

基于 FMCW 的大斜视 SAR 成像研究

梁毅 王虹现 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对调频连续波 SAR 与脉冲式 SAR 工作体制的不同, 从而带来不同的回波信号形式, 该文对基于调频连续波的大斜视 SAR 回波信号进行建模, 分析信号的特征, 揭示平台的连续运动在距离向产生一个多普勒频移的特性, 从而导致目标的径向移动。同时, 针对调频连续波 SAR 大斜视 Dechirp 数据, 提出了时域走动校正、频域多普勒频移校正、距离弯曲校正的改进 R-D 算法, 仿真数据处理结果验证了该文分析的正确性和所提算法的有效性。另外, 对于平台连续运动引入的多普勒频移, 该文也分析了其对成像造成的影响。

关键词: 调频连续波; 大斜视 SAR; 改进 R-D 算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0776-05

Imaging Study of High Squint SAR Based on FMCW

Liang Yi Wang Hong-xian Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the differences of work mechanism between Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Synthetic Aperture Radar (SAR) and Pulsed Synthetic Aperture Radar, which leads to different form of received signal, this paper establishes the model of high squint FMCW SAR echo, analyzes its characteristics, and reveals the Doppler frequency shift effect induced by the continuous motion in range direction while radar transmitting and receiving signal. Meanwhile, this paper proposes a modified RD Algorithm (RDA) for high squint FMCW SAR dechirp data, which compensates for range walk in time domain, Doppler frequency shift and range curvature in frequency domain. Point target simulation verifies the analysis and validity of the algorithm. In addition, for the Doppler frequency shift induced by the platform continuous motion, this paper also analyses its effect on imaging.

Key words: FMCW; High squint SAR; Modified R-DA

1 引言

调频连续波(FMCW)技术与合成孔径雷达(SAR)技术的完美结合, 促使了重量轻、成本低、功耗低的高分辨成像雷达的诞生^[1], 使其易于安装在小型无人机上, 甚至于航模飞机。近年来国外已经设计了多款调频连续波 SAR 系统^[2-4], 安装在不同的平台上。由于接收端采用了 Dechirp 接收体制^[5], 回波信号与参考信号进行混频, 产生了较小的差频带宽, 从而降低对视频接收通道、后端 A/D 采集设备和信号处理速度的要求。常规的合成孔径雷达以脉冲方式工作, 在作用距离较远时, 要求发射机峰值功率较高, 从而带来的问题就是整个系统对发射系统、馈线系统要求较高, 系统重量、功耗、成本较高, 对适装平台的要求也较高。调频连续波 SAR 在一个脉冲重复间隔内连续地发射信号, 这样就不需要很高的峰值功率, 用固态放大器就可以满足要求, 较低的发射功率也使其具有隐蔽性好、抗反辐射导弹能力强等特点, 而低成本的特点也决定了其在民用市场具有用武之

地, 总之调频连续波 SAR 有着诸多的优点, 对其研究也将越来越深入和广泛。

与传统的脉冲式 SAR 不同, 调频连续波 SAR 有其特殊性。脉冲式 SAR 基于“一步一停”的工作方式, 这是由于发射信号的脉冲宽度很小, 发射过程中目标与雷达平台的相对距离近似没有发生变化, 而调频连续波 SAR 是雷达一直在发射脉冲, 采用收、发天线分离的体制, 较长的扫频时间决定了在发射信号过程中目标与雷达平台之间的距离是变化的。雷达平台连续运动带来的影响是在距离向产生一个多普勒频移^[6], 这个多普勒频移会导致越距离单元徙动, 影响方位向的能量积累, 应该予以补偿。

大斜视 SAR 具有区外探测能力, 即可以不直接飞越某一地区而能对该区域的地物目标进行观测, 在资源勘探、国境侦察、战场侦察和战场精确打击等应用中发挥着重要的作用, 因此对斜视情况下 SAR 的成像算法研究是很有必要和实际意义的^[7]。

2 调频连续波信号描述

FMCW 信号的频率是时间的函数, 两种广泛应用的调制形式是锯齿波和三角波调制, 本文分析时采用锯齿波调制

2007-11-29 收到, 2008-05-17 改回

国家自然科学基金(60502044)和教育部重点项目(20051009)资助课题

的 FMCW 信号。如图 1 所示, Δf 为扫频带宽, PRI 为扫频周期, 实线为发射信号的瞬时频率, 虚线为接收信号的瞬时频率, 图 1 为两者差频信号瞬时频率, 从图中可知, 发射信号频率随时间按线性锯齿变化, 目标回波为发射波形的复制波, 双程回波延迟 $\tau = 2 \cdot R/c$, 其中 R 为目标距离, c 为光速。在调制周期内, 差拍频率一部分为正, 一部分为负, 而且负差频部分很小, 这是因为回波延迟相对于扫频周期来说很小。

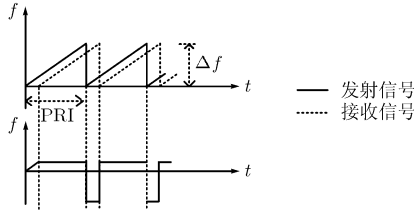


图 1 FMCW 系统中发射/接收信号频率变化图

3 调频连续波 SAR 大斜视成像几何模型

大斜视 FMCW SAR 成像几何关系可参照图 2, 雷达工作在条带模式, 载机飞行高度为 h , 平台运动速度为 v , 天线方位向波束宽度为 β , 波束射线指向的斜视角为 θ_0 , R_0 为波束中心线扫过目标时的斜距。为了分析方便, 将载机与点目标的几何关系画在一个平面中, 如图 3 所示, 点目标 P 离载机飞行航线的最近距离为 R_B , θ' 为目标的瞬时观测角, 设以载机位于 A 点时的时刻为方位慢时间 t_m 的起点, 这时波束射线与通过 P 点而与航线平行的线相交于 B 点, 将 B 点作为该平行线上慢时间的起点。

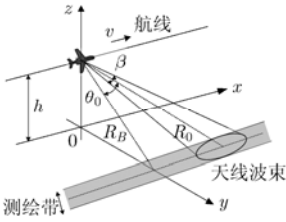


图 2 大斜视 SAR 成像几何模型

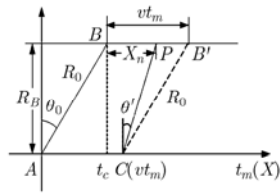


图 3 载机飞行航线与目标构成的斜平面

经过 t_m 后, 载机运动到 C 点, 其横坐标为 vt_m , 设点目标 P 与 B 点之间的距离为 X_n , 则从 $\triangle PCB'$ 中可得瞬时斜距 $R'(\hat{t}, t_m; R_0)$ 为

$$R'(\hat{t}, t_m; R_0) = \sqrt{(vt_m + v\hat{t} - X_n)^2 + R_0^2 - 2R_0(vt_m + v\hat{t} - X_n)\sin\theta_0} \quad (1)$$

在这里, 瞬时斜距是一个与距离快时间 \hat{t} 有关的量^[8]。脉冲式 SAR 中采用“一步一停”假设, 近似认为雷达在发射和接收脉冲的过程中是静止的, 所以其瞬时斜距与距离快时间 \hat{t} 无关, 而调频连续波 SAR 由于在整个脉冲重复周期内发

射信号, 其较长的扫频时间决定了瞬时斜距与距离快时间有关。

4 调频连续波 SAR 大斜视信号模型分析

调频连续波雷达发射信号频率是时间的函数, 其特殊的工作体制决定了在一个扫频周期内连续的发射信号。假设雷达发射线性调频连续波信号, 则对某一点目标, 若瞬时斜距为 $R'(\hat{t}, t_m; R_0)$, 接收端经解线频调处理后的差频输出可以表示为^[9]

$$s(\hat{t}, t_m) = A \text{rect} \left[\frac{\hat{t} - 2R'(\hat{t}, t_m; R_0)/c}{T_p} \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R'(\hat{t}, t_m; R_0) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} \gamma (R'(\hat{t}, t_m; R_0) - R_{\text{ref}}) \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[j \frac{4\pi\gamma}{c^2} (R'(\hat{t}, t_m; R_0) - R_{\text{ref}})^2 \right] \quad (2)$$

其中 A 为复常数, T_p 为脉冲宽度, λ 为载波波长, γ 为距离向调频率, R_{ref} 为参考距离。连续波 SAR 中 T_p 等于脉冲重复间隔 (PRI), 在一个扫频周期内 $\hat{t} \in [-\text{PRI}/2, \text{PRI}/2]$ 。观察式(2), 第 1 个指数项包含方位向的相位历程, 第 2 个指数项为距离向信号, 第 3 个指数项包含 RVP 项(残余视频相位), 在调频连续波 SAR 中, 该项的影响可以忽略^[10]。方位慢时间 t_m 的取值范围为 $-T_a/2 \leq t_m \leq T_a/2$, T_a 为一个合成孔径的时间。由于距离 Dechirp 数据是在频域成像, 以下的分析中我们忽略包络和幅度的影响, 而只考虑相位信息, 瞬时斜距

$$R'(\hat{t}, t_m; R_0) = \sqrt{(vt_m + v\hat{t} - X_n)^2 + R_0^2 - 2R_0(vt_m + v\hat{t} - X_n)\sin\theta_0} \quad (3)$$

θ_0 , R_0 的定义如前所述, 与脉冲式 SAR 不同(瞬时斜距忽略距离快时间的影响), 调频连续波 SAR 瞬时斜距的计算要考虑距离快时间的影响, $R'(\hat{t}, t_m; R_0)$ 在 $\hat{t} = 0$ 处的泰勒展开近似为

$$R'(\hat{t}, t_m; R_0) \approx \sqrt{(vt_m - X_n)^2 + R_0^2 - 2R_0(vt_m - X_n)\sin\theta_0} + \frac{v(vt_m - X_n) - R_0v\sin\theta_0}{\sqrt{(vt_m - X_n)^2 + R_0^2 - 2R_0(vt_m - X_n)\sin\theta_0}} \hat{t} \quad (4)$$

令 $R(t_m; R_0) = \sqrt{(vt_m - X_n)^2 + R_0^2 - 2R_0(vt_m - X_n)\sin\theta_0}$, 则

$$R'(\hat{t}, t_m; R_0) \approx R(t_m; R_0) + \frac{v(vt_m - X_n) - R_0v\sin\theta_0}{R(t_m; R_0)} \hat{t} \quad (5)$$

由雷达平台连续运动引入的多普勒频移(距离向)

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR'(\hat{t}, t_m; R_0)}{d\hat{t}} = -\frac{2}{\lambda} \frac{v(vt_m - X_n) - R_0v\sin\theta_0}{R(t_m; R_0)} \quad (6)$$

观察图 3, 可以发现 $\frac{v(vt_m - X_n) - R_0v\sin\theta_0}{R(t_m; R_0)} = -\sin\theta'$, θ' 为载

机飞行过程中的波束射线与垂直航线方向的夹角(瞬时观测角), 所以

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} v(-\sin\theta') = f_a, \quad \theta_0 - \frac{\beta}{2} \leq \theta' \leq \theta_0 + \frac{\beta}{2} \quad (7)$$

其中 f_a 为方位的多普勒频率, 这是由雷达平台在发射和接收脉冲的过程中存在连续运动引入的。对于脉冲式 SAR, 由于脉冲宽度很小, 采用的是传统的“一步一停”模型近似, 瞬时斜距与距离快时间近似无关, 不会存在这个多普勒频移。

大斜视时, 多普勒频移变化量的存在会造成回波包络的越距离单元徙动, 影响对方位的聚焦; 多普勒频移常数项的存在会使目标距离向的位置发生偏移, 相当于使图像发生了几何形变, 需要进行几何形变的校正, 后面的点目标仿真分析可以明显看出这一点。

将 $R'(\hat{t}, t_m; R_0)$ 的表达式代入式(2), 化简得

$$s(\hat{t}, t_m) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R(t_m; R_0) + \frac{v(vt_m - X_n) - R_0 v \sin \theta_0}{R(t_m; R_0)} \hat{t}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R(t_m; R_0) - R_{\text{ref}})\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \quad (8)$$

其中第 1 个指数项包含由于雷达平台连续运动引入的, 即由速度引入的多普勒频移对应的相位项, 是一个关于距离快时间 \hat{t} 的一次项, 会导致目标回波包络的越距离单元徙动, 第 2 个指数项为距离向信号。

5 调频连续波 SAR 大斜视成像处理

对于距离 $R(t_m; R_0)$, 由于 $|vt_m - X_n| \ll R_0$, 将其在 $t_m = X_n/v$ 处作泰勒级数展开, 并近似到三次项, 得

$$R(t_m; R_0) = \sqrt{R_0^2 + v^2 \cos^2 \theta_0 (t_m - X_n/v)^2} - (t_m - X_n/v)v \sin \theta_0 + \frac{v^3 \sin \theta_0 \cos^2 \theta_0}{2R_0^2} (t_m - X_n/v)^3 \quad (9)$$

$s(\hat{t}, t_m)$ 的后一个指数项中包含线性距离走动分量项, 先将其中的线性走动分量项加以校正, 同时校正掉多普勒中心, 相应的参考函数为

$$H_1(\hat{t}, t_m) = \exp\left[j\frac{4\pi}{c}\gamma\Delta R(t_m)\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) + j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right] \quad (10)$$

式中 $\Delta R(t_m) = -vt_m \sin \theta_0$, 补偿后目标的距离与 t_m 的关系为

$$R_l(t_m; R_0) = R(t_m; R_0) - \Delta R(t_m) = \sqrt{R_0^2 + v^2 \cos^2 \theta_0 (t_m - X_n/v)^2} + X_n \sin \theta_0 + \frac{v^3 \sin \theta_0 \cos^2 \theta_0}{2R_0^2} (t_m - X_n/v)^3 \quad (11)$$

通过上述补偿后, 相当于速度变为 $v \cos \theta_0$, 多普勒中心也从原来的 $f_{ac} = 2v \sin \theta_0 / \lambda$ 补偿为零, 补偿后的基频回波变为

$$s(\hat{t}, t_m) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_l(t_m; R_0)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{v(vt_m - X_n) - R_0 v \sin \theta_0}{R(t_m; R_0)} \hat{t}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\gamma(R_l(t_m; R_0) - R_{\text{ref}})\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \quad (12)$$

忽略 $R_l(t_m; R_0)$ 关于 t_m 的三次项对目标位置的影响, 而考虑

其对方位相位的影响, 将上式变换到方位多普勒域, 即作 $t_m \rightarrow f_a$ 的傅里叶变换, 得

$$s(\hat{t}, f_a) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}X_n \sin \theta_0\right] \exp\left[-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_a \hat{t}\right] \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_0 \beta(f_a)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi\gamma}{c}\left(\frac{R_0}{\beta(f_a)} - R_{\text{ref}} + X_n \sin \theta_0\right)\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi\lambda\gamma^2 R_0}{c^2} \frac{\beta^2(f_a) - 1}{\beta^3(f_a)} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right] \cdot \exp\left[j\frac{2\pi \sin \theta_0 R_0 f_a^3}{\lambda \cos \theta_0 (f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}}\right] \quad (13)$$

需要强调的是, 指数项 $\exp[j2\pi f_a \hat{t}]$ 的多普勒频率 f_a' 的中心不为零, 而为 $2v \sin \theta_0 / \lambda$ 。另外, 上式的变换中忽略了高次相位对驻相点的影响, 由于高次相位总是缓变的, 对驻相点不敏感, 具体操作时高次相位不参加驻相点的计算, 只是将求出的驻相点直接代入高次相位的表达式^[11]。式(13)中

$$\beta(f_a) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_a^2}{4v^2 \cos^2 \theta_0}}, \quad \frac{R_0}{\beta(f_a)} = R_0 / \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_a^2}{4v^2 \cos^2 \theta_0}} \approx R_0 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 f_a^2}{4v^2 \cos^2 \theta_0}\right] \approx R_0 + \frac{1}{2} R_{s0} \frac{\lambda^2 f_a^2}{4v^2 \cos^2 \theta_0} \quad (14)$$

R_{s0} 为场景中心线处的射线斜距, 上式中是将距离徙动项的 R_0 用场景中心线的射线斜距 R_{s0} 代替, 即距离弯曲统一用 $\frac{1}{2} R_{s0} \frac{\lambda^2 f_a^2}{4v^2 \cos^2 \theta_0}$ 表示, 忽略了距离弯曲的空变性。

构造多普勒频移校正、距离徙动校正、二次距离脉压参考函数

$$H_2(\hat{t}, f_a) = \exp\left[-j2\pi f_a \hat{t}\right] \exp\left[j\frac{4\pi\gamma}{c}R_{s0} \frac{\lambda^2 f_a^2}{8v^2 \cos^2 \theta_0} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j\frac{2\pi\lambda\gamma^2 R_{s0}}{c^2} \frac{\beta^2(f_a) - 1}{\beta^3(f_a)} \left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right] \quad (15)$$

将式(13)和式(15)相乘, 并进行距离傅里叶变换, 将信号变换到 $f_r - f_a$ 域, 这样就完成了距离压缩、多普勒频移校正、距离徙动校正。信号在 $f_r - f_a$ 域为

$$s(f_r, f_a) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}X_n \sin \theta_0\right] \exp\left[-j2\pi f_a \frac{X_n}{v}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_0 \beta(f_a)\right] \exp\left[-j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} f_r\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c}(R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin \theta_0)\right)\right] \cdot \exp\left[j\frac{2\pi \sin \theta_0 R_0 f_a^3}{\lambda \cos \theta_0 (f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}}\right] \quad (16)$$

对上式乘以相位保持函数 $H_3(f_r, f_a)$, 补偿参考距离的影响,

$$H_3(f_r, f_a) = \exp\left[j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} f_r\right] \quad (17)$$

对式(16)的第 3 个、最后一个指数项, 即方位调制项, 作方位脉冲压缩处理, 方位频域匹配函数为

$$H_4(f_r, f_a) = \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_a^2}{4v^2 \cos^2 \theta_0}} \right] \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi \sin \theta_0 R_0 f_a^3}{\lambda \cos \theta_0 (f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}} \right] \quad (18)$$

将此函数和距离频域-方位多普勒域信号相乘, 并进行 $f_a \rightarrow t_m$ 的逆傅里叶变换, 将信号变换到 $f_r - t_m$ 域, 这样就完成了方位向的压缩, 压缩后的信号为

$$s(f_r, t_m) = \text{sinc} \left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2\gamma}{c} (R_0 - R_{\text{ref}} + X_n \sin \theta_0) \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} X_n \sin \theta_0 \right] \text{sinc} \left[\Delta f_a \left(t_m - \frac{X_n}{v} \right) \right] \quad (19)$$

其中 Δf_a 为信号的多普勒带宽。

从式(19)可以看出, 所获得的图像具有几何形变, 在距离方向有 $X_n \sin \theta_0$ 的移动, 方位方向有 $(R_0 - R_{s_0}) \sin \theta_0$ 的移动, 需要进行几何形变的校正。其中距离向的几何形变是由于时域校正距离走动所引起的, 方位向的几何形变主要是由于观测模式引起的。

6 仿真数据处理结果与分析

仿真 FMCW SAR 在大斜视工作模式下的单个点目标, 具体仿真参数如下: 信号带宽 500MHz, 载频 35GHz, 扫频周期 1ms, 场景中心斜距 1km, 斜视角 50° , 载机速度 120m/s, 场景斜距宽度 150m, 距离向采样频率 1MHz, 方位向波束宽度 2° 。

假设把场景看成是一个二维平面坐标, 在场景中心线上、慢时间为零的时刻放置一个静止的点目标, 采用本文介绍方法进行成像处理, 其结果如图 4 所示。图 4(a), 图 4(b) 为经过距离脉冲压缩而未作方位脉冲压缩的空间响应曲线, 纵坐标为距离坐标, 横坐标为方位时间坐标, 其中图 4(a) 为多普勒频移未补偿时的情况, 图 4(b) 为多普勒频移补偿时的情况, 两幅图均经过距离徙动校正, 可以发现, 如果不补偿多普勒频移, 将会使目标沿径向向距离近端移动, 从而影响目标的定位, 对于本文仿真参数, 径向移动达到 6m 多, 另外还会造成越距离单元徙动, 影响方位向的聚焦。图 4(c) 为多普勒频移补偿与未补偿时的方位脉压剖面图, 实线为补偿的情况, 虚线为不补偿的情况, 图 4(d) 为其局部放大图, 这里为了使曲线看起来更平滑, 采用了 16 倍插值。可以看出, 如果不补偿多普勒频移, 主瓣展宽, 零点抬高很多, 出现左右非对称, 而且峰值旁瓣比损失达 5dB 左右, 导致成像效果很差, 因此, 在这种情况下, 多普勒频移的补偿就显得尤为重要。图 4(e), 图 4(f) 为多普勒频移补偿与不补偿时的等高线图, 从中也可以明显看出多普勒频移不补偿时带来的影响, 在不补偿时, 主瓣和旁瓣模糊在一起, 并且旁瓣形状不规则, 相比之下, 经过补偿后, 主瓣和旁瓣明显分开, 并且旁瓣更为规则。表 1 给出了成像结果的性能指标, 可以发现

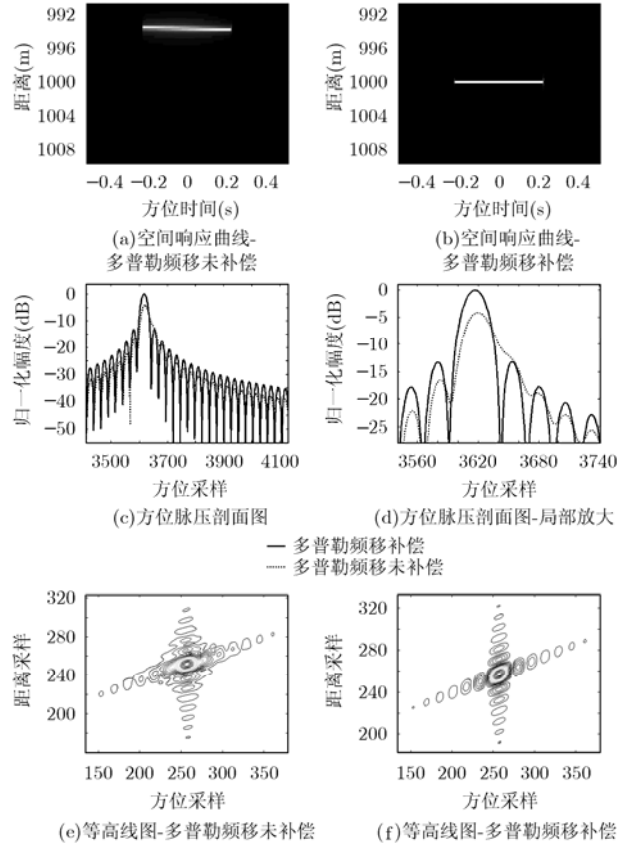


图 4 单个点目标仿真

表 1 性能指标分析

斜视角	PSLR(dB)		ISLR(dB)	
	距离	方位	距离	方位
50°	-13.3768	-13.2621	-9.6932	-9.7218

无论是峰值旁瓣比(PSLR)还是积分旁瓣比(ISLR)均接近理论值, 证明本文方法是行之有效的。

7 结束语

调频连续波技术由于其自身的优越性, 与 SAR 技术结合必将受到越来越多的关注, 该文对基于调频连续波的大斜视 SAR 回波信号进行了建模, 分析了信号的特征, 揭示了平台的连续运动在距离向产生一个多普勒频移的特性, 针对其 Dechirp 接收数据, 提出了时域走动校正、频域多普勒频移校正、距离弯曲校正的改进 R-D 算法。仿真数据处理结果验证了该文分析的正确性和所提算法的有效性。另外对于平台连续运动引入的多普勒频移, 该文也分析了其对成像造成的影响, 包括径向移动和越距离单元徙动。

参考文献

[1] Meta A and Hoogeboom P. Development of signal processing algorithms for high resolution airborne millimeter wave FMCW SAR. Rroc. IEEE Int. Radar Conf. '05, Arlington,

- U.S.A, 2005: 326-331.
- [2] Meta A, de Wit J J M, and Hoogeboom P. Development of high resolution airborne millimeter wave FM-CW SAR. Proc. EuRAD'04, Amsterdam, Netherlands, 2004: 209-212.
- [3] Zaugg E C, Hudson D L, and Long D G. The BYU uSAR: A small, student-built SAR for UAV operation. Proc. IGARSS'06, Denver, CO, USA, 2006: 411-414.
- [4] Edrich M. Ultra-lightweight synthetic aperture radar based on a 35GHz FMCW sensor concept and online raw data transmission. *IEE Proc., Radar Sonar Navig.*, 2006, 153(2): 129-134.
- [5] Stove A G. Linear FMCW radar techniques. *IEE Proc., Radar Sonar Navig.*, 1992, 139(5): 343-350.
- [6] de Wit J J M, Meta A, and Hoogeboom P. Modified range-Doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar. *IEEE Geosci. Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 83-87.
- [7] 张欢. 基于实测数据的斜视SAR成像算法研究. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2006.
- [8] Meta A, Hoogeboom P, and Lightart L. Correction of the effects induced by the continuous motion in airborne FMCW SAR. Proc. IEEE Radar Conf. '06, Verona NY, USA, Apr. 2006: 358-365.
- [9] 保铮, 邢孟道, 王彤编著. 雷达成像技术. 北京:电子工业出版社, 2005: 25.
- [10] Meta A and Hoogeboom P. Signal processing algorithms for FMCW moving target indicator synthetic aperture radar. Proc. IGARSS'05, Seoul, Korea, July 2005: 316-319.
- [11] 黄源宝. 机载合成孔径雷达成像算法及运动补偿的研究, [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2005.
- 梁毅: 男, 1981年生, 博士生, 从事雷达信号处理、SAR实时成像等方面的研究工作.
- 王虹现: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为雷达成像及其实时处理.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为雷达成像和目标检测.
- 保铮: 男, 1927年生, 博士生导师, 教授, 中国科学院院士, 主要研究领域为雷达信号处理.