

二次差频测距新方法及其性能分析*

袁俊泉,皇甫堪,王 展

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 提出了一种基于二次差频测距的新方法。对其测距原理进行了详细推导,提出了简化发射机设计与便于后续信号处理的频点选取准则。理论分析了正确解模糊对信噪比的要求。通过与参差多频测距方法进行比较,分析了该方法的优越性。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词 多频测距;二次差频;信噪比

中图分类号:TN958.94 文献标识码:A

A New Ranging Method Based on Quadric Difference Frequency and the Analysis of Its Performance

YUAN Jun-quan, HUANGFU Kan, WANG Zhan

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A new ranging method based on quadric difference frequency is presented. The principle of ranging is deduced in details. The rules for frequency selection are proposed, which make convenient the design of transmitter and later signal processing. The need for SNR is analyzed when solving ambiguity correctly. Compared with the uneven ranging method, its advantages are proved. Simulation results verify the validity of the method.

Key words multiple frequency ranging; quadric difference frequency; SNR

为了克服双频连续波测距时测距精度与最大不模糊距离之间的矛盾,连续波雷达常采用多频测距体制^[1]。而在多频测距雷达中,测距的关键在于如何利用多频解模糊来捕获目标。在捕获到目标后,可以利用双频测距或速度积分的方法来跟踪目标,提高测距性能^[2]。多频测距解模糊的实现方式有两种:二次差频和参差双频。二次差频测距方法的原理简单,连续波测距雷达的接收机和发射机设计相对容易,因此二次差频测距是设计多频测距雷达的一种较好方案。

1 二次差频测距的数学模型

设 f_0 为二次差频测距的基本频点, f_1, f_2, \dots, f_n 为相应的 n 个双频频点, 则 n 个一次频差分别为 $\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_n$, 且满足 $\Delta f_1 < \Delta f_2 < \dots < \Delta f_n$, 相应的 $n-1$ 个二次频差为 $\Delta^2 f_1, \Delta^2 f_2, \dots, \Delta^2 f_{n-1}$ 。

1.1 二次差频测距的基本原理

设 $\Delta R (= R_2 - R_1)$ 为两次测量目标移动的径向距离, 则二次差频 $\Delta^2 f_i$ (即 $f_2 - f_1$) 的测距相位差为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = 2\pi(f_2 - f_1) \frac{2R_2}{c} + 2\pi\Delta f_1 \frac{2\Delta R}{c} \quad (1)$$

其中 $\Delta\varphi_1 (= 2\pi\Delta f_1 \frac{2R_1}{c})$ 为频差 Δf_1 产生的相位差, $\Delta\varphi_2 (= 2\pi\Delta f_2 \frac{2R_2}{c})$ 为频差 Δf_2 产生的相位差。令

$$\Delta\varphi' = \Delta\varphi - 2\pi\Delta f_1 \frac{2\Delta R}{c} \quad (2)$$

于是,得到了与双频测距完全相同的测距公式

* 收稿日期 2004-09-10

作者简介:袁俊泉(1976—),男,博士生。

$$R_2 = \frac{c}{4\pi(f_2 - f_1)} \Delta\varphi' = \frac{c}{4\pi\Delta f} \Delta\varphi' \quad (3)$$

不同的是,这里的 Δf 为二次频差 $\Delta\varphi'$ 为二次相位差的修正值。

1.2 二次差频测距的频点选择准则

采用二次差频测距,对频点的选择没有非常严格的要求。但为了简化发射机的设计,便于实时数据处理及事后数据处理,二次差频测距的频点选择可以遵循以下几个准则:

(1)为了从根本上克服盲速和交调失真的影响,要求二次差频测距雷达的第一次频差 Δf_1 必须大于接收机带宽,同时大于目标最大多普勒频率的两倍。

(2)相邻两个频差之差,以 k 倍递增,即

$$\Delta f_{i+1} - \Delta f_i = k(\Delta f_i - \Delta f_{i-1}) \quad (4)$$

(3)二次差频的第 1 个二次频差取决于最大不模糊距离,要求

$$\Delta^2 f_1 = \Delta f_2 - \Delta f_1 \approx \frac{c}{2R_{unamb}} \quad (5)$$

(4)二次差频的最后 1 个二次频差满足

$$\Delta^2 f_{n-1} = \Delta f_n - \Delta f_{n-1} \approx \frac{1}{k} \Delta f_n \quad (6)$$

(5)由二次差频的第 1 个频差 Δf_1 计算得到的等效波长 $\lambda_{\text{等效}1}$ 近似等于目标尺寸 A 的 p 倍,即

$$\lambda_{\text{等效}1} = \frac{c}{\Delta f_1} \approx pA \quad (7)$$

(6)由二次差频的最后 1 个频差 Δf_n 计算得到的等效波长 $\lambda_{\text{等效}n}$ 近似等于目标尺寸 A 的 q 倍,即

$$\lambda_{\text{等效}n} = \frac{c}{\Delta f_n} \approx qA \quad (8)$$

(7)二次差频频点的个数 n 满足

$$n = \left[\frac{\lg(\Delta f_n) - \lg(\Delta^2 f_1)}{\lg k} \right] + 1 \quad (9)$$

式中 $[\]$ 表示取整。

需要指出的是,由于选取准则中给出的公式许多是近似条件,因而频点参数选择时可以稍微灵活一些。

1.3 正确解模糊对信噪比的要求

设当前级二次频差 $\Delta^2 f_i$ 所对应的测距误差均方根为 σ_i ,上一级二次频差 $\Delta^2 f_{i-1}$ 对应的测距误差均方根为 σ_{i-1} ,则满足

$$\sigma_{i-1} = k\sigma_i \quad (10)$$

其中 $\sigma_i = \frac{R_u}{2\pi\sqrt{SNR}}$, R_u 为二次频差 $\Delta^2 f_i$ 对应的最大不模糊距离。

要获得正确解模糊,则应满足

$$\alpha(\sigma_i + \sigma_{i-1}) \leq \frac{R_u}{2} \quad (11)$$

其中 α 为置信区间,常取 $\alpha = 3$ 。

可以得出,二次差频正确解模糊对信噪比的要求为

$$SNR \geq (k+1)^2 \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \quad (12)$$

式中, SNR 为 FFT 输出后的信噪比。

2 二次差频测距方法的性能分析

文献[3]对参差多频测距方法的基本原理及正确解模糊对信噪比的要求进行了详细分析。为此,我们基于两种测距方法的性能比较,对二次差频测距方法的性能进行分析。

假设某连续波雷达要求:最大作用距离 $R_{\max} = 300\text{km}$,测距精度 $\sigma_R = 1\text{m}$ ($\text{SNR} = 25\text{dB}$),目标的最大速度为 1000m/s ,对应的最大多普勒速度 $f_{d\max} \approx 70\text{kHz}$,取接收机的带宽为 200kHz ,目标的尺寸为 15m ,二次差频比 k 为 6。

2.1 频点个数及正确解模糊所需信噪比的比较

对于参差多频测距而言,选择有关的一些参数^[3],所得到的结果如表 1 所示,表中取 $4q = 1$,即 $p_i = m_i$ 。

表 1 参差多频测距的各项参数

Tab. 1 Parameters of uneven multiple frequency ranging

参差重数	Δf_0 (MHz)	p_i	R_{unamb} (km)	q	σ_R (m) $\text{SNR} = 25\text{dB}$	正确解模糊最低 SNR (dB)
2	2.7	8, 9	4	0.2499	2.1	21.7
3	2.7	7, 8, 9	28	0.2499	1.62	21.7
4	2.7	5, 7, 8, 9	140	0.2499	1.3	21.7
4	5.4	9, 10, 11, 13	358	0.2499	0.954	24.9

对于二次差频测距而言,根据连续波雷达提出的要求,可得:

- (1) 由于最大作用距离 $R_{\max} = 300\text{km}$,根据公式(5)得 $\Delta^2 f_1 \approx 500\text{Hz}$;
- (2) 目标的尺寸为 15m , k 取为 6,根据公式(7)与(8)得 $\Delta f_1 \approx 4\text{MHz}$, $\Delta f_n \approx 5\text{MHz}$;
- (3) 由准则(7)可得, $n = 6$;
- (4) 根据公式(12),可以得到二次差频测距正确解模糊所需的最低信噪比为 16.5dB 。由此,可得到二次差频测距雷达的频率参数,如表 2 所示。

表 2 二次差频的频率参数

Tab. 2 Frequency parameters of quadric difference frequency

双频频点	一次频差	二次频差
f_0, f_1	$\Delta f_1 = 4\text{MHz}$	
f_0, f_2	$\Delta f_2 = \Delta f_1 + 500\text{Hz} = 4.0005\text{MHz}$	$\Delta^2 f_1 = 500\text{Hz}$
f_0, f_3	$\Delta f_3 = \Delta f_2 + 3\text{Hz} = 4.0035\text{MHz}$	$\Delta^2 f_2 = 3\text{kHz}$
f_0, f_4	$\Delta f_4 = \Delta f_3 + 18\text{kHz} = 4.0215\text{MHz}$	$\Delta^2 f_3 = 18\text{kHz}$
f_0, f_5	$\Delta f_5 = \Delta f_4 + 108\text{kHz} = 4.1295\text{MHz}$	$\Delta^2 f_4 = 108\text{kHz}$
f_0, f_6	$\Delta f_6 = \Delta f_5 + 648\text{kHz} = 4.7775\text{MHz}$	$\Delta^2 f_5 = 648\text{kHz}$
f_0, f_6	$\Delta f_6 = \Delta f_5 + 648\text{kHz} = 4.7775\text{MHz}$	$\Delta^2 f_6 = \Delta f_6 = 4.7775\text{MHz}$

由表 1 可见,当选择参数 $\Delta f_0 = 5.4\text{MHz}$, $p_i = 9, 10, 11, 13$ 时,参差多频测距所得结果可以满足连续波测距雷达设计的要求。而对于二次差频测距,只要按照表 2 的频点设计连续波雷达,即可达到指标要求。

比较二者的结果,采用参差多频测距时,雷达需要发射 4 对双频,而采用二次差频测距,则需要发射 6 对双频,因而采用参差多频测距所需的频点数要比采用二次差频测距所需的频点数少。随着现代电子技术的发展,雷达接收机通常采用 DDS 技术来实现,因而频点个数对雷达接收机的设计影响不大。但参差多频正确解模糊所需的最低 $\text{SNR} = 24.9\text{dB}$,而对于二次差频测距正确解模糊所需的最低信噪比为 $\text{SNR} = 16.5\text{dB}$ 。对信噪比的要求降低了近 8dB ,这对现代军事雷达来说非常重要。

2.2 计算量的比较

参差多频测距解模糊可以采用基于一维主搜索— $(M-1)$ 维从搜索的快速算法来实现^[4],其所需的乘法次数为

$$\sum_{i=2}^M \left\{ (1 + k_{1\max}) \left[i \cdot \prod_{j=2}^i \left(1 + \frac{2 \cdot \sqrt{M(M-1)/2}}{m_j} \right) \right] \right\} + (2M-1)(1 + k_{1\max}) \quad (13)$$

所需的加法次数为

$$\sum_{i=2}^M \left\{ (1 + k_{1\max}) \left[(2i-1) \cdot \prod_{j=2}^i \left(1 + \frac{2 \cdot \sqrt{M(M-1)/2}}{m_j} \right) \right] \right\} + (4M-7)(1 + k_{1\max}) \quad (14)$$

其中, M 为参差数, $k_{1\max} = \prod_{i=2}^M m_i$ 。以表 1 中最后一组参数为例,基于快速算法所需的乘法次数为 22 896,所需的加法次数为 34 344。以 TI 公司的 TMS320C31 为例,其指令周期为 60ns。假设 DSP 完成一次乘法与一次加法各需一个指令周期,则完成上述乘法与加法运算共需要 3.4ms,这不包括解模糊操作中所涉及的逻辑运算开支。

而二次差频测距解模糊算法非常简单,因而计算量非常小,为 DSP 处理其它任务(如与其它设备通信、交换数据及相互控制)节省了大量时间,便于工程实现。

3 仿真

设目标作匀速直线运动,其运动方程是 $R = R_0 + vt$,其中,目标速度取 $v = 1000\text{m/s}$, $R_0 = 50\text{km}$ 。仿真产生某 X 波段连续波雷达零中频信号

$$\begin{cases} x^f(n) = e^{[\omega_{d0}n - 2\pi f_0 \frac{2R_0}{c}]} + v_0(n) \\ x^f(n) = e^{[\omega_{di}n - 2\pi f_i \frac{2R_0}{c}]} + v_i(n) \end{cases}$$

其中, $\omega_{d0} = 2\pi f_{d0} T_s$, $\omega_{di} = 2\pi f_{di} T_s$, T_s 为采样周期,取 $T_s = 5\mu\text{s}$ (对应采样频率 $f_s = 200\text{kHz}$), $v_0(n)$ 和 $v_i(n)$ 为高斯白噪声。

3.1 多频捕获双频跟踪的仿真结果

首先利用二次差频捕获目标,然后转入双频测距跟踪目标,得到的仿真结果如图 1 所示。图 1 为测距误差均方根与输入信噪比的关系曲线,从图中可以看出,对目标的跟踪距离为 50~130km,对应的输入信噪比约为 0~16.8dB。当输入信噪比低于 -16.8dB,即最大跟踪距离 R 超过 130km 时,用双频测距解模糊已经出现错误求解,而一旦出现错误求解,就很难保证后面还能继续得到正确解模糊。在正确跟踪目标时,测距误差的均方根趋近于克拉—美罗下界(CRLB)。

3.2 正确解模糊对信噪比的要求

为了比较参差多频测距与二次差频测距正确解模糊对输入信噪比的要求,以下的仿真实验结果在整个测量过程中均采用多频测距来实现。

图 2(a)为采用参差多频测距体制得到的测距误差与输入信噪比关系曲线,图 2(b)为采用二次差频测距体制得到的测距误差与输入信噪比关系曲线。采用参差多频测距体制,目标的跟踪距离为 50~70km,输入信噪比从 10dB 下降到 2.48dB,当输入信噪比继续下降时,出现错误解模糊,而不能正确跟踪目标。而对于二次差频测距体制,目标的跟踪距离为 50~123km,输入信噪比从 10dB 下降到 -5.64dB,当输入信噪比继续下降时,出现错误解模糊,而不能继续跟踪目标。

由上面的仿真结果可以看出,二次差频测距体制正确解模糊所需的信噪比要比参差多频测距体制正确解模糊所需的信噪比低 8.12dB,这与理论分析结果基本一致。

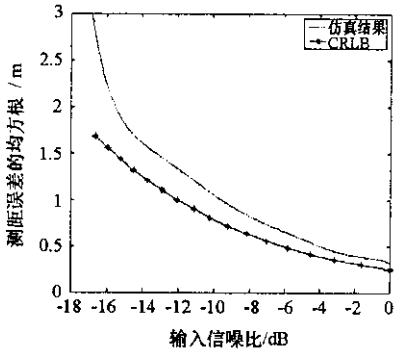
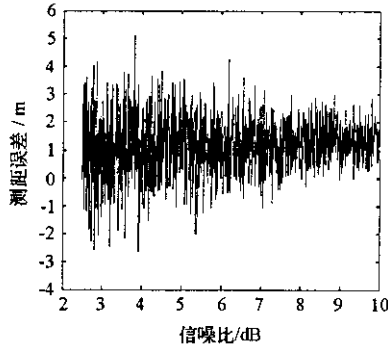
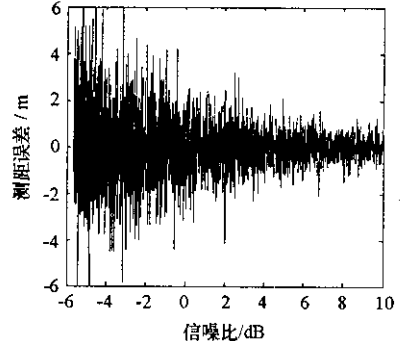


图1 双频跟踪时测距误差均方根与输入信噪比的关系曲线

Fig.1 Relation curve between ranging RMSE and input SNR for dual frequency tracking



(a) 参差多频测距



(b) 二次差频测距

图2 多频测距体制测距误差与输入信噪比关系曲线

Fig.2 Relation curve between ranging error and input SNR based multiple frequency ranging

4 结论

提出的二次差频测距新方法,相对于参差多频测距方法而言,具有原理简单,便于实时信号处理实现等优点。正确解模糊对信噪比的要求与参差多频测距方法相比,降低了近8dB,这为现代军事雷达提高测距性能扩展了更大的空间。仿真实验验证了该方法的有效性,为多频连续波测距雷达的设计提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Skolnik M. 雷达系统导论[M]. 北京:国防工业出版社,1992:79-82.
- [2] 袁俊泉,等. 一种提高数字化连续波雷达测距性能的新方法[J]. 信号处理,2004(1):86-89.
- [3] 许邦建,等. 噪声下数字化多频连续波雷达的测距模糊问题[J]. 电子学报,2002(6):903-906.
- [4] 许邦建,皇甫堪. 测距雷达解距离模糊的两种快速算法[J]. 电子科学学刊,2001(9):905-911.

