

一种采用变周期调频连续波雷达的多目标识别方法

徐 涛,金昶明,孙晓玮,夏冠群

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050)

摘 要: 本文首先从理论上分析了传统的线性调频连续波(FMCW)雷达在进行多目标识别中的局限性,提出了一种采用变周期的线性调频波形作为发射波形的新方法,从而解决了多目标识别中的虚假目标的问题.计算机模拟证明了理论分析的正确性和新方法的可行性.最后,针对这种体制雷达探测系统的新特点,提出了一种适用于该系统的容差函数.

关键词: 调频连续波雷达;多目标识别;容差函数

中图分类号: TN957.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)06-0861-03

A Novel Method to Identify Multitarget by FMCW Radar

XU Tao, JIN Chang-ming, SUN Xiao-wei, XIA Guan-qun

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The traditional FMCW (frequency modulation continuous wave) radar has its own limitation in multitarget detection. In this paper a novel method by using changing cycle FMCW radar is presented. Computer simulation proves that the analysis is correct and the method is practical. Considering the different frequency resolution rate of velocity in different periods, a special function is given to decide the error range of one target.

Key words: FMCW radar; multitarget detection; error function

1 引言

相对于一般雷达,线性调频连续波雷达具有很大的时带积,因而在理论上具有很高的测距精度和距离分辨率^[1].此外,它还具有结构简单、体积小、重量轻和良好的低截获概率性能等特点,特别适用于雷达成像、目标特性研究等领域^[2].

线性调频连续波雷达的基本原理是利用发射和回波信号之间的频率差确定目标距离.理想线性的宽带调制波形可以得到很高的距离分辨率.

传统 FMCW 雷达发射信号是一个调频周期 T 远大于作用距离处目标回波时延的线性调频信号.如图 1 所示.

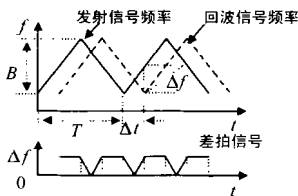


图 1 传统的 FMCW 的工作原理

该线性调频信号在第 n 个调频周期内发射的信号可以表示为:

$$S_{a,n+1}(t) = Ae^{j[2(f_0 + \frac{B}{T}(t-nT))(t-nT)]}, \quad nT \leq t < (n+1/2)T$$
$$S_{b,n+1}(t) = Ae^{j[2(f_0 + \frac{B}{T}(t-nT))(t-nT)]}, \quad (n+1/2)T \leq t < (n+1)T \quad (1)$$

$S_{a,n}$ 表示频率上升沿的发射信号, $S_{b,n}$ 表示频率下降沿的发射信号.式中忽略了发射信号的初相. A 为发射信号的振幅, T 为发射信号的调频周期, f_0 为发射信号在 $t = nT$ 时的瞬时频率, B 是调频带宽.

设在 $t = 0$ 时刻有一个点目标,距离雷达的距离为 R_0 ,以径向速度 v 临近雷达,对该目标的反射波和雷达的发射信号

进行差拍运算,可得差拍信号:

$$S_{ab,n+1}(t) = (1/2) A^2 e^{j[2(f_0 + \frac{2B}{T}t)(t-nT)]}, \quad nT \leq t < (n+1/2)T$$
$$S_{bb,n+1}(t) = (1/2) A^2 e^{j[2(f_0 + \frac{2B}{T}t)(t-nT)]}, \quad (n+1/2)T \leq t < (n+1)T \quad (2)$$

其中 $k = 2v/c$ 和速度有关, $n = 2R/c$ 和距离有关.因此,只要得到上升沿差拍信号和下降沿差拍信号的频谱,就可以得到距离和速度.通常,采用傅立叶变换来得到差拍信号的频谱.即通过频谱分析得到:

$$f_{ab} = kf_0 + (2B/T)n, f_{bb} = kf_0 - (2B/T)n \quad (3)$$

在得到 f_{ab} 和 f_{bb} 之后,就可以通过下式得到被测目标的距离和速度值.

$$v = c(f_{ab} + f_{bb}) / (4f_0), R = cT(f_{ab} + f_{bb}) / (8B) \quad (4)$$

在测量单个目标的情况下, FMCW 简单可行,表现了良好的实时性和测距测速功能.但是当雷达前方出现多个目标时,雷达就会出现判断上的困难.

2 采用传统的 FMCW 体制进行多目标识别时存在的问题

当前方出现多个目标,回波信号是多个点目标回波信号的叠加.其差拍信号也可以近似认为是各个点目标回波信号和发射信号的差拍信号之和.

因此,对频率上升段的差拍信号进行频谱分析可以得到 n 个谱峰,它们分别代表 $fa1, fa2 \dots fan$.同理,由频率下降段的差拍信号可以得到 n 个谱峰, $fb1, fb2 \dots fbn$.可是,由于无法

得到两族谱中各谱线的对应关系,实际上,根本无法得到距离和速度信息.如果,考虑所有的可能性,也就是说考虑两族谱线所有可能的两两组合.那么,由

$$\begin{bmatrix} (fa1,fb1) & (fa1,fb2) & \dots & (fa1,fbn) \\ (fa2,fb1) & (fa2,fb2) & \dots & (fa2,fbn) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (fan,fb1) & (fan,fb2) & \dots & (fan,fbn) \end{bmatrix} \quad (5)$$

可以得到 n^2 组距离和速度

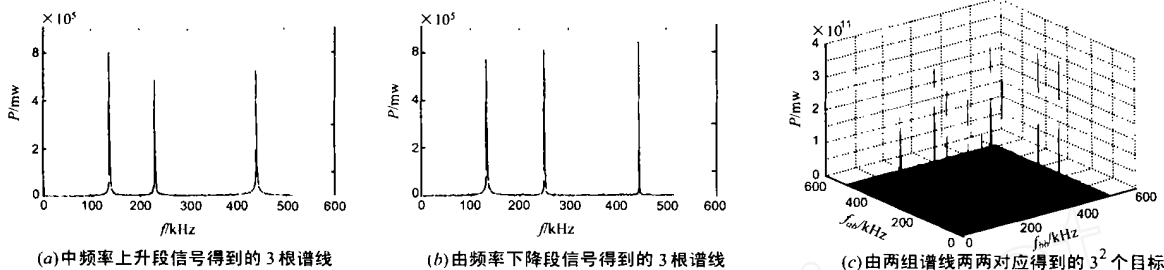


图 2 雷达前方存在三个目标时的情况

按照上述方法分别对上升沿和下降沿的差拍信号作频谱分析,并对两族谱线组合分析.可以看出在上升沿和下降沿都得到三根谱线,组合后共得到 9 个目标.每个目标可以计算出一个相应的距离和速度.其中只有三组数据代表真实目标的距离和速度,其他 6 个是由于缺乏相关性信息而得到的假目标.

3 采用变周期 FMCW 进行单雷达传感器的多目标识别

为能从计算出 n^2 组距离和速度中识别出 n 个实际目标距离和速度,用一种新的变周期 FMCW 波形作为发射信号.

如图所示,一个周期内的发射信号由三段具有相同的调频带宽,不同的调频斜率的信号组成.三段信号分别被称为 a 段信号, b 段信号和 c 段信号,持续时间分别为 T_1, T_2 和 T_3 .

$$\begin{bmatrix} (d11, v11) & (d12, v12) & \dots & (d1n, v1n) \\ (d21, v21) & (d22, v22) & \dots & (d2n, v2n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (dnn, vnn) & (dnn, vnn) & \dots & (dnn, vnn) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中有 n 组是雷达照射范围内的目标的距离和速度,另外 $n^2 - n$ 个是由于缺乏两组谱线相关性而造成的假目标.

下面是雷达照射目标内存在三个目标时的实际情况:

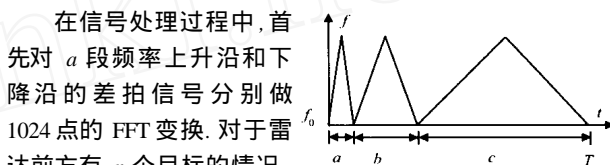


图 3 变周期 FMCW 雷达发射信号的频率示意图

在信号处理过程中,首先对 a 段频率上升沿和下降沿的差拍信号分别做 1024 点的 FFT 变换.对于雷达前方有 n 个目标的情况,在频率上升段和下降段分别得到 n 根谱线

$$\begin{aligned} f_{ab1} &= \frac{2v_1}{c}f_0 + \frac{4B}{cT_1}R_1, f_{bb1} = \frac{2v_1}{c}f_0 - \frac{4B}{cT_1}R_1 \\ f_{ab2} &= \frac{2v_2}{c}f_0 + \frac{4B}{cT_1}R_2, f_{bb2} = \frac{2v_2}{c}f_0 - \frac{4B}{cT_1}R_2 \\ &\dots, \dots \\ f_{abn} &= \frac{2v_n}{c}f_0 + \frac{4B}{cT_1}R_n, f_{bbn} = \frac{2v_n}{c}f_0 - \frac{4B}{cT_1}R_n \end{aligned} \quad (7)$$

其中 i, j, k 是整数且 $i, j, k \in [1, n]$ 对其进行运算,得到 n^2 个目标的距离和速度.

$$\begin{bmatrix} R11, v11 & R12, v12 & \dots & R2n, v2n \\ R21, v21 & R22, v22 & & \\ & & \dots & \\ & & & Rlm, vlm & \dots \\ Rn1, vn1 & Rn2, vn2 & \dots & Rnn, vnn \end{bmatrix} = \begin{cases} R11 = \frac{R1+R1}{2} + \frac{f_0 T_1}{4B} (v1 - v1) \\ v11 = \frac{v1+v1}{2} + \frac{B}{f_0 T_1} (R1 + R1) \\ \dots \\ Rlm = Rl \\ vlm = vl \\ \dots \\ Rnn = \frac{Rn+Rn}{2} + \frac{f_0 T_1}{4B} (vn - vn) \\ vnn = \frac{vn+vn}{2} + \frac{B}{f_0 T_1} (Rn + Rn) \end{cases} \quad (8)$$

从上式可见,计算出真实目标的距离和速度和调频周期 T_1 无关,而虚假目标的距离和速度计算值和调频周期有关系.

再分别对 b 段和 c 段的信号做相同的处理.由于 a, b, c 三段信号调频周期不同.虚假目标在三次计算中会得到不同的距离和速度值.而对于真实目标,在三次运算中都应该得到

相同的距离 R 值和速度 v 值,因此,只要从三族值中找出重合的 n 组 R, v 值,就可以得到真实目标的距离和速度.

信号处理流程如下:

为了验证这种方法的可行性,进行软件仿真,选取三个目标分别以速度 -20m/s 位于距雷达 10m 处,以 80m/s 位于距雷达 18m 处,以及以 10m/s 位于距雷达 32m 处.设初始频率为

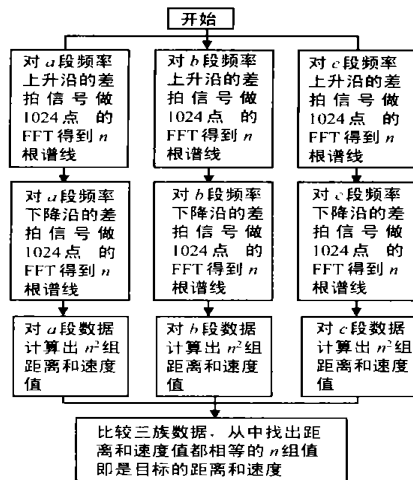


图 4 信号处理流程图

35GHz, $T_a = 0.001s$, $T_b = 0.002s$, $T_c = 0.005s$. 每段信号进行 1024 点 FFT 变换. 计算出所有可能的距离和速度值, 并对三组目标进行重合.

可以看出在所有数据中有且仅有三点重合. 通过计算得出得距离和速度也和设定的目标点相等. 因此计算机仿真证明采用变周期的 FMCW 进行多目标识别是完全可行的.

4 容差函数的建立

对于一个等周期的 FMCW 雷达系统, 其系统的频率分辨率取决于一次采样时间 $T/2$.

$$\text{即: } f = 1 / (T/2) = 2/T$$

因此, 系统的最小分辨距离为: $R = (cT/8B)$ $f = (c/8B)$

只和调频带宽有关.

$$\text{系统可分辨的最小速度为: } v = (c/2f_0)$$

和初始频率及调频周期有关.

对于一个周期为 T 的频变波形, 计算出的距离总是落在 $0, R, 2R, \dots, nR, \dots$ 上.

而计算出的速度总是落在 $\dots -nv, \dots, -v, 0, v, \dots, nv, \dots$ 上.

在变周期的 FMCW 雷达系统中, 因为 a, b, c 段的调频周期不同, 在 a, b, c 段计算出的 v 值也必然落在不同的数值点上. 即对于同一个目标来说也会计算出几个不同的速度. 当然, 这几个速度值不会有很大的差别, 但是为了能在数据处理时准确的定位目标, 就需要建立一个容差函数. 即几个不同的速度值只要在误差范围内相等, 就认为是同一个目标的速度.

因为 a, b, c 段的最小可分辨速度分别为 $v_a = c/(f_0 T_a)$, $v_b = c/(f_0 T_b)$, $v_c = c/(f_0 T_c)$. 为了保证识别的准确性, 考虑最坏的情况, 得到容差函数:

$$(T_a, T_b, T_c) = v_a + v_b = \frac{c(T_a + T_b)}{f_0 T_a T_b}, T_a < T_b < T_c \quad (9)$$

如果计算值 v_a, v_b, v_c 具有关系 $|v_a - v_b| \leq \epsilon, |v_c - v_b| \leq \epsilon$ 且 $|v_a - v_c| \leq \epsilon$, 就可以认为 $v_a = v_b = v_c$ 且最终的速度由速度平均值得到:

$$v = (v_a + v_b + v_c) / 3 \quad (10)$$

由于速度由速度平均值得到, 其相应的误差也由于平均而减小. 提高了速度测量的准确性.

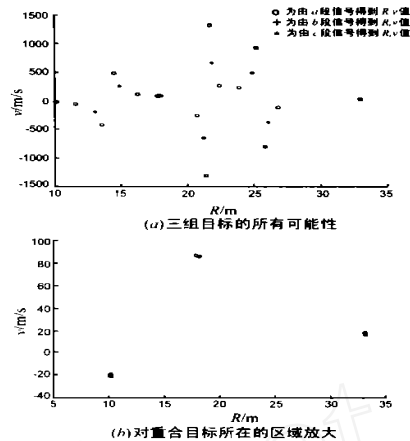


图 5 对三段数据的计算结果进行重合运算得到的仿真结果

5 结论

本文从理论上证明了变周期 FMCW 波形在多目标识别中的可行性. 通过分析可以看出采用毫米波变周期线性调频连续波的单传感器雷达不仅可以解决传统线性调频连续波雷达中存在的虚假目标的问题, 还进一步提高了雷达的速度分辨率. 在决定容差函数时, 为了避免目标分离, 考虑了最坏的情况. 在实际工作时由于两个目标同时具有非常相近的距离和速度的可能性很小, 因此由于容差函数过大而造成把两个目标识别成一个目标的概率很小.

参考文献:

- [1] 陈祝明, 丁义元, 向敬成. 线性调频连续波雷达扫频功率起伏对其测距精度和距离分辨力的影响 [J]. 电子学报, 1999, 27(9): 103 - 104.
- [2] 张立志, 汪学刚, 向敬成. LFM-CW 雷达的 MTI 技术 [J]. 电子科学学刊, 2000, (1): 118 - 123.

作者简介:



徐 涛 女, 1975 年出生于陕西省西安市, 1997 年于西安电子科技大学检测与仪器系获学士学位. 2000 年获得西安电子科技大学信号与信息处理专业硕士学位. 现为中国科学院上海微系统与信息技术研究所在读博士. 主要从事信号处理及集成电路芯片设计等方面的工作.



金昶明 男, 1973 年 4 月出生于青海省西宁市, 2000 年 4 月毕业于上海交通大学动力与能源工程学院, 获动力机械及工程专业博士学位. 现为中国科学院上海微系统与信息技术研究所电子技术博士后流动站博士后, 主要研究方向为射频与微波集成系统的信号检测与高速数字信号处理系统研究.