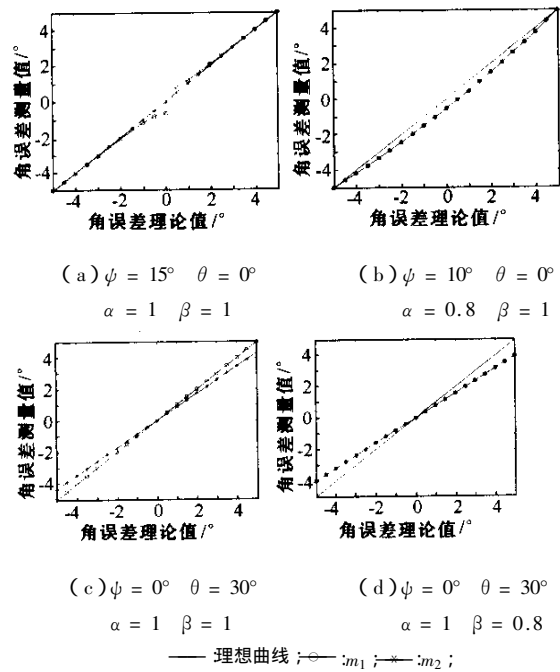


图4 幅相不平衡对角误差测量的影响

相对而言,和差通道的中频幅相一致性容易得到校正。在数字接收机中,改变数字下变频器的载波相位,测量基准信号的角误差,把角误差输出值最大时的载波相位作为校正后的相位值,就完成了相位校正。之后,把基准信号角误差的测量值与理想值比较,得出定向斜率校正系数,用该系数对测量值进行校正,即可完成幅度校正。而高频相移则不好校正,甚至不能准确测量,只能根据零值深度判断高频相移的严重程度。零值深度与高频相移之间的关系<sup>[3]</sup>可表示为

$$D = -20\log(1.885\sin(\frac{\psi}{2})) \tag{11}$$

一般情况下,地面雷达的零深可做到35dB,机载或弹载雷达的零值深度要求在25dB~30dB左右。

图5(a)~图5(d)分别给出了高频相移为3°、4°、5°、6°时,两种方法的计算结果(对应的零值深度分别为31.6dB、29.1dB、27.2dB、25.6dB)。方法1的最大测量误差值出现在零点,分别为0.13°、-0.17°、-0.22°、-0.26°。方法2在零点处的误差为零,最大误差值出现的位置与定向斜率有关,图5中方法2的误差值可以忽略。从图5可看出,零值深度

越小,方法1的过零点突变问题越为明显,而且随着零深减小,定向斜率也变为非线性,而方法2受到的影响很小。对于跟踪雷达,进入跟踪状态后,角误差通常在零值附近调整,零值左右的测角精度对于保证跟踪精度是至关重要的,一般要求测角精度小于0.1°。对于方法1,仅高频相移引入的误差就大于0.1°,加之和差通道的幅度不平衡和低信噪比情况下通道噪声的影响,方法1不能满足高精度跟踪雷达的要求。对于方法2,由高频相移引入的误差远远小于0.01°,显然测角精度优于方法1。另外,方法2不用开根号,也不用判断符号,所以大大减少了计算量。

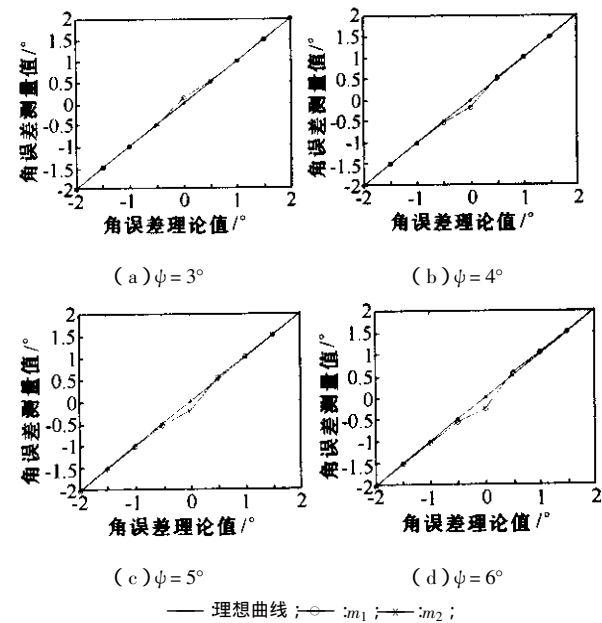


图5 高频相移对角误差测量的影响

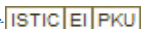
4 结 论

本文提出了单脉冲雷达数字接收机的一种角误差提取方法,这种方法采用中频直接采样和数字正交解调下变频技术,解决了模拟接收机合并通道方法中方位与俯仰通道的互耦问题。也解决了零中频接收机模拟下变频正交双通道幅相不一致问题。在角误差的提取方法上作了改进,和差通道的相位信息不但用于确定角误差的方向,而且参与角误差大小的计算,当等信号轴对准目标时,即使受零值深度的影响,差信号不为零,角误差输出仍然为零。解决了传统正交检测方法中存在的过零点突变问题,提高了角跟踪精度。

参考文献:

[1]高梅国,周闻.和差数字鉴相分析[J].系统工程与电子技术,2000 22(1):28-29.  
[2]丁鹭飞,张平.雷达系统[M].西北电讯工程学院出版社,1984.  
[3]张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.

# 单脉冲雷达的一种角误差提取方法

作者: 梁士龙, 郝祖全  
作者单位: 中国航天科工集团二院25所, 北京, 100854  
刊名: 系统工程与电子技术   
英文刊名: SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS  
年, 卷(期): 2003, 25(1)  
被引用次数: 6次

## 参考文献(3条)

1. 张光义 相控阵雷达系统 1994
2. 丁鹭飞;张平 雷达系统 1984
3. 高梅国;周闰 和差数字鉴相分析[期刊论文]-系统工程与电子技术 2000(01)

## 引证文献(6条)

1. 郑琼. 李明 机载雷达基于TigerSHARC测角系统的实现[期刊论文]-电子科技 2010(12)
2. 张筱靖. 苏宏艳. 朱淮城 角跟踪系统中零值深度的研究[期刊论文]-现代雷达 2009(6)
3. 李相平. 吴巍. 李峥 反舰导弹末制导雷达数字信号处理技术[期刊论文]-制导与引信 2006(2)
4. 李相平. 吴巍. 段鲁生 末制导雷达实验系统数字信号处理研究[期刊论文]-弹箭与制导学报 2006(2)
5. 王刚 脉冲多普勒导引头角跟踪系统建模与仿真技术研究[学位论文]硕士 2006
6. 梁士龙. 郝祖全 单脉冲雷达数字接收机幅相不平衡的一种校正方法[期刊论文]-系统工程与电子技术 2003(2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_xtgcydzjs200301006.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xtgcydzjs200301006.aspx)