

基于 chirp-z 变换的斜视 FMCW-SAR 非线性尺度变换算法

于彬彬^{*①②} 刘畅^① 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文针对调频连续波合成孔径雷达(Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar, FMCW-SAR)在斜视模式下聚焦精度降低的问题,提出一种非线性尺度变换 chirp-z 成像算法。该算法利用回波信号在多普勒域中距离向的非线性特性,通过引入一个非线性调频信号对回波信号进行基于 chirp-z 的非线性尺度变换,降低距离压缩和距离徙动校正的误差,提高雷达图像分辨率。采用该成像算法对点目标模拟回波的成像结果与原始 chirp-z 算法相比,距离向分辨率和图像对比度得到提高,方位向分辨率保持不变。

关键词: 调频连续波合成孔径雷达(Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar, FMCW-SAR); 斜视; 非线性尺度变换; chirp-z 变换

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)01-0069-07

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20005

A Non-linear Scaling Algorithm Based on chirp-z Transform for Squint Mode FMCW-SAR

Yu Bin-bin^{①②} Liu Chang^① Wang Yan-fei^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: A non-linear scaling chirp-z imaging algorithm for squint mode Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar (FMCW-SAR) is presented to solve the problem of the focus accuracy decline. Based on the non-linear characteristics in range direction for the echo signal in Doppler domain, a non-linear modulated signal is introduced to perform a non-linear scaling based on chirp-z transform. Then the error due to range compression and range migration correction can be reduced, therefore the range resolution of radar image is improved. By using the imaging algorithm proposed, the imaging performances for point targets, compared with that from the original chirp-z algorithm, are demonstrated to be improved in range resolution and image contrast, and to be maintained the same in azimuth resolution.

Key words: Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar (FMCW-SAR); Squint; Non-linear scaling; chirp-z transform

1 引言

随着 SAR 技术的高速发展, SAR 小型化的需求越来越迫切。小型 SAR 技术的难点在于载荷体积和重量的控制。对于传统脉冲体制的 SAR 系统,发射机的瞬时功率较高,相应的硬件的体积和重量较大,很难小型化。调频连续波合成孔径雷达(Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar, FMCW-SAR)的开发与应用解决了上述问题^[1-3], FMCW-SAR 的发射信号为连续波信号,因此和传统脉冲体制的 SAR 系统相比,发射机的瞬时功率较小,发射机的体积与重量也相应降低。

FMCW-SAR 与传统脉冲 SAR 回波信号在距离向略有不同,但成像算法类似。FMCW-SAR 的成像算法包括距离多普勒算法(Range-Doppler Algorithm, RDA)^[4]、频率尺度变换算法(Frequency Scaling Algorithm, FSA)^[5]、距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)^[6]等。RDA 是基本成像算法,运算量小但成像精度低;RMA 是精确成像算法,但其实际成像精度取决于插值运算的精度,成像精度越高,则运算量越大。相比而言, FSA 的特点介于两者之间,其核心思路是在多普勒域进行线性频率尺度变换,较为精确地校正距离徙动^[7]。与 FSA 原理类似, chirp-z 变换方法也是一种通过引入线性调频信号进行线性尺度变换的算法,其原理稍有不同,但处理信号的结果是一致的^[8]。

2012-01-16 收到, 2012-04-09 改回; 2012-04-16 网络优先出版

*通信作者: 于彬彬 yubinbin05@mails.gucas.ac.cn

当 FMCW-SAR 工作在斜视模式时, 回波信号在多普勒域形成的距离徙动项具有非线性的形式。原始的 FSA 和 chirp-z 算法只能对该距离徙动项进行线性校正, 该校正仅对场景中心处的点目标是精确的, 距场景中心线越远, 其校正误差越大, 最终的聚焦效果也越差。

文献[9]提出了一种斜视 SAR 改进 FS 算法, 该算法对去斜率接收的回波信号进行处理, 可以直接应用于 FMCW-SAR。由于该算法基于 FS 算法, 在计算过程中需要进行 5 次距离向 FFT 或 IFFT, 运算量较大, 而采用 chirp-z 变换则只需要 4 次; 同时, 频率尺度变换操作会造成距离向频谱混叠, 需要进行升采样操作, 该算法中斜视角越大其升采样率越大, 运算量也越大, 而采用 chirp-z 变换只需升一倍采样, 更适合大斜视角成像。

针对以上问题, 本文提出一种斜视 FMCW-SAR 的非线性尺度变换 chirp-z 算法, 该算法可以对多普勒域回波信号的距离徙动项进行非线性校正, 从而得到更好的成像效果。本文首先建立斜视 FMCW-SAR 信号模型, 分析该模式下 FMCW-SAR 回波信号特点, 在原始 chirp-z 算法的基础上提出本文算法, 该算法在 chirp-z 变换中引入三次相位, 对回波信号进行非线性尺度变换, 更精确地进行二次距离压缩和校正信号的距离徙动项, 相比原始 chirp-z 算法得到更高的成像精度。最后, 通过点目标仿真对本文提出算法的有效性进行了验证。

2 回波信号模型

图 1 为 FMCW-SAR 斜视模式下的几何关系图, 阴影区域表示了地面上测绘带的范围, O 为慢时间 t_m 的零时刻载机位置, R_C 为场景中心到载机航线的垂直距离, v 为载机速度。

若点目标沿方位向位于 x 处, 到雷达载机航线的垂直距离为 R_B , 则其去调频接收回波信号为^[10]

$$s_0(t, t_m) = \text{rect} \left[\frac{t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}}{T_r} \right] \cdot \exp \left\{ -j2\pi K_r \left(t - \frac{2R_t}{c} \right) \left(\frac{2R_t}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left(\frac{2R_t}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)^2 \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_t \right\} \quad (1)$$

其中

$$R_t = R_t(t, t_m; R_B, x) = \sqrt{R_B^2 + (vt_m - x + vt)^2} \quad (2)$$

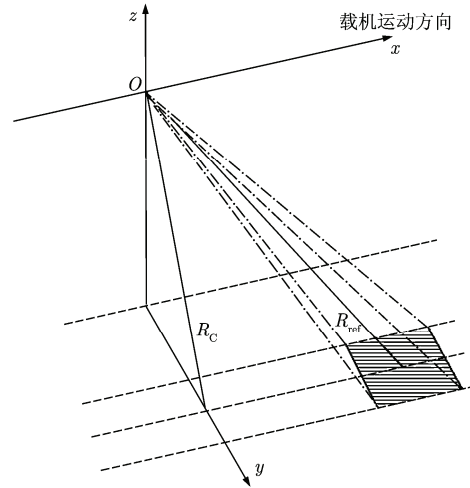


图 1 斜视 FMCW-SAR 几何关系图

式(1)中 T_r 为接收回波总持续时间, K_r 为发射线性调频信号的调频斜率, R_{ref} 为去线性调频的参考距离, 并假设它对应的延迟时间与接收回波的中心采样时间相同。式(1)中的第 2 个相位项是去斜率接收方式中独有的残留视频相位 (Residual Video Phase, RVP) 项^[11]。

式(2)中 R_t 随快时间 t 变化, 产生快时间走动项。FMCW-SAR 与传统脉冲体制 SAR 相比, 拥有大的脉冲持续时间, 则 $R_t \approx R = R(t_m; R_B, x) = \sqrt{R_B^2 + (vt_m - x)^2}$ 并不成立, 也即“走-停”假设失效, 需要额外的步骤校正该快时间走动项^[12]。下式为快时间走动项的校正式:

$$s_1(t, t_m) = \text{IFFT}_a \left\{ \text{FFT}_a \left\{ s(t, t_m) \right\} \exp \left\{ -j2\pi f_a t \right\} \right\} = \text{rect} \left[\frac{t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}}{T_r} \right] \cdot \exp \left\{ -j2\pi K_r \left(t - \frac{2R}{c} \right) \left(\frac{2R}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left(\frac{2R}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)^2 \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R \right\} \quad (3)$$

其中 f_a 是多普勒频率变量, 上式中 FFT 及 IFFT 均为 1 维方位向操作。

由驻相点法可以得到上式的另一种表示方法:

$$s_2(t, t_m) = \left[\exp \left\{ -j2\pi K_r \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \left(\frac{2R}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R \right\} \right] \otimes \exp \left\{ -j\pi K_r t^2 \right\} \quad (4)$$

使用驻相点法, 对上式作方位向 FFT, 可得多

普勒域信号：

$$s_3(t, f_a; R_B, x) = \left[\exp \left\{ -j \frac{4\pi R_B}{c} \right. \right. \\ \cdot \left. \sqrt{\left(K_r \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) + f_c \right)^2 - \left(\frac{cf_a}{2v} \right)^2} \right\} \\ \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} K_r \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \\ \cdot \exp \left\{ -j 2\pi \frac{x}{v} f_a \right\} \right] \otimes \exp \left\{ -j \pi K_r t^2 \right\} \quad (5)$$

3 非线性 chirp-z 变换算法

在介绍本文非线性 chirp-z 变换之前，首先需要 对式(5)进行处理。去除其中的卷积项，并与参考距 离上点目标的匹配函数相乘，得到

$$s_4(t, f_a; R_B, x) \\ = \text{IFFT}_r \left\{ \text{FFT}_r \left\{ s_3(t, f_a; R_B, x) \right\} \exp \left\{ -j \pi \frac{f_a^2}{K_r} \right\} \right\} \\ \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi R_C}{c} \sqrt{\left(K_r \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) + f_c \right)^2 - \left(\frac{cf_a}{2v} \right)^2} \right\} \\ \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} K_r \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \\ = \exp \left\{ -j \frac{4\pi (R_B - R_C)}{c} \right. \\ \cdot \left. \sqrt{\left(K_r \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) + f_c \right)^2 - \left(\frac{cf_a}{2v} \right)^2} \right\} \exp \left\{ -j 2\pi \frac{x}{v} f_a \right\} \quad (6)$$

上式中 FFT 与 IFFT 均为距离向的操作。将式(6) 的第 1 个相位项写成如下形式：

$$s_5(t, f_a; R_B, x) = \exp \left\{ j 2\pi f_p g \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \quad (7)$$

其中

$$f_p = -\frac{2K_r (R_B - R_{\text{ref}})}{c} \\ g(t) = \frac{1}{K_r} \sqrt{\left(K_r t + f_c \right)^2 - \left(\frac{cf_a}{2v} \right)^2}$$

原始的 chirp-z 线性尺度变换式为^[13]

$$S(K_1 t) = \left[\left[s(\beta t) \exp \left\{ -j \pi \frac{K_1}{\beta} t^2 \right\} \right] \otimes \exp \left\{ j \pi \frac{K_1}{\beta} t^2 \right\} \right] \\ \cdot \exp \left\{ -j \pi \frac{K_1}{\beta} t^2 \right\} \quad (8)$$

其中 $S(f_r)$ 为 $s(t)$ 的频域形式， $\beta = \sqrt{f_c^2 - \left(\frac{cf_a}{2v} \right)^2} / f_c$ 为尺度变换的比例因子。当距离向采样率为 f_s ，采

样点数为 N_r 时，取 $K_1 = f_s^2 / N_r$ 可以满足 $S(K_1 t)$ 和 $S(f_r)$ 具有相同数字信号的条件。

基于上述原始 chirp-z 变换式，通过引入非线性 调频信号 $\exp \{-j 2\pi h(t)\}$ 可以对式(7)实现非线性尺 度变换：

$$S(K_1 t) = \left[\exp \left\{ j 2\pi f_p g(t) \right\} \exp \left\{ -j 2\pi h(t) \right\} \right] \\ \otimes \exp \left\{ j 2\pi h(-t) \right\} \exp \left\{ j 2\pi h_0(t) \right\} \quad (9)$$

其中 $h_0(t)$ 是和 $h(t)$ 相关的相位函数。 $S(f_r)$ 为所需 信号 $s(t) = \exp \{j 2\pi f_p t\}$ 的频域形式，则有 $S(K_1 t) = \delta(f_p / K_1)$ 。对于 $g(t)$ ，假设存在一个 $h(t)$ 使得上式 成立，下面求解 $h(t)$ ：

$$f_p g(t) - h(t) + h_0 \left(\frac{f_p}{K_1} \right) = -h \left(t - \frac{f_p}{K_1} \right) \quad (10)$$

对 t 求导得：

$$f_p g'(t) - h'(t) = -h' \left(t - \frac{f_p}{K_1} \right) \quad (11)$$

即

$$K_1 g'(t) = \frac{h' \left(t - \frac{f_p}{K_1} \right) - h'(t)}{-\frac{f_p}{K_1}} \quad (12)$$

当 f_p 较小时，上式变为

$$K_1 g'(t) = h^{(2)}(t) \quad (13)$$

为使式(9)右边第一步乘法不产生频移，应有 $h'(0) = 0$ ，则应使 $h'(t) = K_1 (g(t) - g(0))$ ，令 $h(0) = 0$ ，可以通过积分解出：

$$h(t) = \int_0^t K_1 g(t) dt \quad (14)$$

再令 $t = 0$ ，解出：

$$h_0 \left(\frac{f_p}{K_1} \right) = -h \left(-\frac{f_p}{K_1} \right) - f_p g(0) \quad (15)$$

可以看出，对于给定的函数 $g(t)$ ，可以解出式 (9)中所需函数 $h(t)$ 和 $h_0(t)$ 。然而，对于 $g(t) = (1/K_r) \cdot \sqrt{\left(K_r t + f_c \right)^2 - \left(\frac{cf_a}{2v} \right)^2}$ ， $h(t)$ 不存在解析式， 只能将 $g(t)$ 泰勒展开，截取若干项对 $h(t)$ 进行近似 求解。特殊地，当仅取常数项和一次项时，求出 $h(t) = K_1 / (2\beta) t^2$ ，这就是原始的 chirp-z 算法。但 当雷达波束斜视角较大时， $g(t)$ 泰勒展开式的二次 及以上项不能忽略，此时采用原始 chirp-z 算法将引 入较大相位误差，造成成像精度降低。

经过分析，斜视角较大时，取 $g(t)$ 泰勒展开式 二次及以下项可以满足要求，如下式：

$$g(t) = \frac{f_c \beta}{K_r} + \frac{1}{\beta} t - \frac{K_r (1 - \beta^2)}{2 f_c \beta^3} t^2 \quad (16)$$

积分求出 $h(t)$:

$$h(t) = \frac{K_1}{2\beta} t^2 - \frac{K_1 K_r (1 - \beta^2)}{6 f_c \beta^3} t^3 \quad (17)$$

将式(16), 式(17)代入式(15), 得到

$$h_0(t) = -\frac{K_1 f_c \beta}{K_r} t - \frac{K_1}{2\beta} t^2 - \frac{K_1 K_r (1 - \beta^2)}{6 f_c \beta^3} t^3 \quad (18)$$

将式(16)~式(18)代入式(9)验证, 前后卷积项之间的相位误差为

$$\exp \left\{ j2\pi \left[-\frac{K_1 K_r t (1 - \beta^2)}{2 f_c \beta^3} \left(\frac{f_p}{K_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (19)$$

上式相位越小, 卷积操作匹配的效果就越好。

上式中最大误差相位为

$$\varphi_{NCZ} = \pi \frac{K_1 K_r t_{\max} (1 - \beta^2)}{f_c \beta^3} \left(\frac{f_{p \max}}{K_1} \right)^2 \quad (20)$$

其中 $t_{\max} = N_r / (2f_s)$, $f_{p \max} = B_c / 2$, B_c 为接收回波有效带宽, 且满足 $B_c < F_s$ 。

在一定斜视角下, 如果使用原始的 chirp-z 算法成像, 将得到如下的聚焦误差:

$$\exp \left\{ j2\pi \left[-\frac{K_1 K_r t^2 (1 - \beta^2)}{2 f_c \beta^3} \left(\frac{f_p}{K_1} \right) \right] \right\} \quad (21)$$

其最大误差相位为

$$\varphi_{CZ} = \pi \frac{K_1 K_r t_{\max}^2 (1 - \beta^2)}{f_c \beta^3} \left(\frac{f_{p \max}}{K_1} \right) \quad (22)$$

比较式(20)与式(22), 二者比值为

$$\frac{\varphi_{NCZ}}{\varphi_{CZ}} = \frac{f_{p \max}}{K_1 t_{\max}} = \frac{B_c}{F_s} < 1 \quad (23)$$

由此可见式(20)中最大误差相位比式(22)小。也就是说, 本文提出的非线性 chirp-z 变换相对于原始 chirp-z 变换可以更好地补偿距离徙动校正时的误差相位, 提高算法的成像精度。

对式(6)进行上述非线性 chirp-z 变换处理之后, 再进行方位向 IFFT 即可得到成像结果。

4 仿真结果

本节通过点目标成像验证上述分析。仿真采用表 1 中的参数, 模拟回波包含 5 个点目标。对于同一模拟回波信号, 分别采用原始 chirp-z 算法和本文提出的非线性尺度变换 chirp-z 算法, 得到成像结果。5 个点目标的非线性 chirp-z 算法成像结果见图 2。

表 1 仿真参数

参数	数值
载频	5 GHz
带宽	500 MHz
采样频率	0.5 MHz
接收回波有效带宽	0.4 MHz
斜视角	30°
脉冲重复频率	400 Hz
载机速度	160 m/s
天线长度	1 m
参考距离	4 km
场景中心垂直距离	2 km

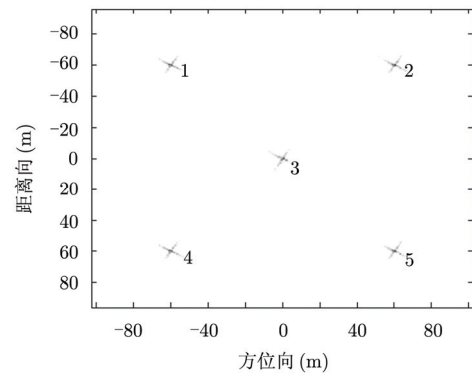
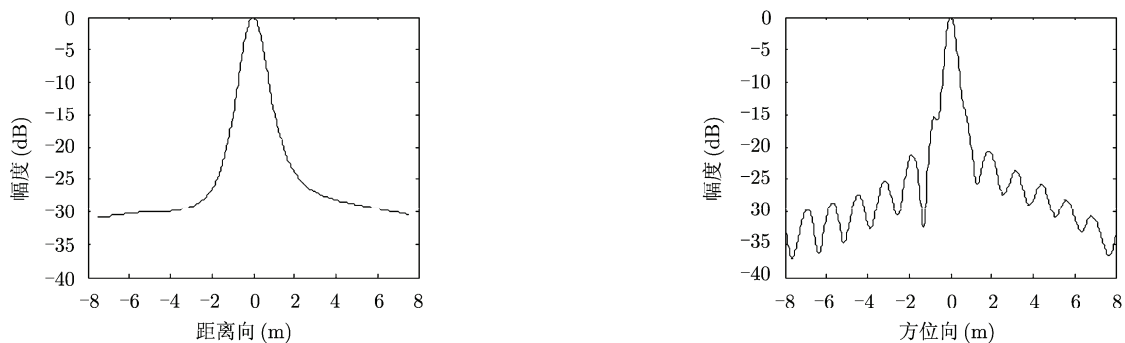


图 2 5 个点目标的成像结果

选取图 2 中的 3 个点目标进行成像精度分析, 图 3, 图 4, 图 5 分别给出了使用原始 chirp-z 算法和非线性 chirp-z 算法成像后的 2 号、3 号、4 号点目标的 2 维分辨率。表 2 为它们的脉冲响应的 3 dB 宽度。可以看出, 对于图 4 中场景中心的点目标, 两种算法的成像结果非常接近, 而在图 3 和图 5 的分图中, 图(c)比图(a)中的分辨率高, 图(b)和图(d)中的分辨率较为接近。同时, 表 2 中的数据也可以说明, 改进后的算法与原始算法相比, 对场景中心线以外点目标的方位向压缩结果较为接近, 而距离向的分辨率能够提高大约 30%。

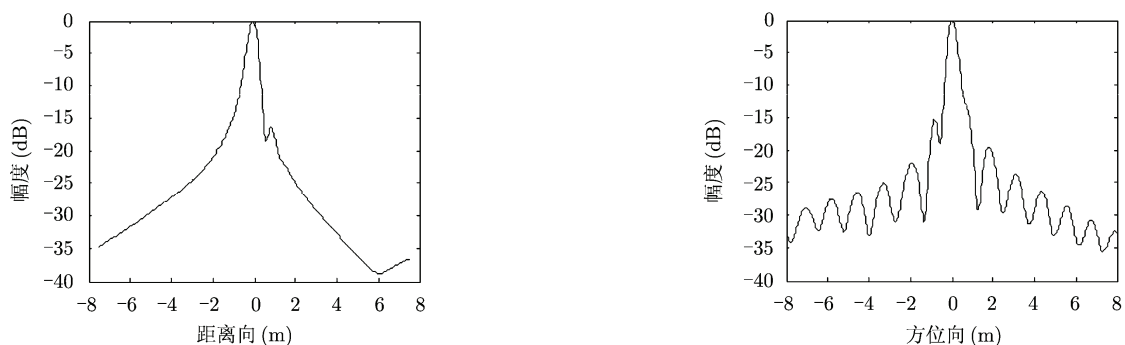
从式(19)和式(21)中可以解释上述仿真结果。式(21)中原始 chirp-z 算法的误差相位是快时间的线性调频信号, 它相当于距离压缩时的不完全匹配, 造成距离向的散焦。式(19)中非线性尺度变换 chirp-z 算法的误差相位是快时间的线性信号, 不影响距离向的聚焦, 该误差的存在使得本文算法未能显著提高方位向分辨率。

使用原始 chirp-z 算法和非线性 chirp-z 算法成像后的图像, 在 2 号、3 号、4 号点目标附近的图像强度对比度如表 3。由表 3 可以看出, 相比原始 chirp-z 算法, 非线性尺度变换 chirp-z 算法可以将场景中心线以外区域成像结果的图像对比度提高大约 50%。



(a) 2号点目标原始chirp-z算法的距离向成像结果

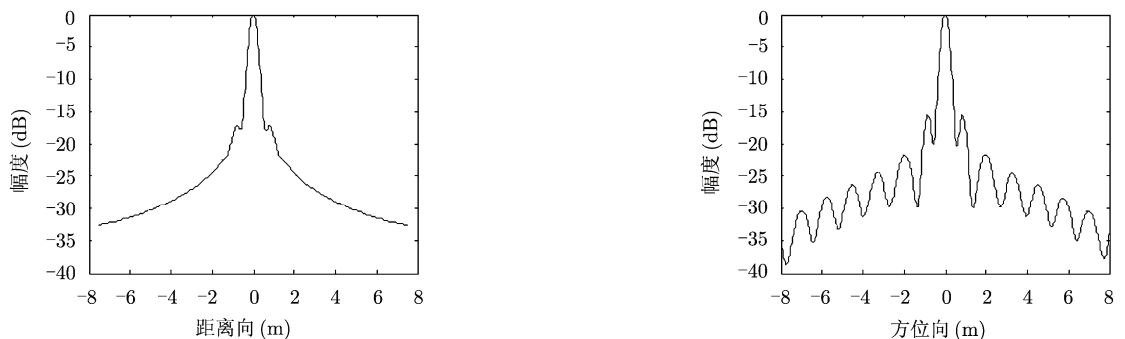
(b) 2号点目标原始chirp-z算法的方位向成像结果



(c) 2号点目标非线性尺度变换算法的距离向成像结果

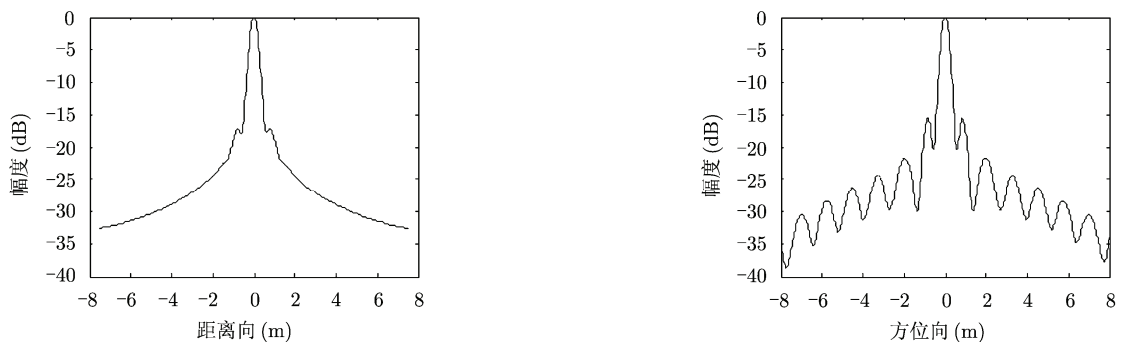
(d) 2号点目标非线性尺度变换算法的方位向成像结果

图3 2号点目标的成像结果



(a) 3号点目标原始chirp-z算法的距离向成像结果

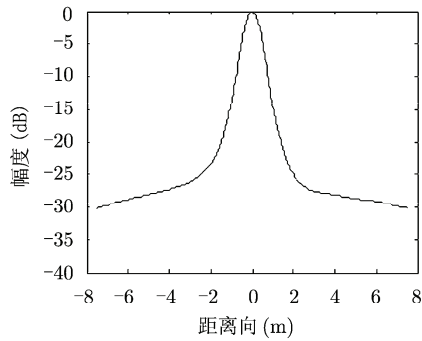
(b) 3号点目标原始chirp-z算法的方位向成像结果



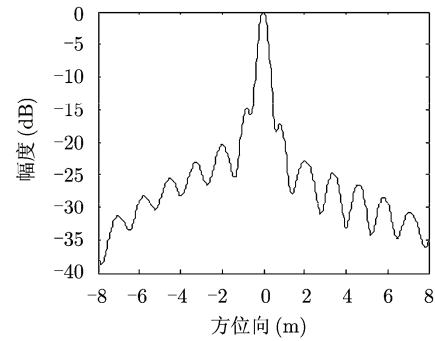
(c) 3号点目标非线性尺度变换算法的距离向成像结果

(d) 3号点目标非线性尺度变换算法的方位向成像结果

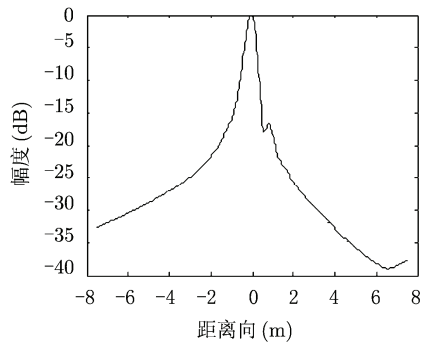
图4 3号点目标的成像结果



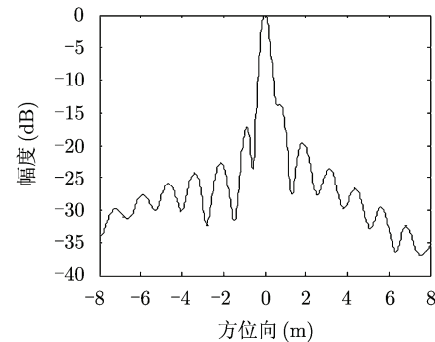
(a) 4号点目标原始chirp-z算法的距离向成像结果



(b) 4号点目标原始chirp-z算法的方位向成像结果



(c) 4号点目标非线性尺度变换算法的距离向成像结果



(d) 4号点目标非线性尺度变换算法的方位向成像结果

图5 4号点目标的成像结果

表2 两种算法点目标冲击响应函数的3 dB宽度比较

点目标	原始 chirp-z 算法的 3 dB 宽度(m)		非线性 chirp-z 算法 的 3 dB 宽度(m)	
	距离向	方位向	距离向	方位向
2号点目标	0.750	0.475	0.500	0.450
3号点目标	0.450	0.400	0.450	0.400
4号点目标	0.825	0.450	0.500	0.450

表3 两种算法成像结果中点目标附近的图像强度对比度

点目标	原始 chirp-z 算法 的对比度	非线性 chirp-z 算法 的对比度
2号点目标	9.73	14.29
3号点目标	16.78	16.77
4号点目标	9.51	14.50

以上仿真结果与理论推导和分析结论一致,验证了本文提出的非线性尺度变换 chirp-z 算法对提高斜视 FMCW-SAR 成像效果的有效性。

5 结论

本文针对 FMCW-SAR 在斜视模式下聚焦精度降低的问题,提出一种非线性尺度变换 chirp-z 算

法。该算法对原始 chirp-z 算法进行改进,通过引入非线性调频信号,对回波信号进行非线性尺度变换,可以降低距离压缩和距离徙动校正的误差,提高雷达成像精度。从仿真结果可以看出,采用本文提出的非线性 chirp-z 算法对点目标模拟回波的成像结果与原始 chirp-z 算法相比,距离向分辨率和图像对比度均得到明显提高,方位向分辨率保持不变。

参考文献

- [1] Meta A, Hoogeboom P, and Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [2] Meta A, Hoogeboom P, and Ligthart L P. Non-linear frequency scaling algorithm for FMCW SAR data[C]. European Radar Conference, Manchester UK, 2006: 9-12.
- [3] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. 调频连续波 SAR 非线性处理方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1034-1039.
Dong Yong-wei, Liang Xing-dong, and Ding Chi-biao. Non-linear signal processing for FMCW SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1034-1039.
- [4] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. 一种调频连续波 SAR 的非线性距离-多普勒算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(7): 1394-1398.
Dong Yong-wei, Liang Xing-dong, and Ding Chi-biao.

- Non-linear range-Doppler algorithm for FMCW SAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(7): 1394-1398.
- [5] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [6] 张玉玲, 金小三, 曲长文. FM-CW SAR 距离徙动算法研究[J]. *雷达科学与技术*, 2009, 7(2): 107-110, 114.
Zhang Yu-ling, Jin Xiao-san, and Qu Chang-wen. Study on an improved RMA for FM-CW SAR[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(2): 107-110, 114.
- [7] 杨嵩, 蔡竟业. 线性调频连续波合成孔径雷达成像算法[J]. *信息与电子工程*, 2008, 6(3): 167-171.
Yang Hao and Cai Jing-ye. Linear frequency modulated continuous wave-synthetic aperture radar imaging algorithm [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2008, 6(3): 167-171.
- [8] Jiang Z H and Huang-Fu K. A chirp transform algorithm for processing squint mode FMCW SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(3): 377-381.
- [9] 黄源宝, 李真芳, 保铮. 大斜视角 SAR 成像的改进频率变标算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(12): 1542-1546.
Huang Yuan-bao, Li Zhen-fang, and Bao Zheng. High squint SAR data processing using a modified frequency scaling algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(12): 1542-1546.
- [10] Jiang Z H and Huang-Fu K. Squint LFM CW SAR data processing using Doppler-centroid-dependent frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3535-3543.
- [11] Wang R, Loffeld O, Nies H, et al.. Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [12] 马兵强, 于彬彬, 刘畅, 等. 滑动聚束 FMCW-SAR 的子孔径成像算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(11): 2278-2283.
Ma Bing-qiang, Yu Bin-bin, Liu Chang, et al.. Subaperture imaging algorithm for sliding spotlight FMCW-SAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(11): 2278-2283.
- [13] Zhu D Y and Zhu Z D. Range resampling in the polar format algorithm for spotlight SAR image formation using the chirp z-transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(3): 1011-1023.

作者简介



于彬彬(1986-), 男, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理与实时成像。籍贯为辽宁省沈阳市。
E-mail: real7c27a@sina.com

刘畅(1978-), 男, 副研究员, 研究方向为 SAR 成像理论与信号处理等。

王岩飞(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。