

Keystone 变换半盲速点效应的抑制和消除

洪永彬 高梅国 王俊岭* 秦国杰
(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘要: Keystone 变换可用于补偿运动目标在脉冲多普勒(PD)雷达相参积累时间内的线性跨距离单元走动,但在多普勒模糊情况下,常规 Keystone 变换实现方法会出现“半盲速点”效应。该文分析了“半盲速点”效应产生的原因,并介绍了已有的“半盲速点”效应消除方法。为减少运算量,首先提出一种“半盲速点”效应抑制方法,并在此基础上提出了一种新的“半盲速点”效应消除方法。新方法能够对感兴趣的某个多普勒模糊区间内的所有速度目标的线性距离走动较好地补偿,而运算量约为已有方法的 50%。理论分析和仿真结果均证明了所提方法的有效性。

关键词: 脉冲多普勒雷达; Keystone 变换; 多普勒模糊; “半盲速点”效应

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)01-0175-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00490

The Suppression and Elimination of Half Blind Velocity Effect Associated with Keystone Transform

Hong Yong-bin Gao Mei-guo Wang Jun-ling Qin Guo-jie

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Keystone transform can be employed to eliminate the effects of linear range migration through resolution cells of moving targets during the coherent integration time of Pulse Doppler (PD) radar. However, with Doppler ambiguity, Half-Blind-Velocity Effect (HBVE) occurs when the conventional implementation method of keystone transform is applied. The causes of HBVE are analyzed, and the existing elimination methods of HBVE are introduced. To decrease the computation cost, a method to suppress HBVE is firstly presented, on the basis of which a new method of HBVE elimination is put forward. The proposed method can remove the linear range migration of moving targets with all possible velocities within a desired ambiguous Doppler interval, and its computation cost is reduced by almost 50% compared to the existing one. Theoretical analysis and simulation results validate the effectiveness of the presented methods.

Key words: Pulse Doppler (PD) radar; Keystone transform; Doppler ambiguity; Half-Blind-Velocity Effect (HBVE)

1 引言

隐身技术的发展极大地削弱了雷达的威力,因此,对微弱目标的探测成为雷达急需解决的问题之一。传统雷达为提高对隐身飞机、导弹、舰船等小 RCS 目标的探测能力,一般采用增大发射功率和选用大口径天线等方法^[1],但会使雷达造价增高。增加积累时间是提高雷达对微弱目标探测能力的一种重要手段^[1-6],但是对于高距离分辨脉冲多普勒(PD)雷达,积累时间受限于目标运动。这是因为在相参积累时间内,目标必须保持在同一个距离分辨单元,否则会造成相参积累信噪比增益损失。因此,必须对目标跨距离单元走动进行补偿。

Keystone 变换是一种用于校正目标线性距离走动的有效方法,最早由 Perry 等人^[7]提出并广泛应用于合成孔径雷达^[7-9],鉴于其优越的算法性能,后来又被迅速引用到 ISAR 成像^[10,11]、PD 雷达长时间积累检测^[1-6]和多帧步进频信号处理^[12,13]等领域中。与其它距离走动补偿方法相比,Keystone 变换主要有以下优点:(1)无速度模糊时,算法参数仅依赖于系统参数,而与待检测目标的运动参数无关;(2)可同时对多个目标进行线性距离走动补偿;(3)保留了目标回波的相位信息,可获得相参积累的效果;(4)在低信噪比时依然适用。

当目标速度较高或者雷达采用低重频时,必须考虑多普勒模糊的问题。在多普勒模糊倍数可以获知的情况下,常规 Keystone 变换实现方法通常能够获得良好的补偿效果,但会引起“半盲速点”效应^[14]。针对该问题,文献[1]和文献[15]提出了一种基于多普

2013-04-15 收到, 2013-09-17 改回

国家自然科学基金(61001190)和上海航天科技创新基金(SAST 201240)资助课题

*通信作者: 王俊岭 email:wjl@gmail.com

勒搬移的“半盲速点”效应消除方法,该方法克服了“半盲速点”效应,但其运算量约为常规 Keystone 变换的两倍,不利于工程实现。为了降低运算量,本文首先提出一种“半盲速点”效应抑制方法,并在此基础上提出一种新的“半盲速点”效应消除方法。新方法能够很好地消除“半盲速点”效应,而运算量相对于文献[1]和文献[15]提出的方法降低了近50%。

2 Keystone 变换及其性能分析

线性调频 PD 雷达发射信号的时域表达式为

$$x(t) = p(t - mT_r) \exp(j2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中 t 表示时间, m 表示脉冲序号, T_r 表示脉冲重复时间, f_c 表示雷达载波中心频率, $p(t)$ 表示 chirp 脉冲。

假设在雷达照射区域内有 K 个点目标,则第 m 个脉冲的总回波在混频后可以表示为

$$s(t', m) = \sum_{i=1}^K A_i p \left[t' - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} R_i(t_m) \right] \quad (2)$$

式中 $t_m = mT_r$ 表示慢时间, $t' = t - t_m$ 表示快时间, A_i 和 $R_i(t_m)$ 分别表示第 i 个点目标的回波强度和第 i 个点目标在 t_m 时刻的距离,并记 $R_{i0} = R_i(0)$ 。式(2)沿快时间维 t' 的傅里叶变换为

$$S(f, m) = P(f) \sum_{i=1}^K A_i \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) R_i(t_m) \right] \quad (3)$$

假设各点目标分别以速度 v_i 相对雷达做匀速直线运动,且满足 $2v_i/c \ll 1$,则 $R_i(t_m) = R_{i0} - v_i t_m$,故式(3)可以改写为

$$S(f, m) = \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp \left[j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) v_i t_m \right] \quad (4)$$

其中

$$G_i(f) = P(f) A_i \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) R_{i0} \right] \quad (5)$$

式(4)中,指数项 $\exp(j4\pi v_i t_m / c)$ 表示距离和多普勒之间存在耦合,这是由各点目标的线性距离走动造成的。为了消除线性距离走动,对式(4)中的慢时间 t_m 进行伸缩变换,即 Keystone 变换^[7],得到

$$R(f, m) = S \left(f, \frac{f_c}{f_c + f} m \right) = \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} f_c v_i t_m \right\} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,Keystone 变换消除了距离和多普勒之间存在的耦合项,从而补偿了所有点目标的线性距离走动。然而,实际雷达是以慢时间 t_m 对回波进行采样的, $f_c t_m / (f_c + f)$ 时刻并没有实际的采样值,故 Keystone 变换常借助 sinc 内插的方法实现^[1,2,4,13,15]。在多普勒模糊情况下,基于 sinc 内插的

Keystone 变换实现方法可以表示为^[15]

$$R(f, m) \doteq \exp \left(j2\pi \frac{f_c}{f_c + f} F m \right) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left[S(f, n) \operatorname{sinc} \left(\frac{f_c}{f_c + f} m - n \right) \right] \quad (7)$$

式中 F 为多普勒模糊倍数, N 为相参积累时间内的脉冲个数。由式(7)可知,Keystone 变换依赖于 F ,但多数情况下, F 可以通过目标运动特性的先验信息或者搜索雷达的装订信息估计出,故这种限制是相对宽松的^[2]。

式(7)所示的 Keystone 变换实现方法通常能够对目标的线性距离走动较好地补偿,但如文献[14]所述,当目标速度位于“半盲速点” $v = (F + 0.5) f_r c / (2f_c)$ 附近时 (f_r 为脉冲重复频率),其补偿性能显著下降,称为“半盲速点”效应。为便于描述,将“半盲速点”效应对应的速度区间称为“半盲速区间”,表示在“半盲速点”附近补偿损失大于某设定门限的速度取值范围。显然,设定门限越大,对应的“半盲速区间”长度越小。引起“半盲速点”效应的因素有两个:(1)有限长 sinc 插值方法等效为一个低通数字滤波器,无模糊频率取值范围为 $[-f_r/2, f_r/2)$,在频率 $\pm f_r/2$ 附近,插值效果不理想;(2)当目标速度满足式(8)所定义的“模糊倍数突变区间”时,多普勒模糊倍数在整个距离维频率 f 的取值范围内会发生突变^[10],式(7)将不再适用。

$$\frac{(F + 0.5) f_r c}{2(f_c + B/2)} < v < \frac{(F + 0.5) f_r c}{2(f_c - B/2)} \quad (8)$$

式中 f_r 为脉冲重复频率, B 为 chirp 信号带宽。由以上描述可知,“模糊倍数突变区间”由式(8)严格定义,而“半盲速区间”则与设定的补偿损失门限,有限长 sinc 插值和“模糊倍数突变区间”有关。

3 基于多普勒搬移的“半盲速点”效应消除方法

为了克服“半盲速点”效应,文献[1]和文献[15]对常规 Keystone 变换实现方法进行了修正。该修正方法先对 $S(f, m)$ 在慢时间维 t_m 调制一个频率为 $-f_r/2$ 的信号,故调制后信号可表示为

$$S_{\text{mod}}(f, m) = S(f, m) \cdot \exp \left[j2\pi \left(-\frac{f_r}{2} \right) t_m \right] \quad (9)$$

显然,当目标速度位于“半盲速区间”内时,式(9)使多普勒频率由 $(F + 1/2) f_r$ 附近调至 $F f_r$ 附近,从而避开了有限长 sinc 插值低通滤波器的非理想区域,也避免了多普勒模糊倍数在整个距离维频率 f 的取值范围内发生突变^[1]。仿照式(7),对 $S_{\text{mod}}(f, m)$ 进行 Keystone 变换,得到

$$\begin{aligned}
R_{\text{mod}}(f, m) &= S_{\text{mod}}\left(f, \frac{f_c}{f_c + f} m\right) \\
&\doteq \exp\left(j2\pi \frac{f_c}{f_c + f} Fm\right) \\
&\quad \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left[S_{\text{mod}}(f, n) \text{sinc}\left(\frac{f_c}{f_c + f} m - n\right) \right] \quad (10)
\end{aligned}$$

根据式(9), $R_{\text{mod}}(f, m)$ 还满足

$$\begin{aligned}
R_{\text{mod}}(f, m) &= S\left(f, \frac{f_c}{f_c + f} m\right) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_c}{f_c + f} m\right) \\
&= R(f, m) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_c}{f_c + f} m\right) \quad (11)
\end{aligned}$$

结合式(10)和式(11), 得到修正的基于 sinc 内插的 Keystone 变换公式为

$$\begin{aligned}
R(f, m) &= R_{\text{mod}}(f, m) \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_c}{f_c + f} m\right) \\
&\doteq \exp\left(j2\pi \frac{f_c}{f_c + f} \left(F + \frac{1}{2}\right) m\right) \\
&\quad \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left[S_{\text{mod}}(f, n) \text{sinc}\left(\frac{f_c}{f_c + f} m - n\right) \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

由以上推导过程可以看出, 利用式(9)和式(12)可以有效补偿速度位于“半盲速区间”内的目标的线性距离走动, 但该方法会出现新的“盲速点”效应, 故对速度位于“半盲速区间”外的目标, 依然需要利用式(7)进行补偿, 这种把二者结合起来的方法称为基于多普勒搬移的“半盲速点”效应消除方法。在多普勒模糊倍数 F 可以提前获知的情况下, 文献[1]和文献[15]采用该方法使得感兴趣的多普勒模糊区间内所有速度目标的线性距离走动获得了较好的补偿效果, 验证了该方法的有效性。

显然, 基于多普勒搬移的“半盲速点”效应消除方法以增加一次脉间调制, 一次 Keystone 变换和一次相参积累运算为代价, 克服了“半盲速点”效应, 故运算量约为常规 Keystone 变换补偿方法的两倍, 不利于工程应用。因此, 寻找一种更为高效的算法, 即使在允许范围内有一定的补偿损失, 依然具有重要的工程意义。

4 “半盲速点”效应抑制和消除新方法

4.1 “半盲速点”效应的抑制

如前所述, 利用式(7)所示的“先内插-后模糊校正”的方法实现 Keystone 变换时, “模糊倍数突变区间”满足式(8), 其区间长度为

$$\bar{L}(F) = (F + 0.5) f_r c \left(\frac{1}{2f_c - B} - \frac{1}{2f_c + B} \right) \quad (13)$$

由式(13)可知, $\bar{L}(F) = (2F + 1)\bar{L}(0)$ 。故 F 取值越大, $\bar{L}(F)$ 越大, 发射波形带宽对多普勒模糊倍数突变的影响越严重。为了缩短“模糊倍数突变区间”长度, 本文采用“先模糊校正-后内插”的方法实现 Keystone 变换, 推导过程如下。

假设点目标的多普勒模糊倍数为 F , 则第 i 个点目标的速度可表示为 $v_i = v_{i0} + F \cdot v_{\text{amb}}$, 其中 $v_{\text{amb}} = c/(2f_c T_r)$ 表示最大不模糊速度, $v_{i0} \in [-v_{\text{amb}}/2, v_{\text{amb}}/2]$ 。将 v_i 代入式(4)可得

$$\begin{aligned}
S(f, m) &= \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp\left[j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) v_{i0} t_m\right] \\
&\quad \cdot \exp\left[j2\pi \frac{f_c + f}{f_c} Fm\right] \quad (14)
\end{aligned}$$

先对式(14)进行模糊校正

$$\begin{aligned}
S_{\text{comp}}(f, m) &= S(f, m) \exp\left[-j2\pi \frac{f_c + f}{f_c} Fm\right] \\
&= \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp\left[j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) v_{i0} t_m\right] \quad (15)
\end{aligned}$$

式(15)中 f 与 v_{i0} 的耦合项表示模糊校正后第 i 个点目标的折叠速度 v_{i0} 造成的线性距离走动。对式(15)进行 sinc 内插以实现 Keystone 变换, 即

$$\begin{aligned}
R(f, m) &= S_{\text{comp}}\left(f, \frac{f_c}{f_c + f} m\right) \\
&= \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp\left[j \frac{4\pi}{c} f_c v_{i0} t_m\right] \\
&\doteq \sum_{n=0}^{N-1} \left[S_{\text{comp}}(f, n) \text{sinc}\left(\frac{f_c}{f_c + f} m - n\right) \right] \quad (16)
\end{aligned}$$

式(15)和式(16)所示的“先模糊校正-后内插”的 Keystone 变换实现方法仍然具有“半盲速点”效应, 此时“模糊倍数突变区间”的表达式为

$$\frac{0.5f_r c}{2(f_c + B/2)} < v - F \cdot v_{\text{amb}} < \frac{0.5f_r c}{2(f_c - B/2)} \quad (17)$$

故式(17)所对应的“模糊倍数突变区间”长度恒为 $\bar{L}(0)$, 而与多普勒模糊倍数 F 无关。比较 $\bar{L}(0)$ 和 $\bar{L}(F)$ 可知, 当 F 取值较大时, “先模糊校正-后内插”的 Keystone 变换实现方法与“先内插-后模糊校正”的 Keystone 变换实现方法相比, 其“模糊倍数突变区间”长度大大缩短, 显著抑制了“半盲速点”效应。

4.2 “半盲速点”效应消除新方法

为了消除“半盲速点”效应并降低运算量, 本文从缩短“半盲速区间”长度, 避免脉间调制和减少 sinc 内插次数入手, 提出了一种新的“半盲速点”效应消除方法, 其推导过程如下。

假设点目标的速度位于“半盲速区间”内, 则

第 i 个点目标的速度可表示为 $v_i = v_{\text{idu}} + (F + 0.5)v_{\text{amb}}$, 其中 $v_{\text{idu}} \approx 0$ 。将 v_i 代入式(4)得到

$$S(f, m) = \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp \left[j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) v_{\text{idu}} t_m \right] \cdot \exp \left[j 2\pi \frac{f_c + f}{f_c} (F + 0.5) m \right] \quad (18)$$

对式(18)进行模糊校正, 即

$$\hat{S}_{\text{comp}}(f, m) = S(f, m) \exp \left[-j 2\pi \frac{f_c + f}{f_c} (F + 0.5) m \right] = \sum_{i=1}^K G_i(f) \exp \left[j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) v_{\text{idu}} t_m \right] \quad (19)$$

式(19)中 f 与 v_{idu} 的耦合项表示模糊校正后第 i 个点目标的速度残差 v_{idu} 造成的线性距离走动。因为 $v_{\text{idu}} \approx 0$, 因而通常情况下 v_{idu} 在相参积累时间内造成的线性距离走动 ΔR_u 小于线性调频 PD 雷达距离分辨率 ΔR 的一半(例如当 $v_{\text{idu}} = 3 \text{ m/s}$, $N = 256$, $T_r = 400 \mu\text{s}$, $B = 10 \text{ MHz}$ 时, $\Delta R_u = 0.3072 \text{ m}$, $\Delta R = 15 \text{ m}$), 可以认为式(19)近似补偿了目标的线性距离走动, 从而可以省去脉间调制和 Keystone 变换所需要的 sinc 内插操作。需要注意的是, 式(19)会造成相参积累后目标的视在多普勒位置相对真实值偏移 $f_r/2$ 。此外, “半盲速区间”越窄, v_{idu} 和 ΔR_u 可能的最大取值就越接近 0, 补偿效果越好。因此, 当 N 取值较大时, 可以将“半盲速区间”设得小一点, 以保证式(19)的补偿性能。

新的“半盲速点”效应消除方法利用式(15)和式(16)补偿速度位于“半盲速区间”外的目标, 利用式(19)补偿速度位于“半盲速区间”内的目标。假设多普勒模糊倍数 F 可以提前获知, 则新的“半盲速点”效应消除方法的信号处理过程可描述如下:

(1) 根据式(15)和式(16)对 $S(f, m)$ 进行 Keystone 变换, 再进行相参积累, 得到目标回波的 RFD 平面, 保留“半盲速区间”对应的多普勒单元之外的数据。

(2) 根据式(19)对 $S(f, m)$ 进行模糊校正, 再进行相参积累, 得到目标回波的 RFD 平面, 保留“半盲速区间”对应的多普勒单元中的数据。

(3) 将步骤(1)和步骤(2)中保留的数据按照图 1 所示方法重组为一个完整的 RFD 平面, 对该平面进行脉冲压缩和 CFAR 检测等后续处理。

实际应用中, 有可能出现点目标速度差别较大的情况, 此时点目标速度会跨越一个以上的多普勒模糊区间。对于多普勒模糊倍数为 F' ($F' \neq F$) 的点目标, Keystone 变换后其第 n 个脉冲相对于第 0 个脉冲的线性距离走动为 $(F' - F)v_{\text{amb}} n T_r$ 。为了解决该问题, 可以借鉴文献[4]和文献[13]中的方法, 即先

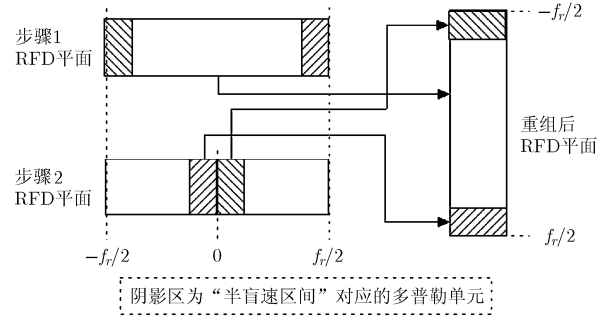


图1 RFD 平面重组示意图

对感兴趣目标的多普勒模糊倍数(设共有 K 个可能的取值)进行遍历处理, 得到 K 个 RD 平面(距离-多普勒 2 维平面), 再根据单元选大准则将 K 个 RD 平面融合为一个平面。不过这种方法会使噪声和杂波抬高, 同时对信号处理能力的要求也大大提高。

4.3 算法运算量分析

本文用复数乘法次数表征运算量, 并将 1 个复数与 1 个实数相乘的运算计为半次复数乘法。设距离维频率 f 的采样点数为 M , 相参积累时间内的脉冲个数为 N , 则 1 次模糊校正所需复数乘法次数为 MN , 1 次 sinc 内插所需复数乘法次数为 $MN^2/2$, 1 次相参积累所需复数乘法次数为 $(MN \log_2 N)/2$, 1 次脉间调制所需复数乘法次数为 MN 。由于不同补偿方法需要的相参积累次数不同, 因此在分析运算量时需要考虑相参积累的影响。为便于描述, 将基于式(7)的 Keystone 变换补偿方法记为方法 1, 将基于多普勒搬移的“半盲速点”效应消除方法记为方法 2, 将本文提出的“半盲速点”效应抑制方法记为方法 3, 将本文提出的“半盲速点”效应消除方法记为方法 4。表 1 对 4 种补偿方法的运算量进行了比较。

由表 1 可以得出以下结论: (1) 方法 3 与方法 1 运算量相同; 方法 4 相对于方法 1 增加了 1 次模糊校正和 1 次相参积累运算, 这是消除“半盲速点”效应的开销, 而增加的运算量与原运算量相比几乎可忽略不计。(2) 与方法 2 相比, 方法 3 使运算量降低 50%以上; 方法 4 相对于方法 2 省去了脉间调制操作, 并节省了 1 次 sinc 内插运算, 使运算量降低了近 50%, 便于工程应用。

5 仿真分析

仿真所采用的雷达系统参数见表 2, 其中 f_s 表示雷达基带复采样频率, t_p 表示脉冲宽度。在此雷达系统参数下, 最大不模糊速度为 $v_{\text{amb}} = 288.46 \text{ m/s}$ 。设目标初始距离均为 35 km , 且匀速运动。

表1 4 种补偿方法的运算量比较

方法名称	sinc 内插次数	模糊校正次数	相参积累次数	脉间调制次数	复数乘法次数
方法 1	1	1	1	-	$MN(1 + N/2 + \log_2 N/2)$
方法 2	2	2	2	1	$MN(3 + N + \log_2 N)$
方法 3	1	1	1	-	$MN(1 + N/2 + \log_2 N/2)$
方法 4	1	2	2	-	$MN(2 + N/2 + \log_2 N)$

表2 线性调频PD雷达系统参数

f_c (GHz)	B (MHz)	f_s (MHz)	t_p (μ s)	T_r (μ s)	N
1.3	10	12.5	60	400	256

利用方法 1 对不同速度目标的距离走动进行补偿, 相参积累(为了减小“栅栏”效应, FFT 前在数据末尾补零, 补零后数据长度为 $8N$)和匹配滤波, 得到的目标幅度相对于理想处理情况下的目标幅度损失如图 2 所示。从图 2 可以看出, 对于速度远离“半盲速点”的目标, 幅度损失在 0.02 dB 以内; 而对于速度位于“半盲速点”附近的目标, 最大幅度损失接近 4 dB, 出现了明显的“半盲速点”效应。

图 3 比较了“先内插-后模糊校正”与“先模糊校正-后内插”两种 Keystone 变换实现方法的“半盲速点”效应。从图 3 可以看出, 当 $F = 0$ 时, 两种方法在“半盲速点”附近的补偿损失几乎完全相同; 而当 $F = 3$ 时, 后者的“半盲速点”效应相对前者得到显著抑制。这是因为前者的“模糊倍数突变区间”长度随 F 线性增长, 而后者的“模糊倍数突变区间”长度恒为 $\bar{L}(0)$, 与前文的分析相吻合。

将方法 2 和方法 4 的“半盲速区间”补偿损失门限分别设为 0.01 dB 和 0.03 dB, 此时两种方法的“半盲速区间”跨越的多普勒单元数分别为 33 和 19(该参数会影响 RFD 平面重组), 分别利用这两种

方法对不同速度目标的距离走动进行补偿, 补偿损失如图 4 所示。从图 4 可以看出, 两种方法均消除了“半盲速点”效应, 能够对感兴趣的多普勒模糊区间内的所有速度目标的距离走动较好地补偿, 其中方法 2 的最大补偿损失约为 0.02 dB, 方法 4 的最大补偿损失约为 0.03 dB。

6 结论

多普勒模糊存在时, 常规 Keystone 变换实现方法会出现“半盲速点”效应。针对该问题, 在多普勒模糊倍数可以获知的情况下, 本文首先提出一种“先模糊校正-后内插”的 Keystone 变换实现方法抑制“半盲速点”效应, 多普勒模糊越严重, 抑制效果越显著, 其运算量与常规 Keystone 变换相同。在此基础上, 本文提出了一种“半盲速点”效应消除方法, 该方法能够对感兴趣的某个多普勒模糊区间内的所有速度目标的线性距离走动较好地补偿, 其约束条件为“半盲速区间”内的目标模糊校正后的速度残差在相参积累时间内造成的线性距离走动小于雷达距离分辨率的一半, 该条件通常可以满足。与已有的基于多普勒搬移的“半盲速点”效应消除方法相比, 本文方法的运算量降低了近 50%。理论分析和仿真结果表明本文方法运算量小, 有效可行。

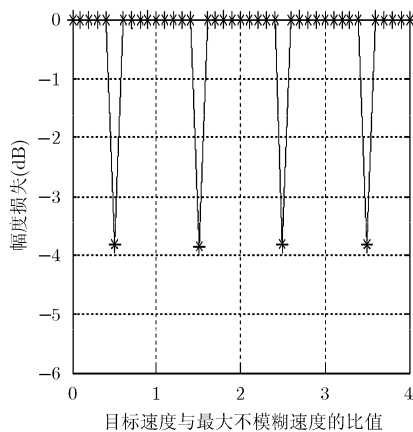


图2 方法1对不同速度目标的补偿损失

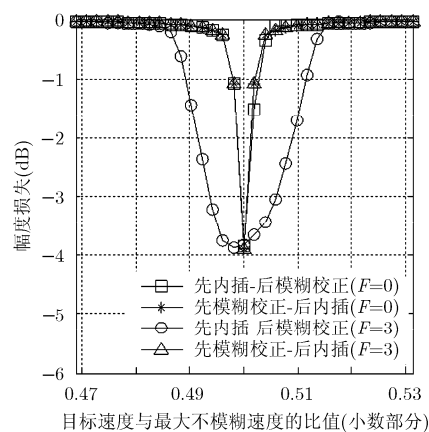


图3 两种Keystone变换实现方法的“半盲速点”效应比较

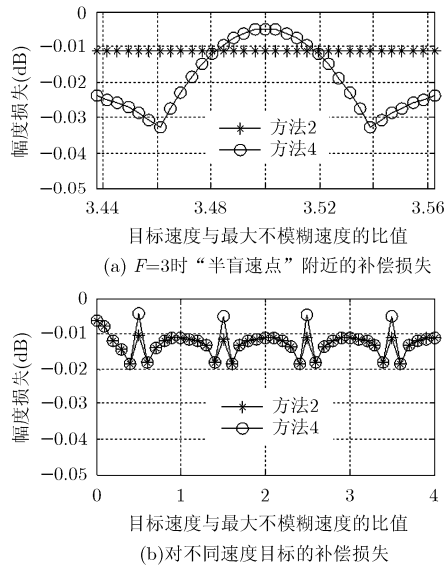


图4 方法2和方法4对不同速度目标的补偿损失

参考文献

- [1] 余吉, 许稼, 汤俊, 等. 基于Keystone变换的改进雷达目标长时间积累[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(6): 454-458.
Yu Ji, Xu Jia, Tang Jun, et al. An improved Keystone-transform based method for long-time coherent integration of radar target[J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(6): 454-458.
- [2] 张顺生, 曾涛. 基于Keystone变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1675-1678.
Zhang Shun-sheng and Zeng Tao. Weak target detection based on keystone transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1675-1678.
- [3] 站立晓, 汤子跃, 朱振波. 基于Keystone变换和MDCFT的高机动弱目标检测与参数估计[J]. 航空学报, 2013, 34(4): 855-863.
Zhan Li-xiao, Tang Zi-yue, and Zhu Zhen-bo. Keystone transform and MDCFT based detection and parameter estimation for maneuvering weak targets[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(4): 855-863.
- [4] 张卫杰, 高昭昭, 许博, 等. 基于Keystone变换的警戒雷达信号处理[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2007-2011.
Zhang Wei-jie, Gao Zhao-zhao, Xu Bo, et al. Novel signal processing method for surveillance radar based on Keystone transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 2007-2011.
- [5] 吴仁彪, 贾琼琼, 李海. 机载雷达高速空中微弱动目标检测新方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1459-1464.
Wu Ren-biao, Jia Qiong-qiong, and Li Hai. Detection of fast moving dim targets on airborne radar via STAP[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1459-1464.
- [6] Zhang Shun-sheng, Zhang Wei, and Wang Yang. Multiple targets' detection in terms of Keystone transform at the low SNR level[C]. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, Zhangjiajie, 2008: 1-4.
- [7] Perry R P, Dipietro R C, and Fante R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188-200.
- [8] Yang Jun-gang, Huang Xiao-tao, Jin Tian, et al. New approach for SAR imaging of ground moving targets based on a keystone transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 829-833.
- [9] 尹建凤, 李道京, 吴一戎. 顺轨三频三孔径星载 SAR 的运动目标检测及定位方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 902-907.
Yin Jian-feng, Li Dao-jing, and Wu Yi-rong. Research on the method of moving target detection and location with three-frequency three-aperture along-track spaceborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 902-907.
- [10] Xing Meng-dao, Wu Ren-biao, Lan Jin-qiao, et al. Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(2): 141-144.
- [11] 张焕颖, 张守宏, 李强. 高速运动目标的 ISAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1789-1793.
Zhang Huan-ying, Zhang Shou-hong, and Li Qiang. ISAR imaging of high speed moving targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(8): 1789-1793.
- [12] 原浩娟, 高梅国. 基于Keystone变换的多帧步进频信号处理[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(11): 1023-1026.
Yuan Hao-juan and Gao Mei-guo. Signal processing of multi-frame stepped-frequency radar based on Keystone transform[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(11): 1023-1026.
- [13] 刘海波, 卢俊道. 基于Keystone变换的宽带脉冲多普勒雷达目标运动补偿算法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(6): 625-630.
Liu Hai-bo and Lu Jun-dao. Target motion compensation algorithm based on Keystone transform for wideband pulse Doppler radar[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(6): 625-630.
- [14] 余吉, 许稼, 彭应宁. 基于Keystone变换长时间相参积累的多普勒模糊问题研究[C]. 第十届全国雷达学术年会, 北京, 2008: 512-516.
Yu Ji, Xu Jia, and Peng Ying-ning. Study of Doppler ambiguity of long-term coherent integration with Keystone transform[C]. Proceedings of 10th China Academic Annual Conference on Radar, Beijing, 2008: 512-516.
- [15] Cao Yu-fei, Qu Xiao-guang, and Huang Pei-kang. Research on Keystone formatting based on non-baseband interpolation [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 21(4): 562-565.

洪永彬: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。

高梅国: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号与图像处理、信息安全与对抗技术、目标探测与识别理论与技术。

王俊岭: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为空间目标探测技术、雷达信号处理。