

改进的双曲等效法用于双站合成孔径 雷达前视成像*

马超 顾红† 苏卫民 李传中

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2013年9月16日收到; 2013年10月10日收到修改稿)

双站合成孔径雷达 (SAR) 前视成像有着很多的潜在应用, 比如在能见度很低的天气实现飞机的导航和盲降, 提高飞机飞行的安全度等. 然而实现双站 SAR 前视成像的难点在于其距离历程的双根式性, 直接采用驻定相位原理对其分解将得到复杂的解析式, 从而后续算法的推导变得困难. 现有的双曲等效法可以将双根式距离历程等效为单根式, 但由于该方法为距离历程的二阶近似, 当用于双站 SAR 前视成像时, 由于其较大的前视角, 未完全等效的距离历程高次项造成的误差已经超出可以接受的范围. 针对以上问题, 本文首先提出了一种改进的双曲等效法, 该方法通过引入新的补偿变量来提高距离历程的等效精度; 然后在此基础上推导回波信号的二维频谱解析式, 并给出了一种适用于双站 SAR 前视成像的距离多普勒算法; 最后通过仿真实验, 将原双曲等效法与改进方法的等效误差以及成像结果做对比, 验证了本文算法的有效性和优越性.

关键词: 双曲等效, 双站合成孔径雷达, 前视成像, 距离多普勒算法

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.63.028403

1 引言

前视成像有着很大的潜在应用价值, 它可以应用于恶劣天气下的飞机导航和盲降, 提高飞行的安全度^[1]等. 然而传统的单站合成孔径雷达 (SAR)^[2-7]在用于对飞机飞行路线正前方进行成像时存在两个主要问题: 1) 在飞行路线方向上, 毗邻两点之间的多普勒频率差异很小, 所以导致单站 SAR 前视成像时, 在方位向很难获得高的分辨率^[8]; 2) 当两个目标对称分布在飞行路线的左右两侧时, 由于它们有着相同的距离历程, 会造成成像模糊.

双站前视 SAR (BFSAR) 很好地解决了以上问题. 在本文研究的双站 SAR 前视成像模型中, 发射天线工作在侧视模式, 用于照亮成像场景, 与发射天线相互分离的接收天线则工作在前视模式. 由于

发射天线工作在侧视模式, 在飞行方向上, 毗邻两点之间的多普勒频率差异被拉大, 因此可以得到高的方位向分辨率, 同时也不再存在距离历程相同的模糊点.

目前研究较多的为一站固定式双站 SAR 前视成像, 其中发射天线固定, 接收天线匀速运动. 由于发射天线是固定的, 目标到发射天线的距离历程是时不变的, 因此一站固定式双站前视 SAR 的距离历程为单根式形式, 推导成像算法的复杂度也相应降低, 代表的研究成果有文献^[9, 10], 并且文献^[11, 12]给出了一站固定式双站 SAR 前视成像实验, 得到了令人满意的实验结果. 更为普通模式的双站 SAR 前视成像, 发射天线和接收天线的运动轨迹都是任意的, 距离历程的双根式为推导适用于双站前视 SAR 的成像算法带来了难题, 目前相关的研究成果有文献^[13-16], 其主要思想是先采用不同的基于显示频谱近似方法或基于隐式频谱分解的方

* 教育部博士点基金 (批准号: 20113219110018) 和部预研基金 (批准号: 9140A07010713BQ02025) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guhong666@njjust.edu.cn

法将距离历程的双根式进行分解, 然后推导出点目标的二维频谱, 最后在此基础上推导适用于双站前视SAR的成像算法。

双曲等效方法已经用于双站SAR(BSAR)成像研究中, 该算法最初由Bamler等^[17]提出, 它的主要思想是将双站SAR对于某个点目标的成像几何等效成类似单站SAR成像几何, 但该算法最初只可用于正侧视情形. 随后Qiu等^[18]增加了等效斜视角变量, 使得该算法能用于双站SAR中小斜视角模式. 但双曲等效法归根结底是真实斜距历程的二阶近似, 在双站SAR前视模式中, 由于前视的几何构型导致了未完全等效的高次项影响增加, 使得该方法不再有效. 文献^[19]提出了一种斜距历程四阶近似的等效法, 极大地提高了等效精度, 但同时也使得计算量和实现复杂度增大. 针对以上问题, 本文首先在文献^[18, 19]基础上, 在保证等效精度的前提下, 提出了一种改进的双曲等效法, 通过增加补偿变量来完全等效距离历程的前三次项, 然后将该方法用于双站SAR前视成像中, 给出了一种适用于双站SAR前视成像的距离多普勒(RDA)

算法. 数值仿真结果表明, 与原有的双曲等效法相比, 本文算法能对双站SAR前视构型更有效地进行等效和精确成像。

2 改进的双曲等效法

本文研究的双站SAR前视成像几何关系如图1所示. 发射和接收天线分别以速度 v_T, v_R 在两个相互平行的轨道上匀速运动, 发射天线工作在侧视模式, 接收天线工作在前视模式, τ 为快时间, t 为慢时间. 令 $t = 0$ 时接收天线在地面的投影为坐标原点 o , 此时发射天线的位置为 $T(x_T, y_T, z_T)$, 接收天线的位置为 $R(0, 0, z_R)$, 设地面照射区域中的任意一点目标 $P(x_p, y_p, z_p)$, 根据合成波束找到对应于该点的合成孔径中心时刻 t_{pc} , 定义该时刻发射和接收天线到目标 P 的距离分别为 R_{Tc} 和 R_{Rc} , 并且发射天线至目标的侧视角和斜视角分别为 ϕ_T 和 θ_T , 接收天线至目标的前视角为 ϕ_R . 则在任意 t 时刻, 发射与接收天线与目标的距离分别为 $R_T(t)$ 和 $R_R(t)$, 表达式如下:

$$R_T(t) = \sqrt{R_{Tc}^2 + v_T^2(t - t_{pc})^2 - 2R_{Tc}v_T(t - t_{pc})\sin\theta_T}, \quad (1)$$

$$R_R(t) = \sqrt{R_{Rc}^2 + v_R^2(t - t_{pc})^2 - 2R_{Rc}v_R(t - t_{pc})\sin\phi_R}, \quad (2)$$

其中

$$R_{Tc} = \frac{z_T}{\cos\phi_T}, \quad (3)$$

$$R_{Rc} = \frac{z_R}{\cos\phi_R}. \quad (4)$$

因此双站前视SAR的总距离历程为

$$R_{bi}(t) = R_T(t) + R_R(t), \quad (5)$$

由(5)式可知, 双站前视SAR的总距离历程为双根

号形式, 如果将其代入到双站SAR点目标回波公式中, 直接进行算法推导将是一件很困难的事. 下面采用改进的双曲等效法对 $R_{bi}(t)$ 进行等效, 其中 R_{mc}, v_m 和 θ_m 为双曲等效的待定变量, 在此基础上引进新补偿变量 a_0 , 该补偿变量使得真实斜距历程的三次项得以完全等效, 很大程度地提高了等效精度. $R_m(t)$ 为等效成单站SAR的距离历程, 表达式如下:

$$R_{bi}(t) \approx 2R_m(t) = 2\left(\sqrt{R_{mc}^2 + v_m^2(t - t_{pc})^2 - 2R_{mc}v_m(t - t_{pc})\sin\theta_m} + a_0\right). \quad (6)$$

将 $R_T(t), R_R(t)$ 和 $R_m(t)$ 分别在 $t = t_{pc}$ 处进行泰勒展开, 并分别令泰勒展开式中三次以下项进行相等, 整理可解得 R_{mc}, v_m, θ_m 和 a_0 四个待定变量为

$$R_{mc} = \frac{AB}{C}, \quad (7)$$

$$v_m = \sqrt{A^2 + BR_{mc}}, \quad (8)$$

$$\theta_m = \arctan\sqrt{\frac{A^2}{BR_{mc}}}, \quad (9)$$

$$a_0 = \frac{R_{Tc} + R_{Rc}}{2} - R_{mc}, \quad (10)$$

其中

$$A = \frac{v_T \sin \theta_T}{2} + \frac{v_R \sin \varphi_R}{2}, \quad (11)$$

$$B = \frac{v_T^2 \cos^2 \theta_T}{2R_{Tc}} + \frac{v_R^2 \cos^2 \varphi_R}{2R_{Rc}}, \quad (12)$$

$$C = \frac{v_T^3 \sin \theta_T \cos^2 \theta_T}{2R_{Tc}^2} + \frac{v_R^3 \sin \varphi_R \cos^2 \varphi_R}{2R_{Rc}^2}. \quad (13)$$

将(7)–(10)式代入(6)式便完成了双曲等效处理,使得双站前视SAR对于目标 P 的成像几何等效成一单站SAR的成像几何.需要注意的是,该等效并非简单的几何模型上等效,上式中的四个变量是随着距离的变化而空变的.原始的双曲等效法只完全等效到泰勒展开的二次项,当应用到双站前视SAR中时,未完全等效的高次项对误差的贡献越来越大,使得该方法不再适用.文献[19]虽然提高了等效后的精确度,但通过解方程组得到的等效变量表达式较为复杂,从而使得后续成像算法的实现也变得烦琐复杂,增大了实际应用时的计算量和实现难度.而本文提出的改进双曲等效法,在保证等效结果精确度的同时,也得到了简单的等效变量表达式,后续成像算法的实现变得更加简洁,降低了实际应用时的计算量和复杂度,并将其应用于双站SAR前视成像中.

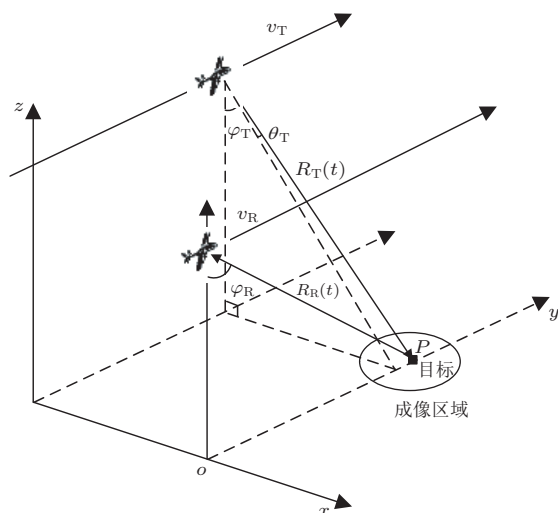


图1 双站SAR前视成像几何模型

3 双站SAR前视成像距离多普勒算法

假设双站前视SAR发射的信号为线性调频信号,经过双曲线等效方法处理后,点目标 P 的回波

信号解析式为

$$s(\tau, t) = \sigma_p \text{rect} \left(\frac{\tau - 2R_m(t)/c}{T} \right) \times \exp \{ j\pi k_r (\tau - 2R_m(t)/c)^2 \} \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_m(t)}{\lambda} \right\}, \quad (14)$$

式中 σ_p 为点目标 P 的后向散射系数, T 和 k_r 分别为线性调频信号时宽和调频斜率, c 为光速, λ 为载频是 f_c 的载波波长, $\text{rect}(\cdot)$ 为距离向的矩形窗函数.由于双站前视SAR的距离历史域经双曲等效后变为了单根号形式,因此这里采用驻定相位原理(POSP)进行二维傅里叶变换,得到点目标的二维频谱解析式为

$$s(f_\tau, f) = \sigma_p \exp \left(-j\pi \frac{f_\tau^2}{k_r} \right) \exp \left\{ -j2\pi f \times \left(\frac{R_{mc} \sin \theta_m}{v_m} + t_{pc} \right) \right\} \times \exp \left\{ -jR_{mc} \cos \theta_m \times \sqrt{\left[\frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} \right]^2 - \left(\frac{2\pi f}{v_m} \right)^2} \right\} \times \exp \left\{ -j4\pi \frac{f_\tau + f_c}{c} a_0 \right\}, \quad (15)$$

式中

$$f_\tau \in [-B/2, B/2], \quad (16)$$

$$f \in [f_{dc} - B_a/2, f_{dc} + B_a/2], \quad (17)$$

$$f_{dc} = \frac{f_\tau + f_c}{c} v_m \sin \theta_m, \quad (18)$$

其中 B 为发射信号带宽, B_a 为方位向多普勒带宽, f_{dc} 为多普勒中心频率.将(15)式第三、四个指数项在 $f_\tau = 0$ 处进行泰勒展开,并保留到 f_τ 的三次项,可得

$$s(f_\tau, f) = \sigma_p \exp(-j\pi f_\tau^2/k_r) \exp \left\{ -j2\pi f \times (R_{mc} \sin \theta_m/v_m + t_{pc}) \right\} \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_{mc} \cos \theta_m D(f, v_m) + a_0] \right\} \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_\tau}{c} \times \left[\frac{R_{mc} \cos \theta_m}{D(f, v_m)} - a_0 \right] \right\} \times \exp \left\{ j \frac{2\pi f_\tau^2}{c f_c} R_{mc} \cos \theta_m \times \frac{1 - D(f, v_m)^2}{D(f, v_m)^3} \right\}$$

$$\times \exp \left\{ -j \frac{2\pi f_{\tau}^3}{c f_c^2} R_{mc} \cos \theta_m \right. \\ \left. \times \frac{1 - D(f, v_m)^2}{D(f, v_m)^5} \right\}, \quad (19)$$

其中徙动参数 $D(f, v_m)$ 为

$$D(f, v_m) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{2v_m} \right)^2}. \quad (20)$$

由 (19) 式的展开式可看出, 第一个指数项为距离向调制, 是关于 f_{τ} 的二次函数, 因此在频域上构造用于距离向压缩的匹配滤波器 H_r 为

$$H_r(f_{\tau}) = \exp(j\pi f_{\tau}^2/k_r). \quad (21)$$

(19) 式中第二个指数项为关于方位向频率 f 的线性项, 它包含了目标方位向的位置信息; 第三个指数项为方位向调制, 可近似看为一个随距离 R_{mc} 变化的关于方位向频率 f 的二次函数. 在此设计方位向匹配滤波器为

$$H_a(f; R_{mc}) = \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} [R_{mc} \cos \theta_m D(f, v_m) \right. \\ \left. + a_0] + j2\pi f \frac{R_{mc} \sin \theta_m}{v_m} \right\}. \quad (22)$$

(19) 式中第四个指数项包含了目标距离向的位置信息, 也即距离徙动项. 距离徙动函数为

$$\Delta R_{RCM}(f; R_{mc}) = \frac{R_{mc} \cos \theta_m}{D(f, v_m)} - a_0 - R_{mc}, \quad (23)$$

该式表明距离徙动函数是方位频率 f 的函数, 同时它也是距离 R_{mc} 的函数, 也就是说它是随距离变化的. 针对这个特性, 本文采用在距离多普勒域进行 sinc 函数插值来校正距离徙动的方法, 此时有一维数据在距离时间上, 因此可以准确地校正随距离变化的距离徙动.

(19) 式中第五个指数项为需要进行的二次距离压缩项, 如果忽略二次项中 R_{mc} , v_m 和 θ_m 随距离变化的因素, 在二维频域构造的二次距离压缩的匹配滤波器为 $H_{SRC}(f_{\tau}, f)$, 其中 R_{mc_ref} , v_{m_ref} 和 θ_{m_ref} 参考距离处的值:

$$H_{SRC}(f_{\tau}, f) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi f_{\tau}^2}{c f_c} R_{mc_ref} \cos \theta_{m_ref} \right. \\ \left. \times \frac{1 - D(f, v_{m_ref})^2}{D(f, v_{m_ref})^3} \right\}. \quad (24)$$

(19) 式中第六个指数项是关于 f_{τ} 的三次函数, 为残余相位项, 该项会引起距离向旁瓣的不对称和旁瓣电平的升高, 可以在二维频域对其补偿. 补偿

函数为

$$H_{res}(f_{\tau}, f) = \exp \left\{ j \frac{2\pi f_{\tau}^3}{c f_c^2} R_{mc_ref} \cos \theta_{m_ref} \right. \\ \left. \times \frac{1 - D(f, v_{m_ref})^2}{D(f, v_{m_ref})^5} \right\}. \quad (25)$$

在上述的距离多普勒算法中, 距离向压缩、二次距离压缩和残余相位的补偿是在二维频域完成的, 为了使距离徙动校正更加精确, 距离徙动的校正是在距离多普勒域进行 sinc 函数插值完成, 最后进行方位向压缩和几何校正得到最终成像结果, 算法流程图如图 2 所示.

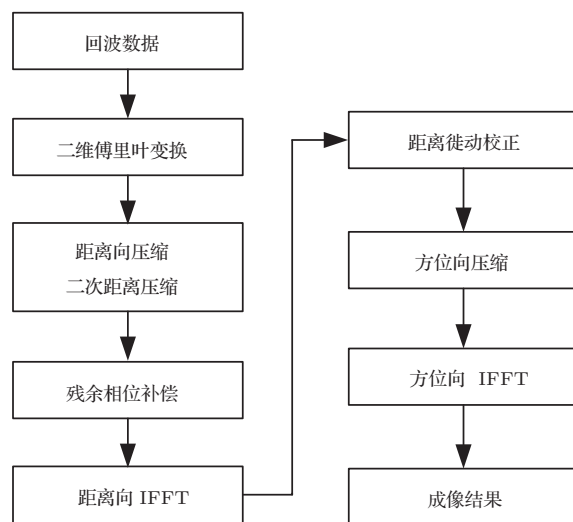


图2 双站 SAR 前视成像 RDA 算法流程图

4 仿真结果与分析

本节将通过具体的仿真实验来验证上文提出算法的有效性, 成像几何关系如图 1 所示, 成像场景则是由 9 个点目标组成, 如图 3 所示, 其中点目标之间在地距方向的间隔距离为 500 m, 在方位向的间隔为 100 m. 具体的双站 SAR 前视成像仿真参数如表 1 所示.

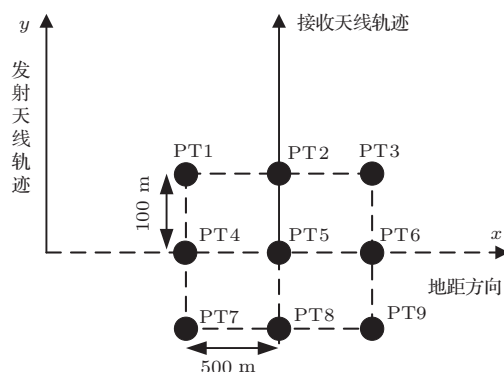


图3 成像场景示意图

图4(a)为构型一时两种双曲等效法的等效误差曲线,此时接收天线前视角为 35° ,属于小的前视角.图中横坐标为时间 $\xi = t - t_{pc}$ (t_{pc} 为对应于场景中心点目标PT5的合成孔径中心时刻),纵坐标为距离误差值大小.由图中可以看出,当 $\xi = 0$ 时刻误差为零,当目标离合成孔径中心时刻越远,引入的误差越大,并在方位向起始和结束时间处引入最大误差.采用双曲等效法在整个合成孔径时间内达到的最大误差约为0.117 m,而改进的双曲等效法仅有 8×10^{-4} m.仿真实验中载波波长为0.031 m,为了满足精度要求,一般采用误差不大于 $1/8$ 的波长($\lambda/8 = 3.875 \times 10^{-3}$ m)为标准,显然原始的双曲等效法无法胜任该构型下的双站SAR

前视成像应用,而改进的双曲等效法完全满足.

图4(b)为构型二时两种双曲等效法的等效误差曲线,此时接收天线前视角为 60° ,属于大的前视角.由图中可以看出,在整个合成孔径时间内,双曲等效法引入的最大等效误差为 8.2×10^{-3} m,仍然大于 $1/8$ 的波长,而改进的双曲等效法引入的最大等效误差为 3.2×10^{-4} m.

图4(c)为构型三时两种双曲等效法的等效误差曲线,与前两种构型相比较,该构型增加了较大的发射机斜视角,并使发射机和接收机的飞行速度不相等.仿真结果表明,双曲等效法引入的最大等效误差为0.044 m,远大于 $1/8$ 的波长,而改进的双曲等效法引入的最大等效误差仅为 2.8×10^{-4} m.

表1 双站SAR前视成像仿真实验参数

系统参数	构型一	构型二	构型三
载波频率	9.68 GHz	9.68 GHz	9.68 GHz
脉冲持续时间	1.3 μ s	1.3 μ s	1.3 μ s
信号带宽	100 MHz	100 MHz	100 MHz
发射机飞行速度	200 m/s	200 m/s	120 m/s
接收机飞行速度	200 m/s	200 m/s	80 m/s
发射机起始坐标	(-50, 3.80, 20) km	(-50, 8.96, 20) km	(-50, -41.24, 10) km
接收机起始坐标	(0, 0, 5) km	(0, 0, 5) km	(0, 0, 2) km
发射机斜视角	0°	0°	40°
接收机前视角	35°	60°	35°

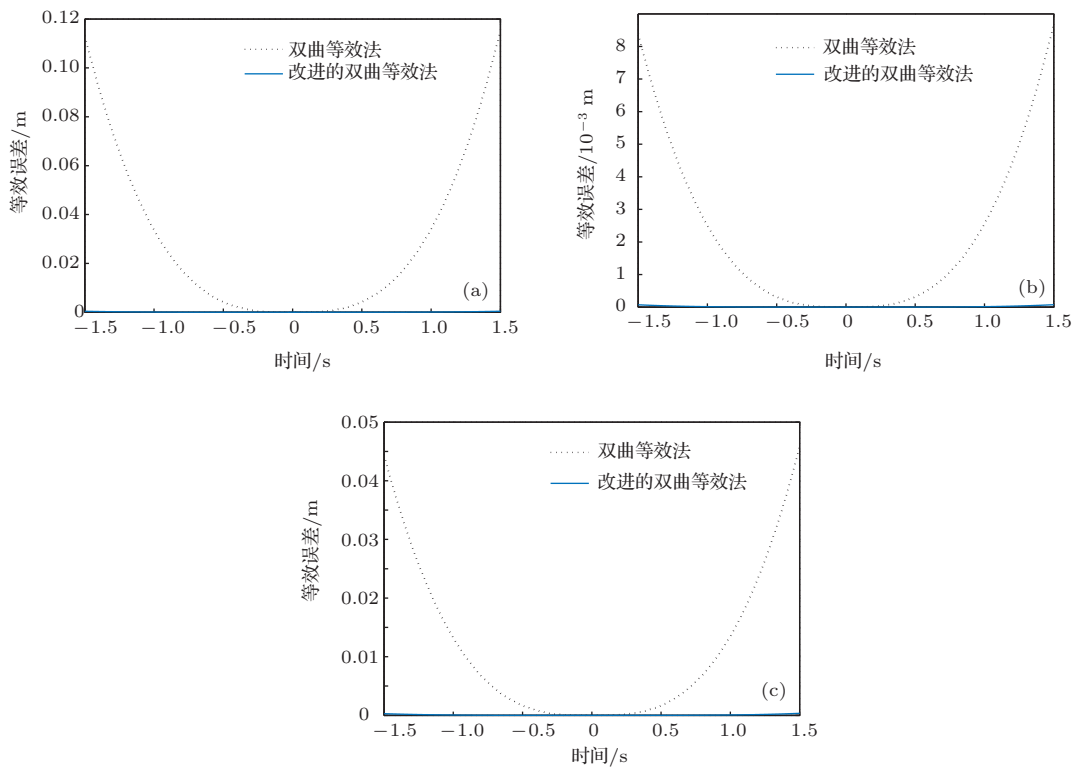


图4 两种双曲等效法的误差比较 (a) 构型一的双曲等效误差; (b) 构型二的双曲等效误差; (c) 构型三的双曲等效误差

比较以上仿真结果可以发现, 在双站SAR前视成像的应用中, 不管是小的前/斜视角还是大的前/斜视角, 由于双曲等效法采取二阶近似, 都会引入较大的距离历程误差, 而改进的双曲等效法采取的是三阶近似, 引入的误差则基本上可以忽略. 从以上仿真结果也可以看出, 在双站SAR前视成像应用中, 采取如图1的几何结构, 双曲等效法引入的误差并不是简单地随着前/斜视角的增大而增大. 为了更深入地分析前/斜视角对双曲等效法进行近似产生的影响, 图5给出了构型一情形下, 发射机斜视角和接收机前视角的变化对双曲等效误差影响的关系.

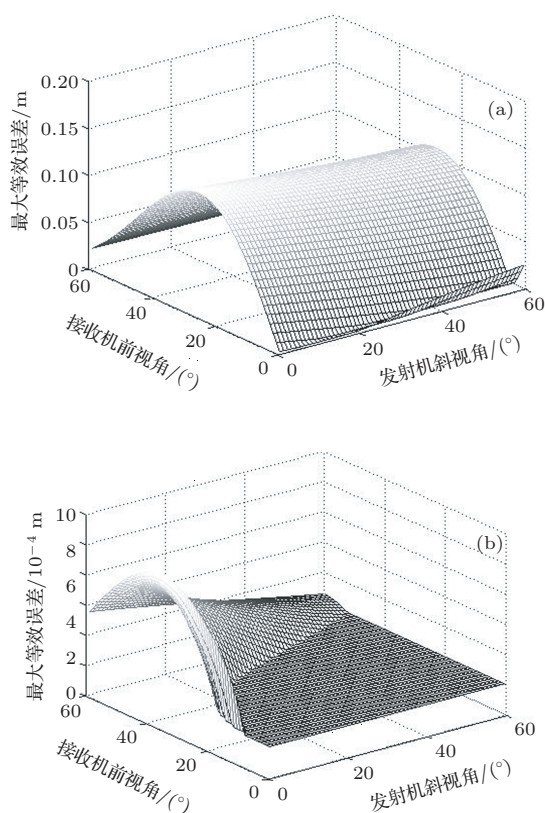


图5 前/斜视角与双曲等效误差的关系 (a) 前/斜视角对双曲等效法误差的影响; (b) 前/斜视角对改进双曲等效法误差的影响

由图5(a)可以看出, 大约在前视角为 0° — 28° 区间时, 双曲等效误差是随接收机前视角的增大而增大, 超过 28° 则相反, 然而发射天线的斜视角对

等效误差的影响并不明显. 由图5(b)可以看出, 改进双曲等效法由于引入的误差很小, 引入的最大误差也在 10^{-4} 的量级, 误差可以忽略不计.

最后结合第三节推导出的RDA成像算法, 并使用构型一的参数对图3所示的场景进行成像, 得到的最终仿真结果图如6所示, 图中显示的动态范围为 -40 — 0 dB. 为了更好地进行比较, 图6(a)为采用双曲等效法得到的成像结果, 可见由于双曲等效法采用二阶近似, 在双站SAR前视成像应用中引入的等效误差过大, 导致最后无法对点目标进行正确的聚焦成像. 图6(b)为采用本文提出改进的双曲等效法, 9个点目标都得到了很好的聚焦. 为了衡量成像质量, 表2列出了其中3个点目标的峰值旁瓣比和积分旁瓣比参数. 从表2可以看出, 点目标都得到了精确的聚焦. 因此本文提出的改进双曲等效法以及并在此基础上推导出的RDA算法用于双站SAR前视成像是有效可行的.

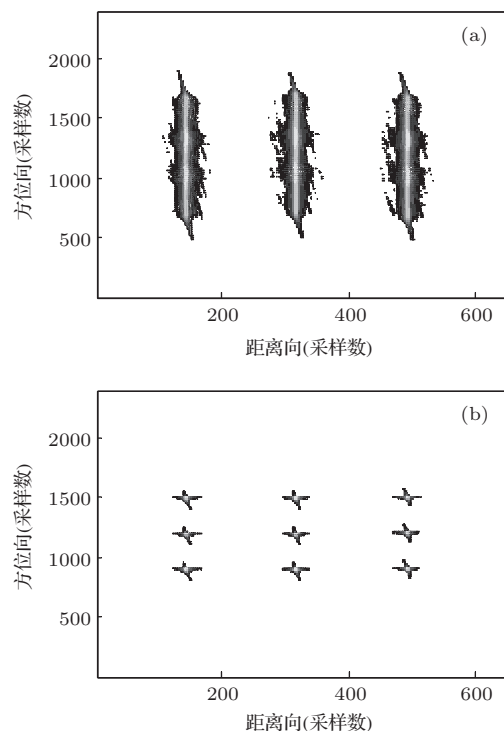


图6 点目标最终的成像结果 (a) 双曲等效法得到的成像结果; (b) 改进的双曲等效法得到的成像结果

表2 成像结果峰值旁瓣比、积分旁瓣比

点目标	距离向		方位向	
	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB
PT1	-13.24	-9.83	-12.96	-9.40
PT5	-13.25	-9.84	-12.97	-9.42
PT9	-13.22	-9.82	-12.96	-9.40

5 结 论

双站SAR前视成像很好地解决了传统SAR无法对飞行路径正前方进行高分辨成像的难题,但由于其距离历程的双根式特性,使得传统成像算法无法直接对其成像. 双曲等效法可以将双站SAR双根式的距离历程转换为单根式,然而由于双曲等效法采用的是距离历程的二阶近似,在应用于双站SAR前视成像时引入的误差过大,无法对成像场景进行准确的聚焦成像. 本文提出了一种改进的双曲等效法,通过引入新的补偿变量,对距离历程进行三阶近似,使得等效的精度更高,然后在此基础上推导出一种用于双站SAR前视成像的距离多普勒算法,最后通过仿真实验,验证了该算法的可行性和有效性.

参考文献

- [1] Klare J, Walterscheid I, Brenner A R, Ender J H G 2006 *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS) Denver, July 31, 2006 p1208
- [2] Zhang Y M, Wang Y H, Zhao C F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084103
- [3] Wang Y H, Guo L X, Wu Q 2006 *Chin. Phys. B* **15** 1755
- [4] Li J C, Huang B, Peng Y X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 189501 (in Chinese)[李金才, 黄斌, 彭宇行 2012 物理学报 **61** 189501]
- [5] Ji W J, Tong C M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 020301
- [6] Ai W H, Yan W, Zhao X B, Liu W J, Ma S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 068401 (in Chinese)[艾未华, 严卫, 赵现斌, 刘文俊, 马烁 2013 物理学报 **62** 068401]
- [7] Jiang Z H, Huang S X, Shi H Q, Zhang W, Wang B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108402 (in Chinese)[姜祝辉, 黄思训, 石汉青, 张伟, 王彪 2011 物理学报 **60** 108402]
- [8] Loehner A K 1998 *IEE Proc. Radar Sonar and Navig.* **145** 128
- [9] Qiu X, Hu D, Ding C 2008 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **5** 735
- [10] Wu J, Li Z, Huang Y, Yang J 2013 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **PP**(99) 1
- [11] Wu J, Huang Y, Yang J 2011 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS) Vancouver BC, July 24–29, 2011 p1223
- [12] Espeter T, Walterscheid I, Klare J, Brenner A R 2011 *Proceedings International Radar Symposium* (IRS) Leipzig, September 7–9, 2011 p41
- [13] Wu J, Yang J, Huang Y, Yang H 2011 *IEEE Radar Conference* (RADAR) Kansas, May 23–27, 2011 p1036
- [14] Wang R, Loffeld O, Nies H, Peters V 2011 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS) Honolulu, July 25–30, 2010 p4091
- [15] Li J, Zhang S, Chang J 2012 *International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology* (MMWCST) Chengdu, China, April 19–20, 2011 p1
- [16] Wang H, Yang J, Huang Y, Wu J 2009 *2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar* Xi'an, China, October 26–30, 2009 p955
- [17] Bamler R, Meyer F, Liebhart W 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **45** 3350
- [18] Qiu X, Hu D, Ding C 2006 *CIE'06. International Conference on Radar* Shanghai, China, October 16–19, 2006 p1
- [19] Xiong T 2012 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [熊涛 2012 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]

Focusing bistatic forward-looking synthetic aperture radar based on modified hyperbolic approximating*

Ma Chao Gu Hong[†] Su Wei-Min Li Chuan-Zhong

(Institute of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China)

(Received 16 September 2013; revised manuscript received 10 October 2013)

Abstract

The conventional monostatic synthetic aperture radar (SAR) shows a limitation if a forward-looking geometry is used. However, bistatic forward-looking SAR gives a good solution, providing a high resolution image in the flight path direction. Due to the fact that the range history of bistatic SAR is a double square root, classical imaging algorithm cannot be applied to the bistatic SAR directly. Also it is difficult to deduce imaging algorithm from double square root directly. The hyperbolic approximating method can transform double square root into single one, when being used in forward-looking geometry, and the high order term error is obvious and cannot be ignored. In this paper, we propose a modified hyperbolic approximating method, which makes a cubic term approximation and improves the precision, then we apply the new method to bistatic forward-looking SAR and deduce the bistatic point spectrum. Based on the spectrum, a modified range Doppler algorithm is proposed for focusing bistatic forward-looking SAR. Finally, numerical simulation is used to compare the original hyperbolic approximating method with the modified one for veridating the proposed algorithm and processing approach.

Keywords: hyperbolic approximating, bistatic SAR, forward-looking imaging, range Doppler algorithm

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: [10.7498/aps.63.028403](https://doi.org/10.7498/aps.63.028403)

* Project supported by the Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20113219110018), and the Ministry Pre-research Foundation (Grant No. 9140A07010713BQ02025).

† Corresponding author. E-mail: guhong666@njjust.edu.cn