



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111551925 A

(43)申请公布日 2020.08.18

(21)申请号 202010433532.X

(22)申请日 2020.05.21

(71)申请人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

(72)发明人 全英汇 程远 冯伟 别博文

肖国尧 陈侠达 李亚超 邢孟道

(74)专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华

(51)Int.Cl.

G01S 13/58(2006.01)

G01S 7/285(2006.01)

G01S 7/41(2006.01)

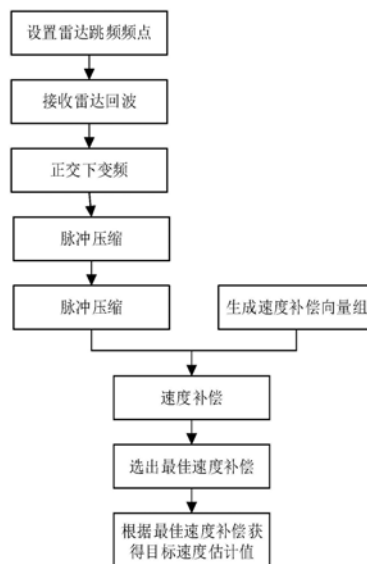
权利要求书3页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

基于FFT的脉间频率捷变雷达的目标速度估计方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于FFT的脉间频率捷变雷达的目标速度估计方法,主要解决现有脉间频率捷变雷达进行目标速度估计时计算量大、耗时久的问题。其实现方案是:随机生成脉间频率捷变雷达的跳频频点;按生成的跳频频点顺序发射和接收脉间频率捷变雷达回波;通过正交下变频获得回波基带复信号;对基带复信号做脉冲压缩处理;根据雷达系统速度检测范围和检测精度生成速度补偿向量组;对脉冲压缩矩阵按列进行速度补偿处理;用基于FFT的方法选取最佳速度补偿结果;根据最佳速度补偿结果得到目标速度的估计。本发明相比现有的最大相关法大大减少了计算量、节省了硬件计算资源,提高了信号处理实时性,可应用于脉间频率捷变雷达目标检测。



1. 一种基于FFT的脉间频率捷变雷达的目标速度估计方法,其特征在于,包括如下:

(1) 预设载波频率跳变范围,并将其等分为N个频点,N为2的整数次幂,从1到N顺次编号;在脉间频率捷变雷达的每个相干积累间隔内从N个频点中随机选出M个频点作为载波频率,M不小于N/4;

(2) 在一个相干积累间隔内,脉间频率捷变雷达发射机以(1)中选出的M个频点为载频,依次发射M个线性调频脉冲信号;该脉冲信号经目标反射后,由脉间频率捷变雷达接收机顺次接收;

(3) 用正交下变频方法,去除每一个雷达接收回波中的载频信息,得到M个基带复信号;

(4) 将M个基带复信号与雷达发射脉冲信号分别转换至频域,并对后者取共轭,再对两者依次进行哈达玛积和快速傅里叶逆变换IFFT,得到M行L列的脉冲压缩矩阵 Φ ,其中L为每个脉冲压缩的数据长度;

(5) 根据雷达系统的速度检测范围和检测精度,并参照M个载频的排序关系,生成Q个补偿速度 $v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q$ 以及Q个M维的速度补偿向量 $V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q$,其中 v^q 表示第q个补偿速度, V_{comp}^q 表示第q个速度补偿向量, $q=1, 2, \dots, Q$;

(6) 按距离单元取出脉冲压缩矩阵,分别与Q个速度补偿向量做哈达玛积,得到Q个速度补偿结果,即Q个M维的向量 $s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^q, \dots, s_l^Q$,其中 s_l^q 表示第q个速度补偿结果, $q=1, 2, \dots, Q$, $l=1, 2, \dots, L$ 表示第1个距离单元,每一个补偿结果中的M个元素一一对应相干积累间隔内的M个跳频频点;

(7) 选取最佳速度补偿结果:

(7a) 将每一个速度补偿结果向量中的M个元素依据跳频频点的编号进行重排,并在编号不连续处填充0元素,使其扩充到N维,得到Q个N维的新的速度补偿结果 $y_l^1, y_l^2, \dots, y_l^q, \dots, y_l^Q$,其中 y_l^q 表示重排后的第q个速度补偿结果, $q=1, 2, \dots, Q$, $l=1, 2, \dots, L$ 表示第1个距离单元;

(7b) 对每一个距离单元对应的Q个新的速度补偿结果,分别做Q次N点快速傅里叶变换FFT,得到频谱 $Y_l^1, Y_l^2, \dots, Y_l^q, \dots, Y_l^Q$,其中 Y_l^q 表示第q个速度补偿结果的频谱;

(7c) 根据最大FFT峰值确定每一个距离单元对应的Q个速度补偿结果中的最佳速度补偿结果 $s_l^{q'}, s_l^{q'} \in s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^q, \dots, s_l^Q$;

(8) 根据最佳速度补偿结果 $s_l^{q'}$ 找到对应的最佳速度补偿向量 $V_{comp}^{q'}$, $V_{comp}^{q'}$ 中的速度值 $v^{q'}$ 即为目标速度的估计值,其中

$$V_{comp}^{q'} \in V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q, v^{q'} \in v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q, q=1, 2, \dots, Q。$$

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,(3)中用正交下变频方法,去除每一个雷达接收回波中的载频信息,实现如下:

(3a) 将回波信号 $x(t)$ 表示为:

$$x(t) = \text{Re} \left\{ (a(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi(t))]) \right\} = a(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)]$$

其中, f_0 为载频频率, $a(t)$ 为信号幅度, $\varphi(t)$ 为信号相位, $\text{Re} \{ \}$ 代表取实部;

(3b) 将回波信号 $x(t)$ 分别与本振信号 $\cos(2\pi f_0 t)$ 和 $-\sin(2\pi f_0 t)$ 相乘, 得到混频输出 \tilde{X} :

$$\tilde{X}(t) = \tilde{X}_I + j\tilde{X}_Q$$

其中, \tilde{X}_I 称为同相分量, \tilde{X}_Q 称为正交分量, 分别表示如下:

$$\tilde{X}_I = x(t) \cos(2\pi f_0 t) = \frac{a(t)}{2} [\cos(4\pi f_0 t + \varphi(t)) + \cos(\varphi(t))]$$

$$\tilde{X}_Q = -x(t) \sin(2\pi f_0 t) = -\frac{a(t)}{2} [\sin(4\pi f_0 t + \varphi(t)) - \sin(\varphi(t))];$$

(3c) 将混频输出 \tilde{X} 通过低通滤波器滤除其高频杂波与镜像频率, 得到基带复信号:

$$X(t) = \frac{a(t)}{2} [\cos(\varphi(t)) + j \sin(\varphi(t))]$$

3. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, (4) 中得到 M 行 L 列的脉冲压缩矩阵 Φ , 表示如下:

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_{1,1} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} & a_{1,2} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} & \dots & a_{1,l} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} & \dots & a_{1,L} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} \\ a_{2,1} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} & a_{2,2} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} & \dots & a_{2,l} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} & \dots & a_{2,L} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} & a_{m,2} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} & \dots & a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} & \dots & a_{m,L} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M,1} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} & a_{M,2} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} & \dots & a_{M,l} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} & \dots & a_{M,L} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} \end{bmatrix}$$

其中, $a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}}$ 为第 m 个脉冲的脉冲压缩结果中第 l 个距离单元处的数值 $m=1, 2, \dots, M, l=1, 2, \dots, L$, $a_{m,1}$ 为其包络幅值, f_m 为第 m 个脉冲的载频, r 为目标径向距离, v 为目标速度, T_r 为脉冲重复周期, c 为光速。

4. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, (5) 中生成 Q 个 M 维的速度补偿向量, 是先根据雷达速度检测范围和速度检测精度, 设置 Q 个补偿速度 $v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q$, 再构造 Q 个速度补偿向量 $V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q$, 其中第 q 个速度补偿向量表示如下:

$$V_{comp}^q = \begin{bmatrix} e^{j4\pi f_1 \frac{v^q(1-1)T_r}{c}} \\ e^{j4\pi f_2 \frac{v^q(2-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ e^{j4\pi f_m \frac{v^q(m-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ e^{j4\pi f_M \frac{v^q(M-1)T_r}{c}} \end{bmatrix},$$

其中, $e^{j4\pi f_m \frac{v^q(m-1)T_r}{c}}$ 为针对第 m 个脉冲的速度补偿系数, f_m 为第 m 个脉冲的载频, $m=1, 2, \dots$,

M, r 为目标径向距离, v^q 为第 q 个补偿速度, $q=1, 2, \dots, Q, T_r$ 为脉冲重复周期, c 为光速。

5. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, (6)中得到的 Q 个速度补偿结果, 表示如下:

$$s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^q, \dots, s_l^Q,$$

其中 s_l^q 为第 q 个速度补偿结果, 具体表示为:

$$s_l^q = \begin{bmatrix} a_{1,l} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{(v-v^q)(1-1)T_r}{c}} \\ a_{2,l} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{(v-v^q)(2-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{(v-v^q)(m-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ a_{M,l} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{(v-v^q)(M-1)T_r}{c}} \end{bmatrix},$$

其中, $a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{(v-v^q)(m-1)T_r}{c}}$ 为第 m 个脉冲的第 l 个距离单元处经过速度 v^q 补偿后的结果, $m=1, 2, \dots, M, l=1, 2, \dots, L, f_m$ 为第 m 个脉冲的载频, r 为目标径向距离, v^q 为第 q 个补偿速度, $q=1, 2, \dots, Q, T_r$ 为脉冲重复周期, c 为光速。

6. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, (7a)中将每一个速度补偿结果向量中的 M 个元素依据跳频频点的编号进行重排, 是针对第 l 个距离单元的速度补偿结果 $s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^Q, l=1, 2, \dots, L$, 先建立 Q 个 N 维的零向量, 再将每一个速度补偿结果中的 M 个元素依据跳频频点的编号依次替换 N 维零向量中对应位置的0元素, 得到 Q 个新的速度补偿结果 $y_l^1, y_l^2, \dots, y_l^Q$ 。

7. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, (7c)中确定 Q 个速度补偿结果中的最佳速度补偿结果, 是搜索频谱 $Y_l^1, Y_l^2, \dots, Y_l^Q$ 中的最大模值, 该最大模值所在的频谱记为 $Y_l^{q'}$, 该 $Y_l^{q'}$ 对应的速度补偿结果 $s_l^{q'}$ 即为最佳速度补偿结果。

基于FFT的脉间频率捷变雷达的目标速度估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达信号处理技术领域,更进一步涉及一种目标速度估计方法,可用于脉间频率捷变雷达的目标检测。

背景技术

[0002] 随着雷达干扰机的技术进步,针对传统固定参数脉冲多普勒体制雷达的干扰策略与干扰设备已经日趋成熟,于是一种脉冲间载波频率随机跳变的新体制雷达应运而生。脉间频率捷变雷达由于其载波频率随机跳变的特性,不易被干扰机截获,从而提高雷达抗干扰的能力。但也正是因为脉间频率跳变,导致脉间信号相位不连续,因此无法进行传统的相参积累,从而无法通过传统的动目标检测MTD技术来估计目标的速度。西安电子科技大学在其公开的专利文献“基于相参频率捷变雷达的速度解模糊方法”(专利申请号201910369131X,公布号CN110109078A)中公开了一种基于相参频率捷变雷达的速度解模糊方法,包括脉冲压缩、构造多普勒向量组、采用最大相关法确定多普勒偏移频率。该方案虽然可以估计出目标多普勒偏移频率从而得到目标速度的估计,但是由于其采用最大相关法,计算量较大,对于雷达信号处理实时性要求高的应用场合,难以满足实时处理的需求。

发明内容

[0003] 本发明的目的是针对上述现有技术的不足,提出一种基于FFT的脉间频率捷变雷达的目标速度估计方法,减小计算量,提高信号处理速度,满足雷达信号处理实时性要求。

[0004] 为实现上述目的,本发明技术方案包括如下步骤:

[0005] (1) 预设载波频率跳变范围,并将其等分为N个频点,N为2的整数次幂,从1到N顺次编号;在脉间频率捷变雷达的每个相干积累间隔内从N个频点中随机选出M个频点作为载波频率,M不小于N/4;

[0006] (2) 在一个相干积累间隔内,脉间频率捷变雷达发射机以(1)中选出的M个频点为载频,依次发射M个线性调频脉冲信号;该脉冲信号经目标反射后,由脉间频率捷变雷达接收机顺次接收;

[0007] (3) 用正交下变频方法,去除每一个雷达接收回波中的载频信息,得到M个基带复信号;

[0008] (4) 将M个基带复信号与雷达发射脉冲信号分别转换至频域,并对后者取共轭,再对两者依次进行哈达玛积和快速傅里叶逆变换IFFT,得到M行L列的脉冲压缩矩阵 Φ ,其中L为每个脉冲压缩的数据长度;

[0009] (5) 设置速度检测范围和检测精度,并参照M个载频的排序关系,生成Q个补偿速度 $v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q$ 以及Q个M维的速度补偿向量 $V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q$,其中 v^q 表示第q个补偿速度, V_{comp}^q 表示第q个速度补偿向量, $q=1, 2, \dots, Q$;

[0010] (6) 按距离单元取出脉冲压缩矩阵,分别与Q个速度补偿向量做哈达玛积,得到Q个速度补偿结果,即Q个M维的向量 $s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^q, \dots, s_1^Q$,其中 s_1^q 表示第q个速度补偿结果, $q=1,$

$2, \dots, Q, l=1, 2, \dots, L$ 表示第1个距离单元, 每一个补偿结果中的M个元素一一对应相干积累间隔内的M个跳频频点;

[0011] (7) 选取最佳速度补偿结果:

[0012] (7a) 将每一个速度补偿结果向量中的M个元素依据跳频频点的编号进行重排, 并在编号不连续处填充0元素, 使其扩充到N维, 得到Q个N维的新的速度补偿结果 $y_l^1, y_l^2, \dots, y_l^q, \dots, y_l^Q$, 其中 y_l^q 表示重排后的第q个速度补偿结果, $q=1, 2, \dots, Q, l=1, 2, \dots, L$ 表示第1个距离单元;

[0013] (7b) 对每一个距离单元对应的Q个新的速度补偿结果, 分别做Q次N点快速傅里叶变换FFT, 得到频谱 $Y_l^1, Y_l^2, \dots, Y_l^q, \dots, Y_l^Q$, 其中 Y_l^q 表示第q个速度补偿结果的频谱;

[0014] (7c) 根据最大FFT峰值确定每一个距离单元对应的Q个速度补偿结果中的最佳速度补偿结果 $s_l^{q'}$, $s_l^{q'} \in s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^q, \dots, s_l^Q$;

[0015] (8) 根据最佳速度补偿结果 $s_l^{q'}$ 找到对应的最佳速度补偿向量 $V_{comp}^{q'}$, $V_{comp}^{q'}$ 中的速度值 $v^{q'}$ 即为目标速度的估计值, 其中 $V_{comp}^{q'} \in V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q$, $v^{q'} \in v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q, q=1, 2, \dots, Q$.

[0016] 本发明具有如下优点:

[0017] 第一, 本发明基于脉间频率捷变体制雷达, 相比传统固定参数雷达, 脉间频率捷变雷达信号不容易被截获, 有更强的抗干扰能力。

[0018] 第二, 本发明采用速度补偿的方式估计目标速度, 在选取最佳补偿速度时, 先利用快速傅里叶变换FFT将速度补偿结果转换到频域, 然后通过搜索最大谱峰来确定最佳补偿结果, 从而获得最佳补偿速度。在系统参数满足一定条件时, 相比于现有的最大相关法, 本发明能够显著减小计算量, 提高雷达系统实时信号处理能力。

[0019] 例如, 对于跳频总点数为N、一个相干积累间隔内的雷达脉冲数为M、速度补偿向量数目为Q的脉间频率捷变雷达, 其中 $M < N$, 若采用现有的最大相关法选取最佳补偿速度时, 需要额外提供一个 $M \times N$ 的字典矩阵, 总共需要 QM 次复数乘法和 $Q(M-1)N$ 次复数加法; 而采用本发明方法时, 筛选出最佳补偿速度总共需要 $\frac{QN}{2} \log_2 N$ 次复数乘法和 $QN \log_2 N$ 次复数加法。当满足 $M > (1 + \log_2 N)$ 时, 本发明可以大大减小计算量, 有利于提高雷达信号处理速度、满足实时性需求, 同时节省硬件计算资源。以 $M=64, N=128, Q=27$ 为例, 最大相关法需要 221184 复数乘法和 217728 次复数加法, 而本发明方法只需要 6048 次复数乘法和 12096 次复数加法, 计算量显著减小。

附图说明

[0020] 图1为本发明的实现总流程图;

[0021] 图2为本发明中选取最佳速度补偿结果子流程图。

具体实施方式

[0022] 为了更好的说明本发明的设计方案, 下面结合附图和实施例对本发明作详细描述。

[0023] 脉间频率捷变雷达由于其发射载频在不同脉冲间随机跳变的特性,其雷达波形不易被干扰机捕获和模仿,因而在抗干扰能力上大大强于传统的固定参数雷达。而频率捷变带来的相干积累难度增加,使得目标参数估计的计算量增大。针对目标速度估计,现有的最大相关法计算量大、硬件计算资源消耗大、信号处理效率低,不利于雷达系实现统实时信号处理。本实例使用脉间频率捷变雷达,通过用FFT运算替代相关运算的方法,用FFT谱峰搜索来获得最佳速度补偿结果,进而获得目标速度估计。

[0024] 参见图1,本实例的实现步骤如下:

[0025] 步骤1,生成跳频频点。

[0026] 设置脉间频率捷变雷达载波频率的跳变范围,并将其等分为N个频点,N为2的整数次幂,从1到N顺次编号;

[0027] 设第一个频点 $f_1=f_c$,频率等分间隔为 Δf ,且 $\Delta f=1/T_p$,其中 T_p 表示雷达发射脉冲宽度,则第n个频点表示为 $f_n=f_c+(n-1)\Delta f$, $n=1,2,\dots,N$;

[0028] 在脉间频率捷变雷达的每个相干积累间隔内从这N个频点中随机选出M个频点作为载波频率,M不小于N/4。

[0029] 本实例中每个相干积累间隔选取的M个频点是随机的,没有规律性,因此干扰机不易截获雷达脉冲也无法预判下一个雷达脉冲的载频频点。

[0030] 步骤2,顺次接收脉间频率捷变雷达回波。

[0031] 脉间频率捷变雷达发射机在一个相干积累间隔内发射M个雷达脉冲信号,同时告知接收机这M个频点的信息,雷达脉冲信号经目标反射后,由接收机按照M个频点的频率和顺序顺次接收这M个频点的相应回波信号。

[0032] 步骤3,获得回波基带复信号。

[0033] 用正交下变频方法,去除每一个雷达接收回波中的载频信息,得到M个基带复信号,其具体实现如下:

[0034] (3.1)接收机接收的回波信号 $x(t)$ 表示如下:

$$[0035] \quad x(t) = \operatorname{Re}\left\{a(t)\exp\left[j\left(2\pi f_0 t + \varphi(t)\right)\right]\right\} = a(t)\cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)],$$

[0036] 其中, f_0 为载频频率, $a(t)$ 为信号幅度, $\varphi(t)$ 为信号相位, $\operatorname{Re}\{\}$ 代表取实部;

[0037] (3.2)将回波信号 $x(t)$ 分别与两个本振信号 $\cos(2\pi f_0 t)$ 和 $-\sin(2\pi f_0 t)$ 相乘,得到混频输出 \tilde{X} :

$$[0038] \quad \tilde{X}(t) = \tilde{X}_I + j\tilde{X}_Q,$$

[0039] 其中, j 为虚数单位, \tilde{X}_I 称为同相分量, \tilde{X}_Q 称为正交分量,分别表示如下:

$$[0040] \quad \tilde{X}_I = x(t)\cos(2\pi f_0 t) = \frac{a(t)}{2}\left[\cos(4\pi f_0 t + \varphi(t)) + \cos(\varphi(t))\right]$$

$$[0041] \quad \tilde{X}_Q = -x(t)\sin(2\pi f_0 t) = -\frac{a(t)}{2}\left[\sin(4\pi f_0 t + \varphi(t)) - \sin(\varphi(t))\right];$$

[0042] (3.3)将混频输出 \tilde{X} 通过低通滤波器滤除其高频杂波与镜像频率,得到基带复信号:

$$[0043] \quad X(t) = \frac{a(t)}{2} [\cos(\varphi(t)) + j \sin(\varphi(t))]$$

[0044] 步骤4, 脉冲压缩处理。

[0045] 将M个基带复信号与雷达发射脉冲信号分别转换至频域, 并对后者取共轭, 再对两者依次进行哈达玛积和快速傅里叶逆变换IFFT, 得到M行L列的脉冲压缩矩阵 Φ , 表示如下:

$$[0046] \quad \Phi = \begin{bmatrix} a_{1,1} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} & a_{1,2} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{1,l} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{1,L} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{v(1-1)T_r}{c}} \\ a_{2,1} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} & a_{2,2} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{2,l} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{2,L} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{v(2-1)T_r}{c}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} & a_{m,2} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{m,L} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M,1} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} & a_{M,2} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{M,l} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} & \cdots & a_{M,L} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{v(M-1)T_r}{c}} \end{bmatrix}$$

[0047] 其中, $a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{v(m-1)T_r}{c}}$ 为第m个脉冲的脉冲压缩结果中第l个距离单元处的数值 $m=1, 2, \dots, M, l=1, 2, \dots, L, L$ 为每个脉冲压缩的数据长度, $a_{m,1}$ 为其包络幅值, f_m 为第m个脉冲的载频, r 为目标径向距离, v 为目标速度, T_r 为脉冲重复周期, c 为光速。

[0048] 传统的固定参数雷达可以对脉冲压缩矩阵采用动目标检测MTD的方法来估计目标速度, 而本实例由于采用脉间频率捷变体制雷达, 脉冲间相位不连续, MTD将失效, 需要用速度补偿的方法来估计速度。

[0049] 步骤5, 生成速度补偿向量组。

[0050] (5.1) 根据雷达系统预设的速度检测范围和检测精度, 生成Q个补偿速度 $v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q, q=1, 2, \dots, Q$;

[0051] (5.2) 根据补偿速度 $v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q$, 并参照M个载频的排序关系, 生成Q个M维的速度补偿向量 $V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q$, 其中 v^q 表示第q个补偿速度, V_{comp}^q 表示第q个速度补偿向量, 表示如下:

$$[0052] \quad V_{comp}^q = \begin{bmatrix} e^{j4\pi f_1 \frac{v^q(1-1)T_r}{c}} \\ e^{j4\pi f_2 \frac{v^q(2-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ e^{j4\pi f_m \frac{v^q(m-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ e^{j4\pi f_M \frac{v^q(M-1)T_r}{c}} \end{bmatrix},$$

[0053] 其中, $e^{j4\pi f_m \frac{v^q(m-1)T_r}{c}}$ 为针对第m个脉冲的速度补偿系数, f_m 为第m个脉冲的载频, $m=1, 2, \dots, M, r$ 为目标径向距离, v^q 为第q个补偿速度, T_r 为脉冲重复周期, c 为光速。

[0054] 步骤6, 速度补偿。

[0055] 按距离单元取出脉冲压缩矩阵, 分别与Q个速度补偿向量做哈达玛积, 得到Q个速

度补偿结果,即Q个M维的向量 $s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^q, \dots, s_l^Q$, 其中 s_l^q 表示第q个速度补偿结果,表示为:

$$[0056] \quad s_l^q = \begin{bmatrix} a_{1,l} e^{-j4\pi f_1 \frac{r}{c} - j4\pi f_1 \frac{(v-v^q)(1-1)T_r}{c}} \\ a_{2,l} e^{-j4\pi f_2 \frac{r}{c} - j4\pi f_2 \frac{(v-v^q)(2-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{(v-v^q)(m-1)T_r}{c}} \\ \vdots \\ a_{M,l} e^{-j4\pi f_M \frac{r}{c} - j4\pi f_M \frac{(v-v^q)(M-1)T_r}{c}} \end{bmatrix},$$

[0057] 其中, $a_{m,l} e^{-j4\pi f_m \frac{r}{c} - j4\pi f_m \frac{(v-v^q)(m-1)T_r}{c}}$ 为第m个脉冲的第1个距离单元处经过速度 v^q 补偿后的结果, $m=1, 2, \dots, M, l=1, 2, \dots, L$ 表示第1个距离单元, f_m 为第m个脉冲的载频, r 为目标径向距离, v^q 为第q个补偿速度, $q=1, 2, \dots, Q, T_r$ 为脉冲重复周期, c 为光速;

[0058] 每一个补偿结果中的M个元素一一对应相干积累间隔内的M个跳频频点。

[0059] 步骤7, 选取最佳速度补偿结果。

[0060] 参照图2, 本步骤的具体实现如下:

[0061] (7.1) 将每一个速度补偿结果向量中的M个元素依据跳频频点的编号进行重排, 即针对第1个距离单元的速度补偿结果 $s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^Q$, $l=1, 2, \dots, L$, 先建立Q个N维的零向量, 再将每一个速度补偿结果中的M个元素依据跳频频点的编号依次替换N维零向量中对应位置的0元素, 得到Q个新的速度补偿结果 $y_l^1, y_l^2, \dots, y_l^Q$;

[0062] (7.2) 对速度补偿结果 $y_l^1, y_l^2, \dots, y_l^Q$ 分别做快速傅里叶变换FFT, 得到频谱 $Y_l^1, Y_l^2, \dots, Y_l^Q$;

[0063] (7.3) 搜索频谱 $Y_l^1, Y_l^2, \dots, Y_l^Q$ 中的最大模值, 该最大模值所在的频谱记为 $Y_l^{q'}$, 该 $Y_l^{q'}$ 对应的速度补偿结果 $s_l^{q'}$ 即为最佳速度补偿结果。

[0064] 步骤8, 得到目标速度估计。

[0065] 根据最佳速度补偿结果 $s_l^{q'}$ 找到对应的最佳速度补偿向量 $V_{comp}^{q'}$, $V_{comp}^{q'}$ 中的速度值 $v^{q'}$ 即为目标速度的估计值, 其中 $V_{comp}^{q'} \in V_{comp}^1, V_{comp}^2, \dots, V_{comp}^q, \dots, V_{comp}^Q$, $v^{q'} \in v^1, v^2, \dots, v^q, \dots, v^Q, q=1, 2, \dots, Q$ 。

[0066] 以上描述仅是本发明的一个具体实例, 并未构成对本发明的任何限制, 显然对于本领域的专业人员来说, 在了解了本发明内容和原理后都可能在背离本发明原理、结构的情况下, 进行形式和细节上的各种修改和改变, 但是这些基于本发明思想的修正和改变仍在本发明的权利要求保护范围之内。

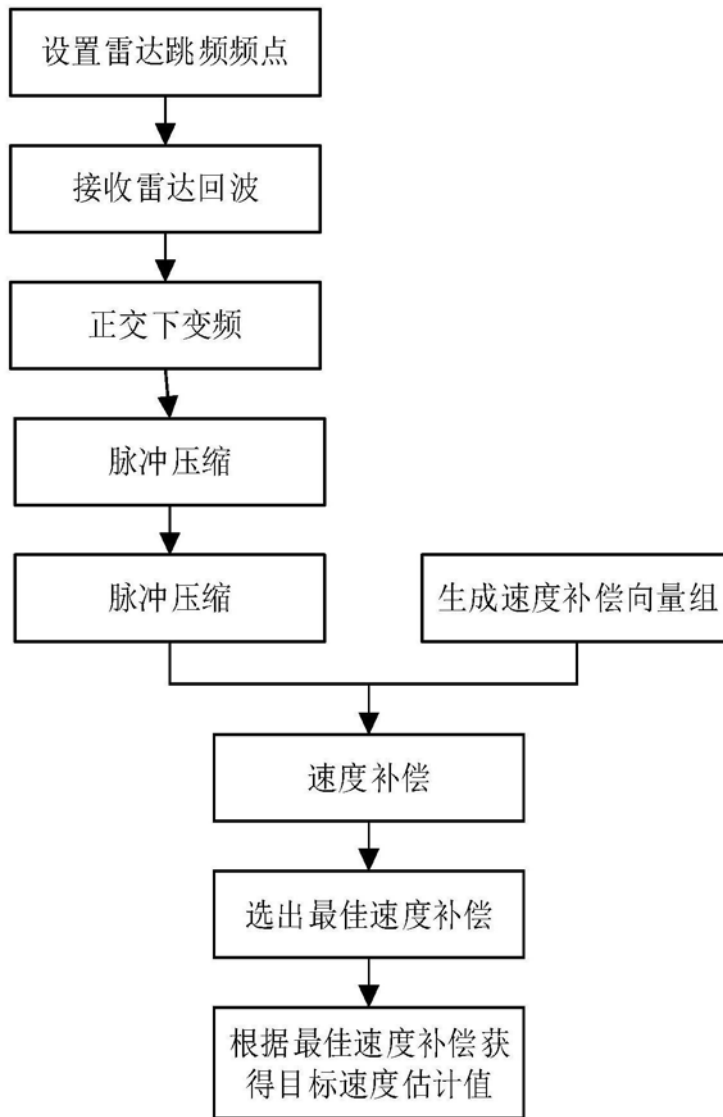


图1

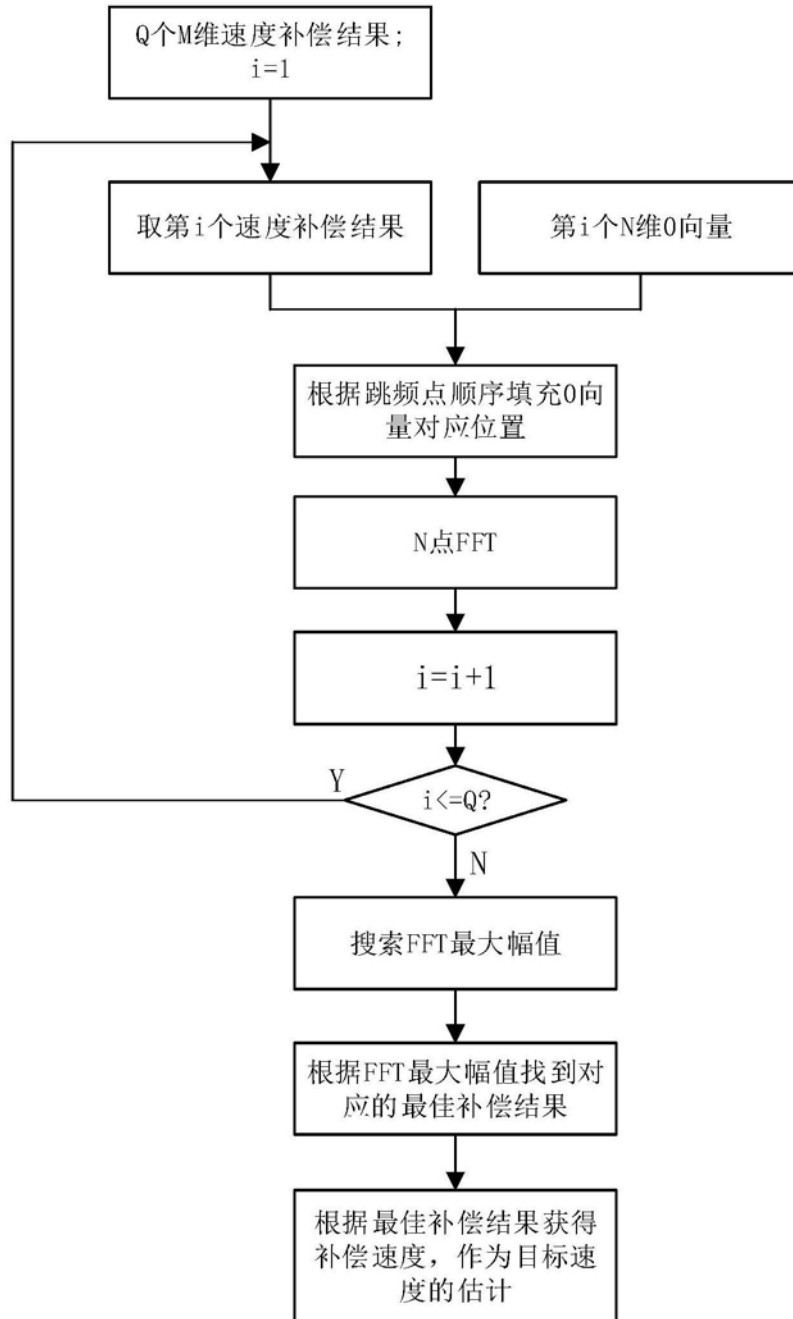


图2