

一种基于光纤延迟环的低 PRF 状态测速方法*

郭 博,张智军,陈汉辉,甘 轶

(空军工程大学工程学院,西安 710038)

摘 要:介绍了 PD 雷达在低 PRF 状态下的测速模糊问题。将光纤技术应用于 PD 雷达,采用光纤延迟环进行脉冲复制,提出了一种可在低 PRF 状态下进行测速的方法,采用这种方法能够消除低 PRF 状态测速模糊,提高低 PRF 状态的测速范围。通过 Matlab 进行仿真,验证了方法的正确性。

关键词:脉冲多普勒雷达;重频;测速模糊;光纤延迟线;脉冲复制

中图分类号:TN958.2 文献标志码:A

A Velocity Measureme Method under Low LPRF Based on Optical Delay Loop

GUO Bo, ZHANG Zhijun, CHEN Hanhui, GAN Yi

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The velocity measurement ambiguity of pulsed radar under low pulse repetition frequency (PRF) was analyzed. The optical fiber technique was introduced into pulsed radar, and replication was carried out using optical delay line, and a solution of velocity measurement ambiguity under low PRF was proposed, and the velocity detection range was expanded. The method was simulated by Matlab.

Keywords: pulse Doppler radar; pulse repetition frequency; velocity measurement ambiguity; optical fiber delay line; pulse replication

0 引言

脉冲多普勒(PD)雷达是一种利用多普勒效应检测目标信息的雷达。根据检测目标参数的需要,采用了三种脉冲重复频率:低 PRF、中 PRF 和高 PRF。对于中 PRF 和高 PRF,目标回波延迟大于脉冲重复周期,将产生测距模糊;对于低 PRF,大多数情况下,由于目标径向速度引起的多普勒频移大于脉冲重复频率,将产生测速模糊。所以,一般无法在低 PRF 状态下进行目标速度测量。近年来,光纤延迟线技术在雷达信号处理中的应用得到了广泛的关注^[1-2]。同时,出现了多种基于光纤延迟线的脉冲复制方法。利用这些方法,可以精准地对信号进行可控的复制^[3-4]。文中提出了一种采用光纤延迟环进行脉冲再生从而提高回波脉冲重复频率的方法,可使得在低 PRF 工作状态下的 PD 雷达除了测距

以外,还能不模糊的测速。

1 低 PRF 状态下的测速模糊问题

假设雷达发射均匀相参脉冲串信号,脉冲重复周期为 T_r ,脉冲宽度为 τ ,振幅为 $1/\sqrt{\tau}$,载波频率为 f_0 ,则 N 个脉冲的频谱为^[5]:

$$U(f \pm f_0) = \frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{N}} \text{sinc}(f\tau) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j\pi f[2nT_r + \tau]) \quad (1)$$

如图 1 中实线部分所示(仅画出了上边频频谱),整个频谱呈梳齿状,齿间间隔为 $1/T_r$ 。当这 N 个脉冲照射到以径向速度 v_r 朝向雷达运动的目

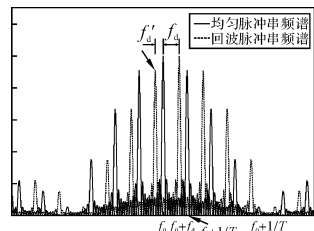


图 1 均匀脉冲串及回波脉冲串频谱图

* 收稿日期:2008-07-23

作者简介:郭博(1982-),男,陕西西安人,助理工程师,硕士研究生,研究方向:微波信号处理及工程应用。

收机接收时,相对于发射脉冲,回波脉冲产生的多普勒频移为^[6]:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{f_0}{c} 2v_r \quad (2)$$

其中: λ 为雷达波波长, f_0 为雷达波载波频率, c 为光速。附加了 f_d 多普勒频移后的回波信号频谱如图 1 中虚线部分所示。通过检测出 f_d 便可获得目标速度信息。一般情况下,雷达接收机将回波信号经过多次下变频后,通过在中心频率两侧 $1/(2T_r)$ 范围内并接多普勒滤波器组来检测回波信号的频移,从而得到速度信息。从图中可以看出,当 $f_d \geq 1/(2T_r)$ 时(图 1 中所示就是这种情况),实际的多普勒频移 f_d 已经超出了检测范围,不能够被检测到,但由 $f_0 - 1/T_r$ 这根谱线附加多普勒频移 f_d 后的谱线(箭头所指的谱线,对应的多普勒频移为 f'_d) 进入检测范围内,会误认为 f'_d 是回波信号的多普勒频移,从而将 f'_d 对应的速度认为是目标速度,也就是说,产生了测速模糊。要消除速度模糊,需要扩大齿间距离,使 $1/(2T_r)$ 变大,要使得 $1/(2T_r)$ 变大,最有效的方法就是提高脉冲重复频率,减小 T_r 。

2 采用光纤延迟环消除低 PRF 状态下的测速模糊

2.1 采用光纤延迟环进行脉冲再生

光纤延迟线的工作原理是用微波信号去调制光信号,让光信号进入光纤进行一定的延迟,而后解调出微波信号。输出的脉冲调制信号完全和输入的脉冲调制信号相同,只是时间上有一个延迟^[7]。目前的光纤技术,已经可以将一个 25ps 的脉冲调制信号在光纤环(optical fiber delay loops)中不断循环而复制出几千个同样的脉冲^[8]。文献[8]给出了一种利用光纤延迟环进行脉冲信号复制再生的方法,利用光纤延迟线和相关的器件形成环路,从而进行脉冲复制。如图 2 所示,图中, Switchable coupler 是连接开关,控制信号

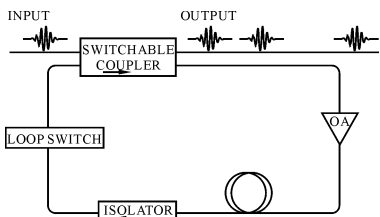


图 2 光纤环路再生信号示意图

进入和输出。OA 是光学放大器,补偿信号能量损失。Isolator 是隔离器,保证信号在光纤环中循环的方向性。Loop switch 是环路开关,在需要的时候,将环路中的信号截止,以便于新的信号进到环路中进行循环。信号从左端输入口进入连接开关,连接开关将一部分信号输出,一部分信号进入光纤环路,经过 OA 将信号放大,再经过一定时间的延迟后回到连接开关,连接开关再将信号分成两路,一路输出,一路再循环,如此反复将可以复制出一列脉冲串。

若输入信号为单个脉冲,表达式如下:

$$s_i(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3)$$

设光纤延迟环一圈的延迟时间为 t_r ,则光纤延迟环的输出信号为:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \text{rect}\left(\frac{t-t_r}{\tau}\right) \cos(\omega_0(t-t_r) + \varphi_0) + \text{rect}\left(\frac{t-2t_r}{\tau}\right) \cos(\omega_0(t-2t_r) + \varphi_0) + \dots \quad (4)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases}$$

式中: τ 表示脉冲宽度, ω_0 为载波频率, φ_0 为信号初始相位。

可见,时间上延迟了 t_r 之后的信号,相位也相应的延迟了 $\omega_0 t_r$,所以输出信号与输入信号相参,形成了相参脉冲串信号。在理想条件下,这一列相参脉冲串的脉冲宽度与输入信号相同,载频频率与输入信号相同,相位与输入信号有固定的相位差,脉冲间间隔由光纤延迟环的长度决定。

2.2 利用再生脉冲形成高 PRF 脉冲串消除测速模糊

由于光纤延迟环能再生输入脉冲信号,形成相参的脉冲串信号,利用这一特点,可以设计一种新的脉冲多普勒雷达工作方式。雷达发射低 PRF 脉冲串信号,回波信号进入接收机后,通过距离门的选择获得距离信息,这时不存在距离上的模糊。而后对进入距离门的信号,使用光纤延迟环复制产生 $N - 1$ 个新的脉冲,填充在原来低 PRF 的两个回波脉冲中间,得到了一个脉冲重复

频率,提高了 N 倍的相参脉冲串信号,可用于测速。

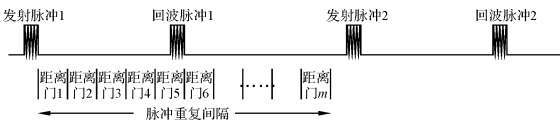


图 3 低 PRF 状态下进行测距(不模糊的测距)

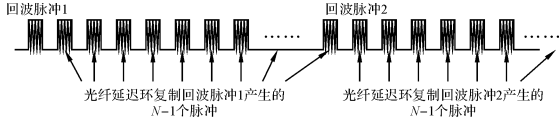


图 4 利用再生脉冲形成高 PRF 进行测速(消除测速模糊)

图 3 是典型的低 PRF 回波脉冲与发射脉冲时间关系示意图。对于一种典型的脉冲多普勒雷达,在中频设置有 m 个并联的距离通道,距离门可以对回波信号在距离上进行量化以提取距离信息。进入距离门后的信号经过放大,单边带滤波和相应的杂波处理后进入多普勒滤波器组,通过多普勒滤波器组的选择来确定回波信号上附加的多普勒频移,从而获得相应的速度信息。图 4 是采用光纤延迟环复制脉冲后距离门 5 中回波脉冲重复频率被提高以用于测速的示意图。利用光纤延迟环对进入距离门 5 的信号进行复制再生,得到一串相参脉冲串信号。在选择光纤延迟环的延迟时间时,首先,延迟应大于一个距离门的宽度,否则,循环时将会引起混叠;其次,光纤延迟环延迟时间 t_r 应为发射脉冲周期 T_r 的 $1/N$ (N 取整数),即 $T_r = Nt_r$ 。这样,当一个回波脉冲被循环复制 $N - 1$ 次后,紧接着的一个回波脉冲也进入距离通道 5,刚好与最后一个复制得到的脉冲相距 t_r (目标在一个脉冲重复间隔内的位移可以忽略不计),而后继续在光纤延迟环中复制刚进入光纤延迟环的这个回波脉冲。如此循环,就得到等脉冲间隔 t_r 的一组新的相参脉冲串信号。

采用原先低 PRF 的相参脉冲串测速,能够测得的最大多普勒频移为:

$$f_{d \max} = \frac{1}{2T_r} \quad (5)$$

式中 T_r 为原低 PRF 的脉冲重复周期。对应的最大速度为:

$$v_{\max} = \frac{\lambda f_{d \max}}{2} = \frac{\lambda}{4T_r} \quad (6)$$

式中 λ 为雷达工作波长。

而采用新的相参脉冲串进行测速时,由于新脉冲串的脉冲重复间隔 $t_r = T_r/N$,所以:

$$v'_{\max} = \frac{\lambda}{4t_r} = \frac{N\lambda}{4T_r} \quad (7)$$

即相对于原先的低 PRF 来说,采用光纤延迟环复制脉冲后不模糊测速的最大值扩大了 N 倍。适当的选择 N ($N = T_r/t_r$),在发射低 PRF 工作方式下也可进行不模糊的测速。

如图 5 所示,虚线表示低 PRF 情况下的相参脉冲串频谱,而实线表示采用光纤延迟环提高 10 倍脉冲重复频率后的相参脉冲串频谱,可以看出,采用光纤延迟环提高脉冲重复频率后,相参脉冲串的齿间隔被拓宽。低 PRF 状态下(虚线所示),很小的一个多普勒频移就会超出测速范围,产生测速模糊,而提高了脉冲重复频率后,齿间间隔变大(实线所示),不模糊测速的范围扩大,这与在前文中的分析一致。

同样,也可以在时域上进行分析。如果要用相位检波器输出脉冲的包络频率来单值测定目标的速度,必须满足的条件是 $f_d \leq f_r/2$,式中, f_d 是

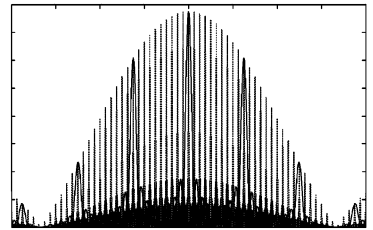


图 5 采用光纤延迟环后的高 PRF 与原低 PRF 的频谱图比较

多普勒频移(也就是被采样信号), f_r 是采样频率(也就是脉冲重复频率)。这就是在取样系统中,要保证信号不失真,取样频率必须大于两倍信号多普勒频移^[7]。设雷达工作频率为 10GHz,低 PRF 工作状态时,脉冲重复频率为 $f_r = 6\text{kHz}$,据式(6)可计算出 $v_{\max} = 162\text{km/h}$,这个速度远远小于目前高速飞行器的飞行速度。设某一目标相对雷达的径向速度为 750km/h。图 6 给出了采用低 PRF 时相位检波器的时域输出信号,虚线所示是与真实脉冲多普勒频移(13.9kHz)对应的信号包络,而由于 PRF 太低,相位检波器实际输出信号的包络为实线所示,会误将实线对应的频率(约 1.9kHz)认为是回波信号的频移,也就是说,当 PRF 太低时,不能由相位检波器得到真

人机路径规划算法。仿真结果表明该算法可有效解决单一遗传算法寻优精度较差的缺点,规划出的路径精度更高,并在一定程度上提高了路径规划的成功率。

参考文献:

[1] HAN W G, BAEK S M. Genetic algorithm based path planning and dynamic obstacle avoidance of mobile robots[C]// IEEE. 1997:2747-2751.
 [2] Pellazar M B. Vehicle route planning with constraints using Genetic algorithms[C]// Proceeding of IEEE NAECON, 1998:392-399.

[3] 贾秋玲,李广文,闫建国.基于遗传算法的无人机协同逆推式路径规划[J].西北工业大学学报,2007,25(4):590-593.
 [4] 唐国新,陈雄,袁扬.机器人路径规划中的改进型遗传算法[J].计算机工程与应用,2007,43(22):67-70.
 [5] 李广文.进化算法及其在飞行控制系统中的应用[D].西安:西北工业大学,2007.
 [6] 栗塔山.最优化计算原理与算法程序设计[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.

(上接第 275 页)

实的多普勒频移。图 7 则是采用光学延迟环将脉冲重复频率提高 10 倍后的相位检波器时域输出信号,这时,脉冲重复频率(也就是采样频率)达到了 60kHz,通过相位检波器可以得到真实的 f_d 。

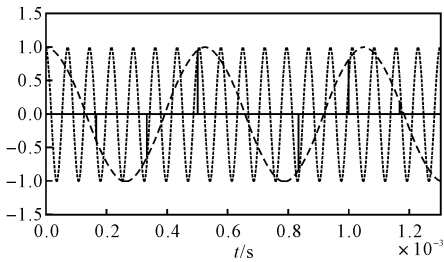


图 6 低 PRF 状态下相位检波器的输出,难以得到真实的多普勒频移

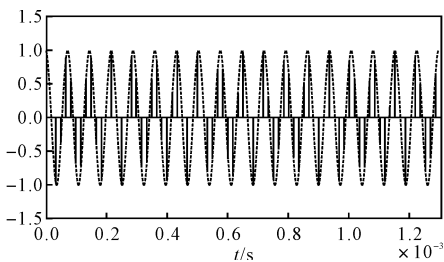


图 7 高 PRF 状态下相位检波器的输出,真实反映多普勒频移

3 结 论

在测距阶段采用低 PRF,可以得到不模糊的

距离信息,然后对进入距离门的回波脉冲进行复制,得到高 PRF 相参脉冲串,再利用新得到的高 PRF 相参脉冲串测速,可以得到不模糊的速度信息,使得在发射低 PRF 信号的状态下,不但能不模糊的测距,还能够不模糊的测速。

参考文献:

[1] 邱绍峰,范戈.光纤延迟线在雷达信号处理中的应用[J].光电技术,2003,29(4):429-430.
 [2] 张忠华,孙晓昶.光控相控阵雷达[J].电讯技术,2004(2):71-75.
 [3] 酆达,李铮,郑铮,等.基于光纤延迟的光脉冲有源复制器[J].北京航空航天大学学报,2005,31(12):212-217.
 [4] 陈宇晓,酆达.光脉冲光纤周期复制技术研究[J].激光技术,2005,29(6):604-607.
 [5] 林茂庸,柯有安.雷达信号理论[M].北京:国防工业出版社,1984.
 [6] 丁鹭飞,耿富录.雷达原理[M].西安:电子科技大学出版社,1984.
 [7] 解安国,薛余网,郭建文.微波光纤延迟线技术研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2002(4):1-5.
 [8] Ming-Chiang Li. A high precision Doppler radar based on optical fiber delay loops[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(12):3319-3328.