

多频连续波雷达两种测距算法研究

曹延伟 程 翥 皇甫堪

(国防科技大学电子科学与工程学院信号处理研究室 长沙 410073)

摘要: 该文分析了连续波雷达参差多频测距算法的局限性, 提出了多频连续波雷达的两种测距算法, 即多频到双频测距法和二次相差法, 并介绍了它们的基本原理。最后对两种方法进行了对比, 并进行了仿真。仿真结果表明, 两种测距算法都达到了比较高的测距精度, 在最后双频对应的最大不模糊距离相同的基础上, 两种算法的测距精度相当。

关键词: 多频到双频, 二次相差, 多频连续波雷达

中图分类号: TN953.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)05-0789-04

The Research on Two Algorithms for Multiple Frequency CW Radar Ranging

Cao Yan-wei Cheng Zhu Huangfu Kan

(School of Electron. Sci. and Eng., Nat. Univ. of Defence Tech., Changsha 410073, China)

Abstract This paper analyses the limitation of the algorithm of stagger multiple frequency for CW radar, and two algorithms are proposed. They are the algorithm of multiple frequency to dual frequency and the algorithm of quadratic phase difference. Their principles are introduced. Finally, two algorithm are compared with each other, simulation result is also given. The simulation result shows that two algorithms both reach high ranging accuracy. They have equivalent ranging accuracy if their maximal unambiguous ranges of the last dual frequency are the same.

Key words Multiple frequency to dual frequency, Quadratic phase difference, Multiple frequency CW radar

1 引言

多频连续波雷达具有设备简单, 测距精度高, 可同时测速等优点, 近年来随着现代靶场雷达建设和发展的需要, 其研究又逐步受到人们的重视。

双频连续波雷达测距的理论精度为^[1] $c/(4\pi\Delta f\sqrt{2SNR})$, 其中 Δf 为双频测距时所用频差, SNR 为比相输出信噪比, c 为光速。而理论上在该双频频差下的最大不模糊距离为 $R_{unamb} = c/(2\Delta f)$, 此时雷达测距的理论误差可表示为 $R_{unamb}/(2\pi\sqrt{2SNR})$ 。因此双频连续波雷达存在着测距精度和最大不模糊距离之间的矛盾。为了解决这个问题, 我们采用了多频测距体制, 多频测距的实现有多种方法, 这里我们将讨论两种新的算法, 即多频到双频测距法和二次相差法。

2 多频到双频测距法

首先讨论多频测距。多频测距的原理和脉冲多普勒雷达中多脉冲重复频率 (PRF) 测距的技术^[2]类似, 同时或顺序发射多对双频信号, 且每对双频信号的频差按照一定的参差关系选择, 以此来提高雷达测距性能。在 M 重参差多频测距

情况下, 若不考虑噪声的影响, 对目标距离的求解可转换为一个除数为整数的实数域内的同余方程组^[3,4]:

$$L = k_i m_i + [\Delta\phi_i / (2\pi)] \cdot m_i \quad (1)$$

其中 m_i 为参差比, $\Delta\phi_i$ 为第 i 对双频信号的回波相位差 ($0 \leq \Delta\phi_i < 2\pi$), k_i 为第 i 对双频信号测距时的模糊数, 这个模糊数是相对于本双频的最大不模糊距离而言的。 $L_i = R/R_0$, $R_0 = c/(2\Delta f_0)$, Δf_0 为基本频差, R_0 为基本频差 Δf_0 对应的最大不模糊距离; $\Delta f_i = \Delta f_0 / m_i$, Δf_i 为参差双频的频差, m_i 为参差系数。若求得一组 $(k_1^*, k_2^*, \dots, k_M^*)$, 使得

$$\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j>i}^M |L_i - L_j| \rightarrow \min \quad (2)$$

即可得到真实距离 R 所对应的 L 的估计值 $\hat{L} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M L_i$, 目

标真正距离 R 的估计值是: $\hat{R} = \hat{L} \cdot R_0$ 。参差系数 m_i 之间的两两互素保证了同余方程组式 (1) 解的存在且唯一。在没有噪声的情况下, 多频测距的最大不模糊距离为

$$R_{unamb} = \prod_{i=1}^M m_i R_0 \quad (3)$$

针对上述多频测距思想,考虑到实际测量中噪声的影响,我们做以下仿真:取基本频差 $\Delta f_0 = 5.4$ MHz,分别在参差重数为 2,3,4 情况下做 1000 次多频测距仿真,结果如表 1 所示。

表 1 不同参差重数下多频测距仿真结果

参差重数	Δf_0 (MHz)	m_i	R_{unamb} (km)	测距误差均方差 (m)		正确解模糊最低 SNR(dB)
				SNR =40dB	SNR =25dB	
2	5.4	8,9	2	0.188	1.05	21.7
3	5.4	7,8,9	14	0.145	0.81	21.7
4	5.4	7,8,9,11	154	0.139	0.78	23.4

从理论分析和仿真结果来看,多频参差解模糊对信噪比的要求比较高。其次,为了解模糊,多频测距需要通过搜索算法^[5]确定最佳的 $(k_1^*, k_2^*, \dots, k_M^*)$,使其满足式(2)的要求,这样运算量就比较大。另外,由于受参差系数互素要求的限制,参差多频可供选择的频点比较少,这是它的一个缺陷。但参差多频测距的优势也是显而易见的,从表 1 可以看出,当采用 7, 8, 9, 11 这 4 个参差系数时,测距的不模糊距离达到了 154km。联系到前边对双频测距的分析,我们可以将多频测距和双频测距结合起来,两者相互取长补短,采用多频到双频的测距方法;即首先用多频解模糊的方法在较远的距离上捕获到目标,然后转入双频测距,通过逐渐增大频差,亦即逐渐减小距离波门的方法来跟踪目标,直到测距精度满足需要为止。当然在多频到双频测距算法中,在利用参差多频解模糊的过程中,测距精度需达到一定的要求,否则在转入双频测距时会引起较大的测距误差,以至测距失效。

多频到双频的测距方法,虽然开始的时候采用了多频测距以增大不模糊距离,但其最终还是采用了双频测距,因此它的测距精度仍然是双频测距精度。根据引言中所述,多频到双频测距法的最终测距精度应为

$$\sigma_R = c / (4\pi\Delta f \sqrt{2\text{SNR}}) \quad (4)$$

由前所述可知:双频测距的不模糊距离较小,但如果将频差减小,则其测距不模糊距离会大大增加。频差的减小可以通过如下方式实现:即周期性的发射一组组双频信号,每组双频信号之间的频差较大,但相邻两组频差的差即“二次频差”较小,这样既可满足测距不模糊距离的要求,又使得接收机便于接收、分辨两个回波信号。而后相邻两组双频信号之间的二次频差逐步增大,对应的不模糊距离虽然减小,但测距的精度却逐步提高,这就是所谓的“二次相差”测距法。下面就具体介绍这一方法的详细实现过程。

3 二次相差法测距

二次相差法测距的基本原理也是基于双频测距的。

第 1 步 首先发射双频信号 f_0 和 f_{n+1} ,然后发射下一组双频 f_0 和 f_n, \dots ,最后发射双频 f_0 和 f_1 ,多频 f_{n+1}, f_n, \dots, f_1 的值依次增大。由频率 f_0 和 f_{n+1} 可得到它们的相位差 $\Delta\phi_{0,n+1}$

$$\Delta\phi_{0,n+1} = \phi_0 - \phi_{n+1} = 2\pi\Delta f_{n+1} 2R_{n+1} / c \quad (5)$$

其中 $\Delta f_{n+1} = f_{n+1} - f_0$ 。同理可以通过频率 f_0 和频率 f_n 得到它们的相位差 $\Delta\phi_{0,n}$

$$\Delta\phi_{0,n} = \phi_0 - \phi_n = 2\pi\Delta f_n (2R_n / c) \quad (6)$$

由式(5),式(6)可得二次相差:

$$\begin{aligned} \Delta\Delta\phi_{n,n+1} &= \Delta\phi_{0,n} - \Delta\phi_{0,n+1} = 2\pi\Delta f_n (2R_n / c) - 2\pi\Delta f_{n+1} (2R_{n+1} / c) \\ &= 2\pi\Delta f_n (2R_n / c) - 2\pi\Delta f_{n+1} (2/c)(R_n + v_n \cdot T) \\ &= 2\pi(f_n - f_{n+1})(2/c)R_n - 2\pi\Delta f_{n+1}(2/c)v_n \cdot T \end{aligned}$$

若令 $\Delta\phi_{\text{补偿}} = 2\pi\Delta f_{n+1}(2/c)v_n \cdot T$, 则

$$\Delta\Delta\phi_{n,n+1} + \Delta\phi_{\text{补偿}} = 2\pi(f_n - f_{n+1})(2/c)R_n \quad (7)$$

则最大不模糊距离为

$$R_{unamb} = c / [2(\Delta f_n - \Delta f_{n+1})] \quad (8)$$

其中 v_n 为目标在频率 f_n 所对应测量周期的径向速度,它可以通过 FFT 计算和谱峰搜索的方法得到, T 表示相邻两次测量之间的时间间隔。由此,我们便得到了对应于频率 f_n 的距离 R_n 。在上式的推导过程中,由于频率 f_n, f_{n+1} 发射时间间隔较短,我们可认为目标是匀速运动的, $\Delta\phi_{\text{补偿}}$ 就是由于目标的运动引起的。最小二次频差 $\Delta f_n - \Delta f_{n+1}$ 的值需根据本次测量所要求的最大不模糊距离来确定,如 $R_{unamb} = 40$ km,则由式(8)可得 $\Delta f_n - \Delta f_{n+1} = c / (2R_{unamb}) = 3750$ Hz。

第 2 步 按照

$$\Delta f_{n-1} - \Delta f_n = N(\Delta f_n - \Delta f_{n+1})$$

$$\Delta f_{n-2} - \Delta f_{n-1} = N(\Delta f_{n-1} - \Delta f_n) = N^2(\Delta f_n - \Delta f_{n+1})$$

⋮

$\Delta f_1 - \Delta f_2 = N^{n-1}(\Delta f_n - \Delta f_{n+1})$, 即 $\Delta f_n - \Delta f_{n+1} = (\Delta f_1 - \Delta f_2) / N^{n-1}$ 的规律将二次频差逐步增大,其中 N 为二次频差增大的倍数。这样就使得二次频差逐渐增大,它们所对应的最大不模糊距离逐渐减小。如果相位误差不变,则由相位误差引起的测距误差以 $1/N$ 的速度递减,从而使测距精度逐步提高,在满足最大不模糊距离的前提下提高了测距精度。

第 3 步 选择 $\Delta f_1 = f_1 - f_0 = N(\Delta f_1 - \Delta f_2)$, 即 $\Delta f_n - \Delta f_{n+1} = (1/N^n)\Delta f_1$, 则

$$\left. \begin{aligned} \Delta f_{n-1} - \Delta f_n &= (1/N^{n-1})\Delta f_1 \\ \Delta f_{n-2} - \Delta f_{n-1} &= (1/N^{n-2})\Delta f_1 \\ &\vdots \\ \Delta f_1 - \Delta f_2 &= (1/N)\Delta f_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这里的频差 Δf_1 其实是一次频差, 而不是二次频差, 它和前边的二次频差 ($\Delta f_1 - \Delta f_2$) 也是 N 倍关系, 这样做主要是为了提高频率利用率, 增大测距精度。

假设由噪声引起的多普勒相位误差服从 $N(0, \sigma_0^2)$ 的正态分布, 则二次相差法中最后一组二次频差测距时的相差误差服从 $N(0, 4\sigma_0^2)$ 的正态分布, 假如该二次频差对应的最大不模糊距离为 R'_{unamb} , 取 99% 的置信区间, 则二次相差法下最大二次频差对应的测距误差均方差为

$$\sigma_R = \frac{3 \times 2\sigma_0}{2\pi} \cdot R'_{unamb} = \frac{3}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{\text{SNR}_{out}/20} \cdot R'_{unamb} \quad (10)$$

这就是前述的二次相差法多频测距时所能达到的测距精度, 它同时也给出了测距误差和输出信噪比之间的关系。关于这个结论, 我们已另文加以论证。当然, 由于二次相差法最终采用了一对双频频差来提高测距精度, 因此二次相差法最终所能达到的测距精度应当满足式 (4), 也就是说, 两种方法所能达到的最终测距精度应当是相同的。

4 两种测距方法的比较及仿真实验

多频到双频的测距方法, 由于兼具多频测距和双频测距的特点, 在较大的不模糊距离上达到了较高的测距精度。它可以发射很少的多频而得到很大的测距范围, 这是它的一个优势, 但为了解模糊, 需要通过搜索以求得同余方程组式(1)的解 $(k_1^*, k_2^*, \dots, k_M^*)$, 以使它满足式(2)的要求, 这样做算法就比较复杂, 运算量也比较大。相反, 对于二次相差法来说, 解模糊的问题比较简单, 只要频点参数选择适当, 目标就一直处在最大不模糊距离之内。相比之下, 二次相差算法更简单, 计算量较小, 更利于工程实现。

根据上述两种测距方法的理论分析做以下仿真。

多频到双频测距法中的有关参数为: 多频基本频差 $\Delta f_0 = 5.4 \text{ MHz}$, 多频参差系数为 4 个, 它们分别是 7, 8, 9, 11。基频 $f_0 = 10 \text{ GHz}$, 对应的 4 个多频频率分别为 $f_1 = 10000.771 \text{ MHz}$, $f_2 = 10000.675 \text{ MHz}$, $f_3 = 10000.6 \text{ MHz}$, $f_4 = 10000.491 \text{ MHz}$, 多频测距对应的最大不模糊距离为 154km。转入双频测距后, 利用 f_0 和 f_5 测量目标距离, $f_5 = 10003 \text{ MHz}$, 双频 f_0 和 f_5 对应的最大不模糊距离为 50m。现在假定距离雷达 5km 远处有一目标, 作匀速直线运动远离雷达飞去, 飞行时间为 20s。其运动方程为: $R = R_0 + v_0 t$, 其中 $R_0 = 5 \text{ km}$, 目标速度 $v_0 = 1000 \text{ m/s}$ 。现仿真产生零中频信号:

$$x^{f_0}(n) = e^{j[\omega_{d0}n - 2\pi f_0 2R_0/c]} + v_0(n) \quad (11)$$

$$x^{f_i}(n) = e^{j[\omega_{di}n - 2\pi f_i 2R_0/c]} + v_i(n), \quad i=1,2,\dots,5 \quad (12)$$

其中 $\omega_{d0} = 2\pi f_{d0} \cdot T_s$, $\omega_{di} = 2\pi f_{di} \cdot T_s$, T_s 为采样周期, 取 $T_s = 800 \text{ ns}$ ($f_s = 1.25 \text{ MHz}$), 和 $v_0(n)$ 为白噪声。这里假定距离雷达 30km 处 FFT 输入信噪比为 0dB, 其它距离处的信噪比则按雷达方程^[2]来计算, 如 $R=10 \text{ km}$ 时, FFT 输入 $\text{SNR}=19.1 \text{ dB}$ 。针对所产生的仿真信号, 取测量周期 $T=20 \text{ ms}$, 亦即每 20ms 做一次 1024 点的 FFT。在仿真开始的前 4 个测量周期, 采用参差多频 f_1, f_2, f_3, f_4 和 f_0 解模糊, 得到一个目标的精确距离。从第 5 个测量周期开始转入双频测距后, 利用双频 f_5 和 f_0 测距, 在每个测量周期得到一个目标的精确距离。做 1000 次蒙特卡罗仿真实验, 结果如图 1, 图 2 所示。图 1 给出的是多频到双频测距法下 1000 次仿真统计的测距均方根误差与距离曲线; 图 2 给出的是多频到双频测距法下 1000 次仿真统计的测距均方根误差与输出信噪比曲线。

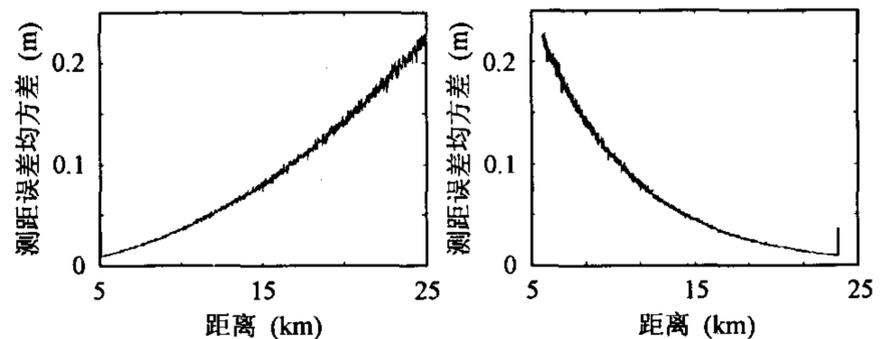


图 1 多频到双频测距法
误差-距离曲线

图 2 多频到双频测距法
误差-信噪比曲线

二次相差法中各个频点的频率参数为: 基频 $f_0 = 10 \text{ GHz}$, 发射 5 个多频, $f_5 = 10002.2512 \text{ MHz}$, $f_4 = 10002.256 \text{ MHz}$, $f_3 = 10002.28 \text{ MHz}$, $f_2 = 10002.4 \text{ MHz}$, $f_1 = 10003 \text{ MHz}$ 。这 5 个多频对应的最小二次频差为 4800Hz, 二次频差递增倍数为 $N=5$, 最大双频频差为 3MHz。二次差频测距对应的最大不模糊距离为 31.25km, 最大双频对应的最大不模糊距离为 50m。假定目标飞行情况和多频到双频测距法下的情况相同, 模拟产生式(11), 式(12)的零中频信号, 信号采样频率、测量周期、FFT 点数等参数也和前边相同, 二次相差法每个测量周期做一次 FFT, 然后通过找峰求相差, 从而求得目标的距离, 当然这个距离的精确度不高。在下一测量周期, 利用上一测量周期测得的距离, 通过补偿可以得到一个精度更高的距离, ..., 依此类推, 在每第 5 个测量周期可以得到一个精确度很高的目标测量距离。做 1000 次蒙特卡罗仿真实验, 结果如图 3, 图 4 所示。图 3 给出的是二次相差法下 1000 次仿真统计的测距均方根误差与距离曲线, 图 4 给出的是二次相差法下 1000 次仿真统计的测距均方根误差与输出信噪比曲线。对比图 1~图 4 可以看出, 多频到双频测距法和二次相差法都达到了比较高的测距精度。另外, 两种方法达到的测距精度相同, 这是由于多频到双频测距法最后的双频对应的

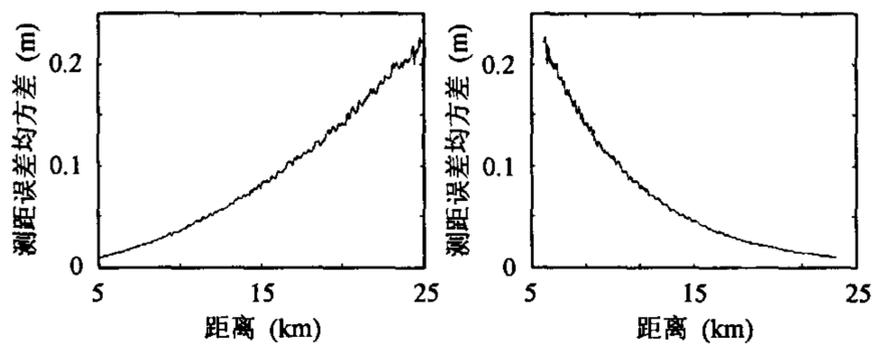


图3 二次相差法
误差-距离曲线

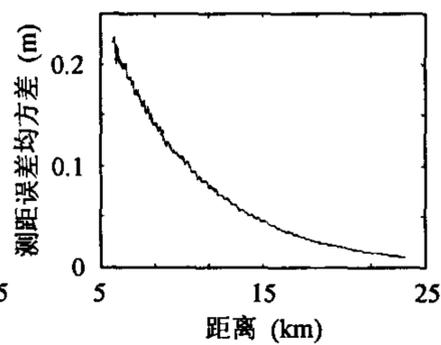


图4 二次相差法
误差-信噪比曲线

最大不模糊距离和二次相差法下最后的双频对应的最大不模糊距离相同, 均为 50m。

5 结束语

多频到双频的测距方法和二次相差法作为多频连续波雷达两种不同的测距方法, 各有优缺点, 但其本质都是基于双频测距, 都属于多频测距的范畴。相比之下, 二次相差法算法要简单一些, 实现起来更容易一些, 并且对信噪比的要求相对较低。若参数选择得当, 采用二次相差法完全可以满足雷达测距战术指标的要求, 因此在实际中有着广泛的应用前景。

参考文献

- [1] (美)M. I. 斯科尔尼克著, 林茂庸, 等译. 雷达系统导论. 北京: 国防工业出版社, 1992: 79 - 82.
- [2] 蔡希尧著. 雷达系统概论. 北京: 科学出版社, 1983: 305 - 318.
- [3] 许邦建, 皇甫堪. 噪声条件下相位测距中的模糊问题. 国防科技大学学报, 2001, 23(1): 72 - 76.
- [4] 许邦建, 李纲, 皇甫堪. 噪声下数字化多频连续波雷达的测距模糊问题. 电子学报, 2002, 30(6): 903 - 906.
- [5] 许邦建. 多频连续波测距雷达关键理论、算法的研究及软硬件设计. [博士论文], 长沙: 国防科技大学, 2001.

曹延伟: 男, 1976年生, 博士生, 主要研究方向为现代信号处理、雷达信号处理等.

程 翥: 男, 1974年生, 讲师, 主要研究方向为现代信号处理.

皇甫堪: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达及现代信号处理方面的研究.