

基于切比雪夫多项式的双基地前视SAR成像算法

陈麒^{1†}, 李相平¹, 祝明波¹, 邹小海², 陆志毅¹

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东烟台 264001; 2. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

摘要: 双基地前视合成孔径雷达(SAR)的特殊构型使其距离历程具有双根号和大斜视的特点,给回波信号的成像处理带来困难,也对成像算法的精度提出更高要求,为此提出一种基于切比雪夫多项式的双基地前视SAR RD成像算法. 首先,建立双基地前视SAR的几何模型与回波信号模型,指出收发分离构型对二维频谱公式推导过程中驻定相位点求解的影响;然后,引入切比雪夫多项式展开代替传统成像算法中的泰勒级数展开,在此基础上进行双基地前视SAR斜距等效模型和二维频谱模型的推导;最后,通过分析确定双基地前视SAR RD成像算法的相位匹配函数,给出成像算法的完整流程. 仿真结果表明,所提出算法可极大减小双基地前视SAR的斜距等效误差与频谱展开误差,有效提高成像算法的聚焦深度和成像质量.

关键词: 双基地; 前视; 合成孔径雷达; 成像算法; 切比雪夫多项式; 斜距等效模型; 驻定相位原理
中图分类号: TN959.3 **文献标志码:** A

Imaging algorithm for bistatic forward-looking SAR based on Chebyshev polynomials

CHEN Qi^{1†}, LI Xiang-ping¹, ZHU Ming-bo¹, ZOU Xiao-hai², LU Zhi-yi¹

(1. College of Coast Defence Arm, Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. College of Weapons Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The special configuration of the bistatic forward-looking synthetic aperture radar(SAR) brings double square root and high squint angle to its range history, which makes it difficult to focus the echo signal, and puts forward higher requirements to the accuracy of the imaging algorithm. Therefore, a bistatic forward-looking SAR RD imaging method based on Chebyshev polynomials is proposed. Firstly, the geometry model and echo model are built, and the influence caused by separated configuration on determining stationary phase point during two-dimensional spectrum model deriving is indicated. Then, by the introduction of Chebyshev polynomials expansion replacing Taylor series expansion in the traditional imaging algorithm, the equivalent range model and the two-dimensional spectrum model of bistatic forward-looking SAR are derived. Finally, the phase matching functions of the bistatic forward-looking SAR RD imaging algorithm are determined by analysis, and the complete program of the imaging algorithm is given. The simulation results show that the proposed algorithm can significantly decrease the equivalent range error and spectrum expansion error of the bistatic forward-looking SAR, and improve the focus depth and imaging quality effectively.

Keywords: bistatic; forward-looking; SAR; imaging algorithm; Chebyshev polynomials; equivalent range model; principle of stationary phase

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)通过雷达运动模拟真实天线孔径,实现方位向的高分辨率,通过发射线性调频信号,实现距离向的高分辨率,由此可获取目标区域的二维雷达图像^[1].与传统成像方式相比,具有全天时、全天候工作的优势,且作用距离远,自诞生以来就受到广泛关注.常规SAR由于工作体制的限制,在飞行区域的正前方存在成像盲

区.为改善这一不足,多种雷达前视解决方案应运而生,如单基地多天线系统、单发多收阵列天线系统和收发分离的双基地系统等^[2].其中,双基地前视SAR成本较低,易于实现,且配置灵活多样,可用于不同需求下的前视成像,如恶劣天气下飞机起降、战场环境侦察等,已成为近年来前视SAR领域的研究热点^[3-7].

收发分离配置带来前视成像优势的同时,也给回波信号处理带来困难.特殊几何构型使得双基地前

收稿日期: 2017-10-23; 修回日期: 2018-03-09.

基金项目: 国家重点实验室开放课题基金项目(CEMEE2016K0201B).

责任编辑: 林崇.

[†]通讯作者. E-mail: chenqiyt@163.com.

视SAR具有距离历程的双根号特性及回波信号的大斜视特点,对二维频谱及成像算法的精度要求进一步提高^[8].现有双基地成像算法中,LBF算法要求双基地SAR的收发相位历程相差不大^[9],MSR算法精度则受斜距展开阶数的影响,但精度越高其二维频谱的表达式越复杂,影响后续成像算法的推导^[10].另一种双基地SAR成像思路是单基地等效法:DMO算法通过smile变换将双基地回波数据转为单基地回波数据,该方法应用范围极为有限,仅适用于顺飞模式^[11].基线中点等效法通过距离补偿将回波数据等效为基线中点处的回波数据,适用于长斜距短基线情况^[12].双曲等效法采用单基地距离历程公式等效双基地距离历程,等效过程中采用泰勒级数展开,误差随着远离展开点而增加,使得该方法仅适用于中小斜视角模式^[13].

为满足双基地前视SAR成像的应用需求,本文提出一种基于切比雪夫多项式的双基地前视SAR RD成像算法.利用切比雪夫多项式展开的快速收敛和误差有界特性,提高逼近精度,减小近似误差^[14].推导了基于切比雪夫多项式的斜距等效模型与回波信号二维频谱模型,给出RD成像算法中各相位匹配函数,通过实验仿真验证了理论分析的正确性和成像算法的有效性.

1 双基地前视SAR回波信号模型

平飞双基地前视SAR的几何构型如图1所示.其中: T 和 R 分别代表发射机与接收机, P 为地面点目标.接收机工作在前视模式,即成像区域位于接收机的正前方,前视角为 φ_R ;发射机工作在斜视模式,斜视角为 θ_T .发射机与接收机匀速直线飞行,速度分别为 v_T 和 v_R .在任意时刻,发射机和接收机到 P 的斜距为 $R_T(t)$ 和 $R_R(t)$,且在合成孔径中心时刻($t=0$), $R_T(0)=R_{T0}$, $R_R(0)=R_{R0}$.

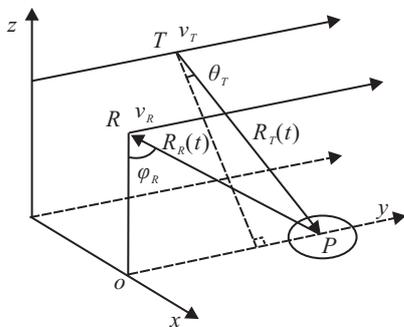


图1 双基地前视SAR的空间构型

设发射机发射调频率为 k_r 的线性调频信号,天线增益和点目标后向散射系数为1,接收机收到的回波信号经调制解调后,可表示为

$$s_r(t, \tau) = w_r\left(\tau - \frac{R(t)}{c}\right) - w_a(t) \exp\left(-j2\pi\frac{R(t)}{\lambda}\right) \times \exp\left(j\pi k_r\left(\tau - \frac{R(t)}{c}\right)^2\right). \quad (1)$$

其中: t 为方位时间; τ 为距离时间; c 为光速; λ 为载波波长; $w_r(\tau)$ 和 $w_a(t)$ 分别为距离向和方位向的窗函数; $R(t)$ 为 t 时刻信号的距离历程,表达式为

$$R(t) = R_T(t) + R_R(t) = \sqrt{R_{T0}^2 + v_T^2 t^2 - 2R_{T0}v_T t \sin\theta_T} + \sqrt{R_{R0}^2 + v_R^2 t^2 - 2R_{R0}v_R t \sin\varphi_R}. \quad (2)$$

为设计成像算法,需将回波信号变换到二维频域.回波信号利用驻定相位法(POSP)作距离向傅里叶变换后,式(1)变为

$$S_r(t, f_r) = W_r(f_r)w_a(t) \exp\left(-j\pi\frac{f_r^2}{k_r}\right) \times \exp\left(-j2\pi\frac{(f_0 + f_r)R(t)}{c}\right). \quad (3)$$

其中: f_r 为距离频率, f_0 为载波频率.

再对式(3)作方位向傅里叶变换,有

$$S_r(f_a, f_r) = \int S_r(t, f_r) \exp(-j2\pi f_a t) dt, \quad (4)$$

其中 f_a 为方位频率.设以上被积分函数的相位为 Φ_1 ,再次利用POSP,令 $\partial\Phi_1/\partial t = 0$,求解驻定相位点 t^* ,此时可得

$$R'(t^*) = -\frac{cf_a}{f_0 + f_r}. \quad (5)$$

由于 $R(t)$ 中双根号的存在,使得驻定相位点没有解析解,即无法由式(5)直接求解 t^* .本文采用单基地等效的思想,首先将双根号距离历程拟合为单根号形式,然后求解回波信号二维频谱.传统方法中,函数展开均基于泰勒级数展开进行,误差随远离展开点而增大.本文引入切比雪夫多项式展开代替泰勒级数展开,以减小展开误差,提高等效精度.

2 基于切比雪夫多项式的RD算法

2.1 切比雪夫多项式展开

切比雪夫多项式是以递归方式定义在区间 $[-1, 1]$ 上的一系列正交多项式序列.第1类切比雪夫的根,即切比雪夫节点,在逼近理论中可用于多项式插值,实现连续函数的近似最佳一致逼近,得到更高精度的近似^[15],且具有误差最小化和区间收敛的性质,将其应用于双基前视SAR的斜距等效和频谱展开,可有效降低逼近误差,进而提高成像质量.第1类切比雪夫多项式的递推公式为

$$T_0(x) = 1, T_1(x) = x, \dots, T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x), n = 2, 3, \dots \quad (6)$$

定义在区间 $[-1, 1]$ 上的函数 $f(x)$ 可使用切比雪夫多项式展开为^[16]

$$f(x) = \frac{C_0}{2} + \sum_{i=1}^n C_i T_i(x). \quad (7)$$

其中: n 为展开阶数, $C_i(i = 0, 1, \dots, n)$ 为切比雪夫多项式系数,表达式^[17]为

$$C_i = \frac{2}{n+1} \sum_{k=0}^n f(t_k) T_i(t_k). \quad (8)$$

其中: $t_k(t_k = \cos(\frac{2k+1}{2n+2}\pi))$ 为切比雪夫节点,当 $f(x)$ 的自变量区间为 $[a, b]$ 时,需将插值节点归一化处理,新的节点^[18]为

$$t'_k = \frac{1}{2}[(b-a)t_k + b + a], \quad k = 0, 1, \dots, n. \quad (9)$$

2.2 斜距等效模型

设等效斜距模型为 $R_M(T)$,且

$$R(t) \approx 2R_M(t) = 2\sqrt{R_m^2 + v_m^2 t^2 - 2R_m v_m t \sin \theta_m}, \quad (10)$$

其中 R_m 、 v_m 和 θ_m 均为未知的等效参数.该模型相当于以单基地的距离历程等效双基地收发系统距离历程之和.

为求解以上模型中的参数,将 $R(t)$ 和 $R_M(t)$ 分别采用切比雪夫多项式在 $t \in [-T_a/2, T_a/2]$ 上展开到二阶, T_a 为合成孔径时间,可得

$$\begin{aligned} R(t) &= \frac{C_0}{2} + C_1 t + C_2 (2t^2 - 1), \\ R_M(t) &= \frac{M_0}{2} + M_1 t + M_2 (2t^2 - 1). \end{aligned} \quad (11)$$

其中: C_i 、 $M_i(i = 0, 1, 2)$ 为切比雪夫多项式系数,求解方法如式(8).

由式(10)和(11)可得

$$M_i = \frac{C_i}{2}, \quad i = 0, 1, 2. \quad (12)$$

联立式(10)和(12)最终求解,可得所有等效参数的表达式

$$\begin{aligned} R_m &= \frac{R_{T0} + R_{R0}}{2}, \\ v_m &= \sqrt{\frac{2C_0 C_2 + C_1^2 - C_2^2}{T_a^2}}, \\ \theta_m &= \arcsin\left(-\frac{C_1(C_0 + C_2)}{4R_m v_m T_a}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可得双基地前视SAR距离历程的单根号形式.可以看出,该等效形式为典型单基地SAR距离历程形式,便于后续的频谱推导及成像处理.

2.3 二维频谱推导与成像算法

采用本文所提出的等效单基地模型 $2R_M(t)$ 代替 $R(t)$,代入式(5)可得

$$2R'_M(t^*) = -\frac{c f_a}{f_0 + f_r}. \quad (14)$$

求解得驻定相位点后代入相位 Φ_1 ,可得回波信号的二维频谱

$$\begin{aligned} S(f_a, f_r) &= \\ W_r(f_r) W_a(f_a) \exp\left(\frac{j\pi f_r^2}{k_r}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi R_m \sin \theta_m f_a}{v_m}\right) \times \\ \exp\left(-\frac{j4\pi R_m \cos \theta_m f_0}{c} \sqrt{1 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_m^2 f_0^2} + \frac{2f_r}{f_0} + \frac{f_r^2}{f_0^2}}\right). \end{aligned} \quad (15)$$

其中:第1个指数项为距离向调制,第2个指数项为方位位置项,第3个指数项为距离方位耦合项.由于前视构型的特殊性,接收机一般有着较大的前视角,这就造成了整个系统的大斜视特点,加深了二维频谱距离方位之间的耦合,对成像算法提出了更高要求.为推导成像算法,需将第3个指数项的相位展开,这里将其单独列出.为便于后续分析,将此相位以 $2\pi R_m \Phi_h$ 表示,仍采用切比雪夫多项式对 Φ_h 在距离频率三阶展开,得

$$\begin{aligned} \Phi_h &= \\ \frac{E_0(f_a)}{2} + E_1(f_a) f_r + E_2(f_a) (2f_r^2 - 1) + \\ E_3(f_a) (4f_r^3 - 3f_r) &= \\ \frac{E_0(f_a)}{2} - E_2(f_a) + (E_1(f_a) - 3E_3(f_a)) f_r + \\ 2E_2(f_a) f_r^2 + 4E_3(f_a) f_r^3. \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $E_i(f_a)(i = 0, 1, 2, 3)$ 为与 f_a 有关的展开系数,计算方法如式(8).则式(15)变为

$$\begin{aligned} S(f_a, f_r) &= \\ W_r(f_r) W_a(f_a) \exp\left(-j\pi R_m \left(2E_2(f_a) - \right. \right. \\ \left. \left. E_0(f_a) + \frac{2 \sin \theta_m f_a}{v_m}\right)\right) \times \\ \exp\left(-j2\pi \frac{R_m}{c} (c(3E_3(f_a) - E_1(f_a))) f_r\right) \times \\ \exp\left(-j\pi \left(\frac{1}{k_r} - 4R_m E_2(f_a)\right) f_r^2\right) \times \\ \exp(j8\pi R_m E_3(f_a) f_r^3). \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)即为回波信号的二维频谱经过切比雪夫多项式展开并整理后的最终形式.对其进行补偿即可完成SAR成像处理,下面进行逐项分析.

式(17)中,第1个指数项为方位向调制与方位向线性项,是关于 f_a 的函数,随距离 R_m 变化,需在距离多普勒域构造方位向滤波器,表达式为

$$H_a(f_a, \tau; R_m) =$$

$$\exp\left(j\pi R_m\left(2E_2(f_a) - E_0(f_a) + \frac{2\sin\theta_m f_a}{v_m}\right)\right). \quad (18)$$

式(17)中,第2个指数项为距离线性项,对应目标回波距离向时延,将其转换到时域可得时延为 $(c(3E_3(f_a) - E_1(f_a)))/c$.为与传统方法形式上保持一致,这里设徙动因子为

$$D(f_a) = \frac{1}{c(3E_3(f_a) - E_1(f_a))}, \quad (19)$$

则在距离多普勒域新的距离等式和距离徙动量可表示为

$$R_d(f_a, \tau; R_m) = \frac{R_m}{D(f_a)},$$

$$\text{RCM}(f_a, \tau; R_m) = R_m\left(\frac{1}{D(f_a)} - 1\right). \quad (20)$$

可见,RCM同样随距离变化.本文采用RD算法成像,在距离多普勒域使用sinc插值法校正距离徙动.

式(17)中,第3个指数项为距离调制项,包含距离压缩与二次距离压缩项,随距离 R_m 和方位频率变化,在二维频域对应的匹配滤波器为

$$H_r(f_a, f_r; R_m) = \exp\left(j\pi\left(\frac{1}{k_r} - 4R_m E_2(f_a)\right)f_r^2\right). \quad (21)$$

这里对距离取近似,以参考距离 R_{m_ref} 处的匹配滤波器代替 $H_r(f_a, f_r; R_m)$,则

$$H_r(f_a, f_r; R_m) \approx H_r(f_a, f_r; R_{m_ref}) = \exp\left(j\pi\left(\frac{1}{k_r} - 4R_{m_ref} E_2(f_a)\right)f_r^2\right). \quad (22)$$

式(17)中,第4个指数项是 f_r 的3次项,为高阶误差项,需在二维频域补偿,对其取复共轭即可得到高阶误差项的补偿函数.这里同样将 R_m 取为参考距离 R_{m_ref} ,则补偿函数为

$$H_{res}(f_a, f_r; R_{m_ref}) = \exp(-j8\pi R_{m_ref} E_3(f_a) f_r^3). \quad (23)$$

基于以上分析,本文所提出的双基前视SAR RD成像算法流程如图2所示.

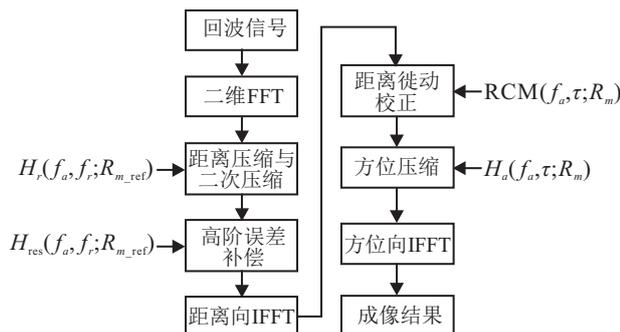


图2 双基地前视SAR RD成像算法流程

由图2可以看出,本文的双基地前视SAR RD成像算法在形式上与传统RD算法较为一致,不同之处在于各匹配滤波器与补偿项的表达形式.

3 仿真结果与分析

本文对9点目标进行成像仿真以验证所提出算法的有效性,点目标分布如图3所示,成像区大小设为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$,点 P 位于成像区中心,坐标为 $(0, 24.7, 0)\text{ km}$.双基地前视SAR的仿真参数设置如表1所示,发射机工作在小斜视模式下,接收机工作在大前视模式下,系统远发近收,发射机与接收机沿着相同方向等速飞行.

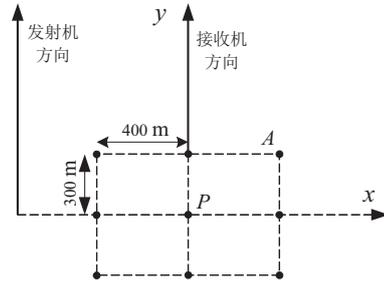


图3 点目标分布图

表1 仿真参数设置

参数	发射机	接收机
载波频率/GHz	10	
脉冲宽度/ μs	2.6	
信号带宽/MHz	100	
斜视角(前视角)/ $^\circ$	20	68
飞行速度/(m/s)	220	220
初始坐标/km	$(-49.5, 5.3, 20)$	$(0, 0, 10)$

以 P 点为例,分析斜距等效精度,取合成孔径时间 T_a 为2s.图4是分别采用双曲等效法(基于泰勒级数展开)与本文斜距等效方法的绝对误差对比图.可以看出,双曲等效法的误差随远离合成孔径中心时刻而增加,当合成孔径时间较长时,误差将给成像带来影响,而本文方法等效误差稳定在一个较小的范围内,最大误差仅为双曲等效法最大误差的25%.

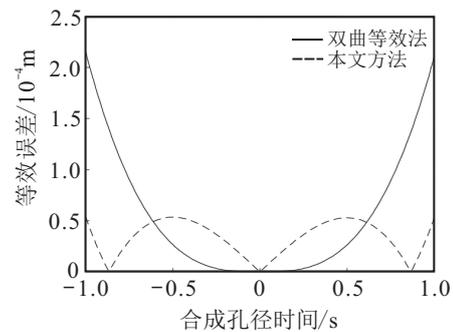


图4 斜距等效误差对比

在频谱推导过程中,采用泰勒级数展开法与切比雪夫多项式展开法的相位误差分别如图5(a)和图

5(b)所示.

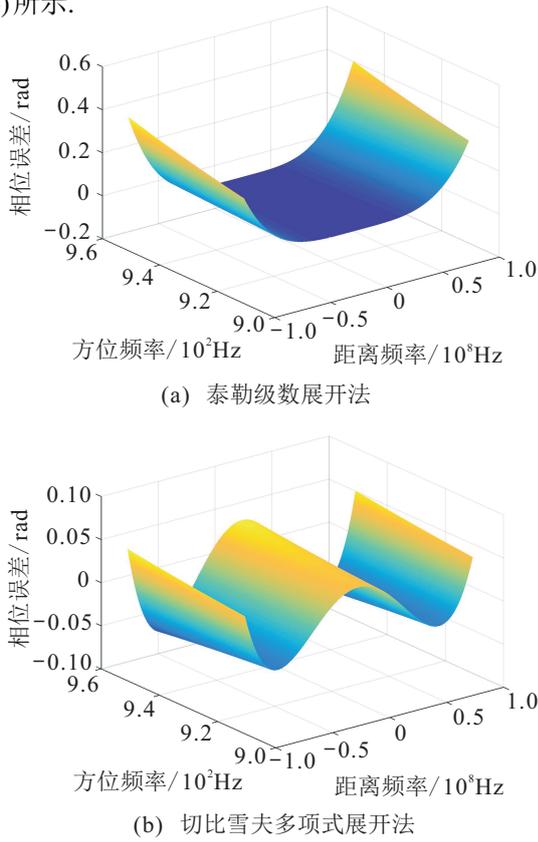


图5 频谱展开误差

由图5可以看出,泰勒级数展开法在 $f_r = 0$ 处具有较小的展开误差,随着 f_r 的增大,其误差迅速增加,而切比雪夫多项式展开法在整个 f_r 区间内误差均保持在一个较小的范围,最大误差仅为泰勒级数展开法最大误差的12.5%,对成像质量的影响也相应地减小.

根据表1所示参数和式(13)中 R_m 的求解公式,可得在仿真时 R_m 的取值范围为 [41.22, 42.29] km,在成像仿真时,一般将参考距离选择为场景中心处的斜距,因此式(22)和(23)中参考距离 R_{m_ref} 取为41.75 km. 采用本文所提出成像算法聚焦后的点阵目标图像如图6所示.

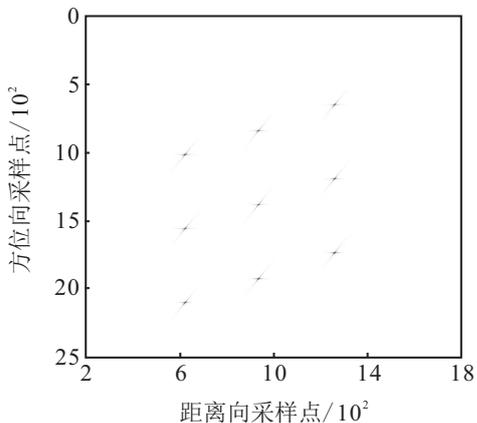


图6 点阵目标成像结果

由图6可以看出,目标在成像区域中均匀分布,虽然前视构型带来一定的形变,但是各个点目标在距离向与方位向均得到良好聚焦,验证了本文所提出成像算法的有效性.为进一步分析本文算法的成像效果,分别采用传统基于泰勒级数展开的RD算法与本文成像算法对边缘点A进行成像作对比,两种算法成像结果的方位剖面图如图7所示.

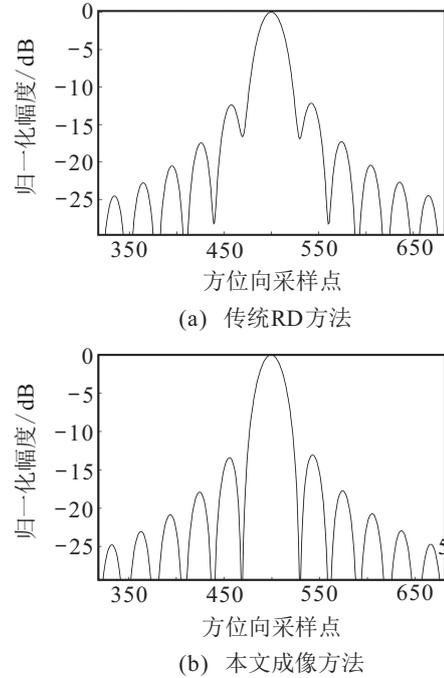


图7 两种算法成像结果的方位向剖面图

由图7(a)可以看出,在方位向上,传统RD算法的成像性能明显下降,主瓣展宽、旁瓣升高,主瓣开始淹没旁瓣,此时其PSLR为-12.14 dB,ISLR为-9.28 dB.而图7(b)中,本文所提出成像算法由于较小的斜距等效误差与频谱展开误差,方位向聚焦性能接近理想,为典型的sinc函数形状,其PSLR为-13.24 dB,ISLR为-10.07 dB,均接近理论值.仿真结果表明本文所提出算法的成像效果优于传统RD算法.

4 结论

本文提出了一种基于切比雪夫多项式的双基地前视SAR RD成像算法,将切比雪夫多项式展开应用于双基地前视SAR的斜距等效和频谱展开中,代替了传统的泰勒级数展开,有效减小了逼近误差,提高了二维频谱公式的精确性.根据所得二维频谱模型,推导了新的RD算法中各相位函数,给出了完整的成像算法流程.通过仿真,验证了本文算法与传统算法相比在成像方面的优势:本文算法可较好地逼近双基地前视SAR的斜距与二维频谱,且误差有界,提高了聚焦性能,增加了聚焦深度.

参考文献(References)

- [1] 蔡爱民, 俞根苗, 郑陶冶, 等. 弹载SAR发展趋势及其关键技术[J]. 飞航导弹, 2013(9): 69-72.
(Cai A M, Yu G M, Zheng T Y, et al. Development and key technologies of missile-borne SAR[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2013(9): 69-72.)
- [2] 庞礴, 代大海, 邢世其, 等. 前视SAR成像技术的发展和展望[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2283-2290.
(Pang B, Dai D H, Xing S Q, et al. Development and perspective of forward-looking SAR imaging technique[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2283-2290.)
- [3] Yang J Y, Huang Y L, Yang H G, et al. A first experiment of airborne bistatic forward-looking SAR-Preliminary results[C]. 2013 IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Piscataway: IEEE Press, 2013: 4202-4204.
- [4] Walterscheid I, Espeter T, Klare J, et al. Potential and limitations of forward-looking bistatic SAR[C]. 2010 IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Piscataway: IEEE Press, 2010: 216-219.
- [5] Espeter T, Walterscheid I, Klare J, et al. Bistatic forward-looking SAR: Results of a spaceborne-airborne experiment[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 765-768.
- [6] Espeter T, Walterscheid I, Klare J, et al. Bistatic forward-looking SAR experiments using an airborne receiver[C]. 2011 Proc of Int Radar Symposium(IRS). Piscataway: Press, 2011: 41-46.
- [7] Walterscheid I, Brenner A R, Klare L. Radar imaging with very low grazing angles in a bistatic forward-looking configuration[C]. 2012 IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). Piscataway: IEEE Press, 2012: 327-330.
- [8] 杨建宇. 双基地合成孔径雷达技术[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 482-501.
(Yang J Y. Bistatic synthetic aperture radar technology[J]. J of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(4): 482-501.)
- [9] Wang R, Loffeld O, UI-Ann Q, et al. A bistatic point target reference spectrum for general bistatic SAR processing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(3): 517-521.
- [10] Neo Y L, Wong F, Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93-96.
- [11] Aria D, Guarnieri A M, Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(7): 1362-1376.
- [12] 闫鸿慧, 王岩飞, 于海锋, 等. 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基SAR成像方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 771-774.
(Yan H H, Wang Y F, Yu H F, et al. An imaging method of distributed small satellites bistatic SAR based on range distance compensation[J]. J of Electronics & Information Technology, 2005, 27(5): 771-774.)
- [13] Qiu X L, Hu D H, Ding C B. Focusing bistatic images use RDA based on hyperbolic approximating[C]. Chinese Institute of Electronics(CIE)' 06 Int Conf on Radar. Piscataway: IEEE Press, 2006: 1323-1326.
- [14] 邓国强, 唐敏. 误差函数Chebyshev级数的计算方法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016, 36(6): 508-512.
(Deng G Q, Tang M. Chebyshev series method for the error function[J]. J of Guilin University of Electronic Technology, 2016, 36(6): 508-512.)
- [15] 徐晓芳, 蔡静. 切比雪夫多项式零点插值与非线性方程求根[J]. 湖州师范学院学报, 2016, 38(2): 1-5.
(Xu X F, Cai J. Solving nonlinear equation by interpolation based on zero point of Chebyshev polynomial[J]. J of Huzhou University, 2016, 38(2): 1-5.)
- [16] Clemente C, Soraghan J J. Chebyshev expansion for accurate and efficient 2D PSP bistatic point target spectrum[C]. Sensor Signal Processing for Defence. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [17] 侯育星, 陈士超, 唐禹, 等. 基于切比雪夫多项式的新形式调频变标合成孔径雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2646-2651.
(Hou Y X, Chen S C, Tang Y, et al. A new form of chirp scaling algorithm based on Chebyshev polynomials in synthetic aperture radar imaging[J]. J of Electronics & Information Technology, 2014, 36(11): 2646-2651.)
- [18] 傅翀, 雷斌, 韩冰, 等. 基于切比雪夫多项式的HRWS星载SAR成像算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 40-46.
(Fu C, Lei B, Han B, et al. High resolution wide swath space-borne SAR imaging algorithm based on Chebyshev polynomials[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(8): 40-46.)

作者简介

陈麒(1988—), 男, 博士生, 从事双基地合成孔径雷达成像技术、合成孔径雷达电子干扰技术等研究, E-mail: chenqiyt@163.com;

李相平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事精确制导技术的研究, E-mail: lxp401@163.com;

祝明波(1971—), 男, 教授, 从事雷达成像技术等研究, E-mail: mb_zhu@126.com;

邹小海(1982—), 男, 讲师, 从事合成孔径雷达电子干扰技术的研究, E-mail: zouxiaohai2000@sina.com;

陆志毅(1995—), 男, 硕士生, 从事精确制导和目标探测技术的研究, E-mail: lzzydhcgd@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)