

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508115

基于拓展 Omega-K 算法的 OFDM 信号的合成孔径成像算法研究

邓贵文 李 晋 邢婉君 吴文彬

(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

摘要:在合成孔径雷达(SAR)与通信一体化应用场景中,SAR成像功能通常基于传统的距离多普勒算法(RDA)实现,然而该算法在较大斜视角的成像场景下会出现几何失真。针对该问题,提出了基于拓展 Omega-K 算法的 OFDM 信号的合成孔径成像方法,将传统的 Omega-K 算法应用到 OFDM 信号的合成孔径成像中,对基于 OFDM 信号的合成孔径成像的回波信号进行去循环前缀(CP)操作,在完成距离及方位向的二维脉冲压缩后,对斜视条件下所引起的相位偏移进行补偿。随后通过二维频域下的 Stolt 插值解除距离及方位向间的高阶相位耦合,并对多普勒频偏进行补偿,以实现最终的二维成像。最后,基于所提算法在正侧视以及较大斜视场景下开展了对单点目标和多点目标的成像仿真实验,通过对比仿真实验得出,相比于传统的基于 RDA 的 OFDM 信号的合成孔径成像算法,在正侧视场景下,基于 EWKA 成像算法方位向的 PSLR 从-12.32 dB 提升到-17.024 dB,提升约 38.1%,距离向性能相差不大。在斜视场景下,使用传统的基于 RDA 的成像算法对目标成像会出现散焦,不能实现很好的成像,而基于 EWKA 成像算法仍然能够实现很好的聚焦,对比仿真验证了基于 EWKA 的成像算法在正侧视以及较大斜视下的可行性和有效性。基于 EWKA 的 OFDM 信号的合成孔径成像算法能够在正侧视和斜视场景下实现良好的合成孔径成像,解决了传统的基于 RDA 的 OFDM 信号的合成孔径成像方法在较大斜视场景下成像出现散焦的问题,同时也提高了正侧视场景下方位向性能。

关键词: 距离多普勒算法;正交频分复用;拓展 Omega-K 算法;合成孔径成像;Stolt 插值

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5050

Research on synthetic aperture imaging algorithm for OFDM signals based on the extended Omega-K algorithm

Deng Guiwen Li Jin Xing Wanjun Wu Wenbin

(School of Information and Communication Engineering University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In the integrated application scenario of synthetic aperture radar (SAR) and communication, SAR imaging is typically implemented using the traditional range-Doppler algorithm (RDA). However, this method encounters geometric distortion in imaging scenarios with large squint angles. To address this issue, a synthetic aperture imaging method for OFDM signals based on the extended Omega-K algorithm (EWKA) is proposed. This method applies the traditional Omega-K algorithm to OFDM signal-based synthetic aperture imaging. After removing the cyclic prefix (CP) from the echo signals, two-dimensional pulse compression is performed in the range and azimuth directions. Phase shift compensation is applied to correct phase deviations caused by squint conditions. Subsequently, Stolt interpolation in the two-dimensional frequency domain is used to decouple higher-order phase coupling between the range and azimuth directions, and Doppler frequency offset compensation is performed to achieve the final two-dimensional imaging. Finally, simulation experiments on single-point and multi-point targets were conducted in both side-looking and large squint scenarios. Comparative simulation results show that, in side-looking scenarios, the EWKA-based imaging algorithm improves the azimuth PSLR from -12.32 dB to -17.024 dB, an enhancement of approximately 38.1%, while maintaining comparable range performance. In squint scenarios, the traditional RDA-based imaging algorithm suffers from defocusing and fails to achieve satisfactory imaging, whereas the EWKA-based algorithm maintains good focus. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the EWKA-based imaging

algorithm under both side-looking and large squint conditions. The proposed EWKA-based OFDM signal synthetic aperture imaging algorithm not only resolves the defocusing issue encountered in traditional RDA-based methods in large squint scenarios but also enhances azimuth performance in side-looking scenarios, significantly expanding the applicability of OFDM signal-based synthetic aperture imaging.

Keywords: distance doppler algorithm; orthogonal frequency division multiplexing; extended omega-K algorithm; synthetic aperture imaging; stolt interpolation

0 引言

合成孔径雷达通过天线与目标间的相对运动,形成一个比实际天线更长的虚拟天线,极大的提高了方位分辨率,可实现全天时、全天候的区域检测成像。合成孔径雷达技术是雷达技术史上的一次革命,实现了一维高分辨距离探测到二维高分辨成像的跨越^[1]。高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像可以实现对目标特征的提取,在目标探测和识别等方面具有重要的意义,广泛地应用于地球探测、军事侦察、气象监测和灾害预警等领域。

随着电子信息技术的快速发展,自动驾驶^[2-3]、第五代移动通信^[4]和第六代移动通信领域中无线平台面临的需求增多^[5],需要同时装备雷达通信和传感器等设备^[6]。此外,随着无线通信技术的发展,雷达工作频段与无线通信频段越来越接近,为了避免雷达与通信系统之间的相互干扰,充分利用频谱资源与硬件资源,实现雷达与通信频谱资源共享^[7],雷达通信一体化技术应运而生^[8],在学界和工业界得到了高度的关注。合成孔径成像作为雷达的重要应用领域,对合成孔径成像与通信一体化进行研究具有十分重要的意义。

在通信系统中,正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)利用多个正交的子载波来进行数据传输,并结合 CP(cyclic prefix)抵抗通信过程中出现的多径效应,不仅能实现信息的快速传输,还能提高频谱资源利用率。在文献^[9]中,对 OFDM 信号的模糊性能^[10]进行了分析,OFDM 信号所具有的图钉状模糊函数证明了其在成像方面具有良好的潜力。2006 年,OFDM 信号被首次应用到 SAR 成像领域^[11]。因此,在雷达通信一体化中,OFDM 信号具有独特优势,可以同时实现探测与通信信息传输的功能,是实现雷达通信一体化的候选信号之一^[12]。

现有的利用 OFDM 信号进行 SAR 成像的方法一般是基于传统的距离-多普勒算法(range-Doppler algorithm, RDA)实现的^[13],文献[14]提出了一种结合 CP 的 OFDM 信号的合成孔径成像算法,将成像的回波数据视为发射序列与雷达散射截面(radar cross section, RCS)卷积的形式,利用回波的频域数据与发射数据点除的思想实现距离压缩。文献[15]提出了一种结合生成对抗(GAIN)

网络的 OFDM 信号的合成孔径成像算法,以解决当“0”出现在 OFDM 频域向量中时,文献[14]中所述算法难以完成距离压缩的问题。现有的 RDA 算法通过插值操作在距离多普勒域实现距离徙动矫正(range cell migration correction, RCMC),但 RDA 算法在较大斜视角的情况下会出现几何畸变,一般通过二次距离压缩来改善成像效果。因而,直接对 OFDM 信号使用基于 RDA 的合成孔径算法,会因其固有的缺陷限制使用场景范围。

目前,在正侧视和斜视角下均具有良好成像效果的 Omega-K 算法在基于 OFDM 信号的合成孔径成像领域很少使用。传统的 Omega-K 算法往往是结合线性调频(linear frequency modulated, LFM)信号的特性来实现合成孔径雷达成像,而在雷达通信一体化应用中所使用的 OFDM 信号与 LFM 信号差异很大,因而 Omega-K 算法不能直接应用到基于 OFDM 信号的合成孔径成像中,需要设计基于 OFDM 信号的参考函数以及相位补偿函数以满足基于 OFDM 信号的合成孔径成像要求。本文提出了基于扩展波数域算法(extended wavenumber Omega-K algorithm, EWKA)的 OFDM 信号的合成孔径成像方法,填补了 OFDM 信号的合成孔径成像算法的空白。该方法首先对基于 OFDM 信号的 SAR 回波信号进行去 CP 操作,将其与距离向参考信号在距离频域相乘,然后,在二维频域与方位向参考信号相乘,并对斜视条件下所引起的相位偏移进行补偿,随后在二维频域通过 Stolt 插值解除距离向与方位向的高阶相位耦合,并对多普勒频率偏移进行补偿,以实现最终的二维成像。

1 信号模型

在雷达通信一体化系统中,常用携带通信信息的 OFDM 信号作为发射信号^[16],同时实现通信功能与探测功能,因而本文的 Omega-K 算法信号模型不再采用传统的 LFM 信号,而是基于 OFDM 信号进行实现。OFDM 信号一般表示为:

$$s(\tau) = w_r(\tau) \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \exp(j2\pi f_k \tau) \quad (1)$$

其中, w_r 为距离窗函数, τ 为快时间变量, $-\frac{T}{2} \leq \tau \leq \frac{T}{2} + T_{\text{GI}}$, T_{GI} 为保护间隔, $s(\tau)$ 在 $(-\frac{T}{2}, -\frac{T}{2} + T_{\text{GI}})$ 中

的数据为循环前缀,其与 $(\frac{T}{2}, \frac{T}{2} + T_{GI})$ 中的数据相同, N 为 OFDM 信号子载波数目, $0 \leq k \leq N - 1, S_k$ 为第 k 个子载波所携带的信息, $\Delta f = \frac{1}{T}, T$ 为雷达脉冲宽度, f_c 为中心载波频率, $f_k = f_c + k\Delta f$ 。

SAR 成像的几何场景如图 1 所示,雷达沿着与 Y 轴平行的轨迹飞行,假设高度为 H ,斜视角为 θ 。设飞机的瞬时坐标为 $(0, Y(\eta), H)$,其中, η 为雷达在方位向的慢时间, $Y(\eta)$ 为 η 时刻雷达在距离向的距离, H 为雷达飞行的高度。设点目标 P 距 X 轴的最短距离为 X_0 ,则目标离雷达的最短距离为 R_0 :

$$R_0 = \sqrt{H^2 + X_0^2} \quad (2)$$

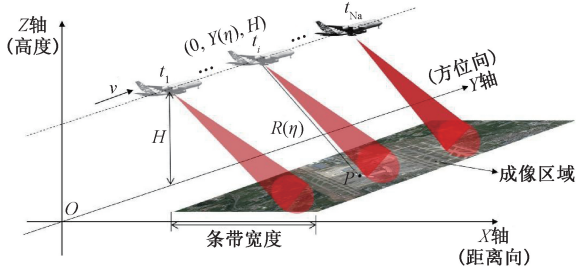


图 1 SAR 成像几何场景

Fig. 1 Geometric scenarios of SAR imaging

基于 OFDM 信号的合成孔径成像的回波信号 $s_i(\tau, \eta)$ 的一般表示为:

$$s_i(\tau, \eta) = g_m w_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta_c) \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \exp \left(j2\pi f_k \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right) \right) \quad (3)$$

其中, $R(\eta) = \sqrt{(v\eta)^2 + R_0^2}, c$ 为光速, v 为雷达平台的运动速度, η 为慢时间变量, w_a 为方位包络窗函数, η_c 为波束中心偏离时间, $\eta_c = \frac{R_0 \tan \theta}{v}, g_m$ 为目标反射系数。

在斜视条件下,由于多普勒频偏^[17]的影响,多普勒频率^[18]中心 f_{η_c} 可以表示为:

$$f_{\eta_c} = \frac{2v \sin \theta}{\lambda} \quad (4)$$

去掉载频 f_c 后,式(3)可以表示为:

$$s_i(\tau, \eta) = w_a(\eta - \eta_c) w_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right)$$

$$\frac{g_m}{\sqrt{N}} \exp \left(-j4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c} \right) \sum_{k=0}^{N-1} S_k \exp \left(j2\pi k \Delta f \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right) \right) \quad (5)$$

2 基于 EWKA 的 OFDM 信号的合成孔径成像算法

提出了基于 EWKA 的 OFDM 信号的合成孔径成像方法,首先对成像回波信号去 CP,再将其与距离向参考信号在距离频域方位时域相乘,由于信号模型发生了变化,因而本文所提算法中的距离向参考函数相较于传统 Omega-K 算法也发生了改变。

然后,将上一步骤中的处理结果在二维频域与方位向参考信号相乘,并对斜视条件下所引起的相位偏移进行补偿,随后在二维频域通过 Stolt 插值解除距离向与方位向的高阶耦合相位,并对多普勒频率偏移进行补偿,以实现最终的二维成像。最后,对该成像方法进行仿真验证以及误差分析。

将 Omega-K 算法应用于基于 OFDM 信号的合成孔径成像,相应的算法流程如图 2 所示。

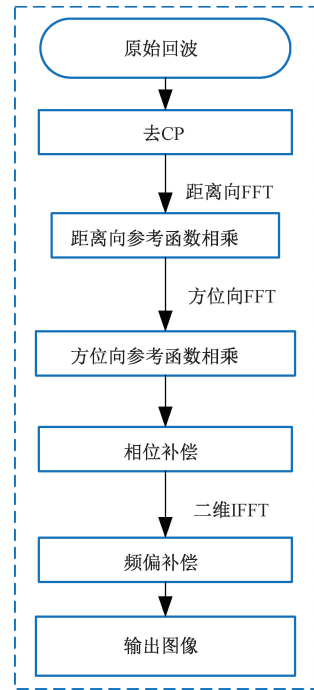


图 2 基于 EWKA 成像算法流程

Fig. 2 The workflow of the EWKA imaging algorithm

2.1 距离向参考函数相乘

首先对回波数据进行去 CP 操作,然后利用匹配滤波思想^[19],对基于 OFDM 信号的合成孔径成像的回波信号进行距离压缩,区别于传统的 Omega-K 算法,本文利用 OFDM 信号作为距离向参考信号,设参考距离为 R_0 ,则距离向参考信号为 $s_{i0}(\tau)$ 如式(6)所示。

$$s_{lo}(\tau) = s\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right) =$$

$$w_r\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right) \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} S_n \exp\left(j2\pi f_n \left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)\right) \quad (6)$$

其中, $-\frac{T}{2} \leq \tau \leq \frac{T}{2}$, $0 \leq n \leq N-1$, S_n 为第 n 个子

载波所携带的信息。对式(5)中的 $s_i(\tau, \eta)$ 进行距离向傅里叶变换, 得到 $S_i(f_\tau, \eta)$ 为:

$$S_i(f_\tau, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_i(\tau, \eta) \exp(-j2\pi f_\tau \tau) d\tau =$$

$$T \frac{g_m}{\sqrt{N}} W_r(f_\tau) \exp\left(-j4\pi f_\tau \frac{R(\eta)}{c}\right) \cdot$$

$$w_a(\eta - \eta_c) \exp\left(-j4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c}\right) \cdot$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} S_k \text{sinc}(\pi(k\Delta f - f_\tau)T) \quad (7)$$

其中, W_r 为距离窗函数的频域表达形式, f_τ 为快时间频域变量, sinc 为辛格函数。

对式(6)中的雷达参考信号 $s_{lo}(\tau)$ 进行距离向傅里叶变换得到 $S_{lo}(f_\tau)$:

$$S_{lo}(f_\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{lo}(\tau) \exp(-j2\pi f_\tau \tau) d\tau =$$

$$W_r(f_\tau) \exp\left(-j4\pi f_\tau \frac{R(\eta)}{c}\right) T \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} S_n \text{sinc}(\pi(n\Delta f - f_\tau)T) \quad (8)$$

将式(7)与式(8)共轭相乘即可得到距离压缩频域信号 $S_r(f_\tau, \eta)$, $S_i(f_\tau, \eta)$ 为:

$$S_r(f_\tau, \eta) = T^2 \frac{g_m}{N} W_r(f_\tau) w_a(\eta - \eta_c) \cdot$$

$$\exp\left(-j4\pi f_\tau \frac{(R(\eta) - R_0)}{c}\right) \exp\left(-j4\pi f_c \frac{R(\eta)}{c}\right) \cdot$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} S_k \text{sinc}(\pi(k\Delta f - f_\tau)T) \sum_{n=0}^{N-1} S_n \text{sinc}(\pi(n\Delta f - f_\tau)T) \quad (9)$$

2.2 方位参考函数相乘以及相位补偿

对式(9)进行方位向傅里叶变换, 得到二维频域信号 $S_{ra}(f_\tau, f_\eta)$ 为:

$$S_{ra}(f_\tau, f_\eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_r(f_\tau, \eta) \exp(-j2\pi f_\eta \eta) d\eta =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A_{\text{Range}} w_a(\eta - \eta_c) \exp(j\theta(\eta)) d\eta \quad (10)$$

其中:

$$\theta(\eta) = 4\pi f_\tau \frac{R_0}{c} - 2\pi f_\eta \eta - 4\pi(f_\tau + f_c) \frac{R(\eta)}{c} \quad (11)$$

$$A_{\text{Range}} = T^2 \frac{g_m}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \text{sinc}(\pi(k\Delta f - f_\tau)T) \cdot$$

$$W_r(f_\tau) \sum_{n=0}^{N-1} S_n \text{sinc}(\pi(n\Delta f - f_\tau)T) \quad (12)$$

利用驻定相位原理, 对(11)中 $\theta(\eta)$ 求导, 可得

$$\frac{d\theta(\eta)}{d\eta} = -\frac{4\pi(f_\tau + f_c)v^2\eta}{c\sqrt{(v\eta)^2 + R_0^2}} - 2\pi f_\eta = 0 \quad (13)$$

$$f_\eta = -\frac{2(f_\tau + f_c)v^2\eta}{c\sqrt{(v\eta)^2 + R_0^2}} \quad (14)$$

$$\eta = -\frac{cf_\eta R_0}{2(f_\tau + f_c)v^2 \sqrt{1 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4v^2(f_\tau + f_c)^2}}} \quad (15)$$

则式(10)可以如下式所示:

$$S_{ra}(f_\tau, f_\eta) = A_{\text{Range}} W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{c} \sqrt{(f_c + f_\tau)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4v^2}}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_\eta \eta_c) \exp\left(j4\pi f_\tau \frac{R_0}{c}\right) \quad (16)$$

其中, f_η 为慢时间频域变量, W_a 为方位包络窗函数的频域表达形式。利用匹配滤波的思想进行方位向压缩, 则方位向参考函数 $H_a(f_\tau, f_\eta)$ 为:

$$H_a(f_\tau, f_\eta) = \exp\left(j\frac{4\pi R_{\text{ref}}}{c} \sqrt{(f_c + f_\tau)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4v^2}}\right) \quad (17)$$

式(16)与式(17)相乘后得到的二维频域信号 $S_b(f_\tau, f_\eta)$ 为:

$$S_b(f_\tau, f_\eta) = A_{\text{Range}} W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \exp(j\theta_1(\eta)) \cdot \exp(j4\pi f_\tau \frac{R_0}{c}) \exp(-j2\pi f_\eta \eta_c) \quad (18)$$

$$\theta_1(\eta) = -4\pi \frac{R_0 - R_{\text{ref}}}{c} \sqrt{(f_c + f_\tau)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4v^2}} \quad (19)$$

在斜视条件下, 由于场景中心斜距 R_c 与中心目标距离雷达的最短距离 R_0 不相等, 若利用上述方法对 OFDM 信号的合成孔径成像回波数据进行处理, 会使场景中心目标在距离向发生偏移, 在方位向上, 会产生波束中心偏移。因此为将场景中心目标搬回成像场景中心, 需进行相位补偿。相位补偿函数 $H_p(f_\tau, f_\eta)$ 为:

$$H_p(f_\tau, f_\eta) = \exp\left(j\frac{4\pi f_\tau R_0}{c} \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)\right) \cdot \exp(j2\pi f_\eta \eta_c) \quad (20)$$

对式(18)利用式(20)进行相位补偿, 相位补偿后的二维频域信号 $S_t(f_\tau, f_\eta)$ 为:

$$S_t(f_\tau, f_\eta) = A_{\text{Range}} W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \cdot \exp(j\theta_1(\eta)) \exp\left(j4\pi f_\tau \frac{R_0}{c \cos(\theta)}\right) \quad (21)$$

2.3 Stolt 插值以及频偏补偿

利用 Stolt 插值对 $S_b(f_\tau, f_\eta)$ 的距离向及方位向的高

阶耦合相位进行如下校正:

$$\sqrt{(f_c + f_\tau)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4v^2}} \rightarrow f_c + f_\tau' \quad (22)$$

则 $S_l(f_\tau', f_\eta)$ 的表达式为:

$$S_l(f_\tau', f_\eta) = A_{\text{Range}} W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \cdot$$

$$\exp(j\theta_2(\eta)) \exp(j4\pi f_\tau' \frac{R_0}{c \cos(\theta)}) \quad (23)$$

$$\theta_2(\eta) = -j4\pi \frac{R_0 - R_{\text{ref}}}{c} (f_c + f_\tau') \quad (24)$$

其中, f_τ' 为 Stolt 插值后的快时间频域变量。

然后对式(23)进行二维傅里叶逆变换,式(23)中, $S_l(f_\tau', f_\eta)$ 中 S_k 采用二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)编码方式。设 A_c 为:

$$A_c = \sum_{k=0}^{N-1} S_k \text{sinc}(\pi(k\Delta f - f_\tau)T) \quad (25)$$

式(25)可以近似为常数^[20],则二维傅里叶变换后的结果 $s_{\text{out}}(\tau', \eta)$ 如式(26)所示。

其中, τ' 为 Stolt 插值后的快时间变量。式(26)中, 由于斜视角的存在,产生的多普频偏 f_{η_c} 会对方位向相位产生调制因此对式(26)在时域上进行相位补偿,相位补偿函数为 $s(\eta)$ 如式(27)所示。

$$s_{\text{out}}(\tau', \eta) \approx T^2 \frac{g_m}{N} \text{sinc}(\eta)$$

$$\text{sinc}\left(\tau' - \frac{2\left(R_0\left(1 - \frac{1}{\cos(\theta)}\right) - R_{\text{ref}}\right)}{c}\right) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}(N-1)\Delta f\left(\tau' - \frac{2(R_0 - R_{\text{ref}})}{c}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\Delta f\left(\tau' - \frac{2(R_0 - R_{\text{ref}})}{c}\right)\right)}\right)^2 \cdot \exp\left(j2\pi f_{\eta_c} \eta - j4\pi f_c \frac{R_0 - R_{\text{ref}}}{c}\right) \quad (26)$$

$$s(\eta) = \exp(-j2\pi f_{\eta_c} \eta) \quad (27)$$

相位补偿后式(26)中的 $s_{\text{out}}(\tau', \eta)$ 如式(28)所示。

$$s_{\text{out}}(\tau', \eta) \approx \text{sinc}(\eta) \exp\left(-j4\pi f_c \frac{R_0 - R_{\text{ref}}}{c}\right) \cdot$$

$$\frac{g_m}{N} T^2 \text{sinc}\left(\tau' - \frac{2\left(R_0\left(1 - \frac{1}{\cos(\theta)}\right) - R_{\text{ref}}\right)}{c}\right) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}(N-1)\Delta f\left(\tau' - \frac{2(R_0 - R_{\text{ref}})}{c}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\Delta f\left(\tau' - \frac{2(R_0 - R_{\text{ref}})}{c}\right)\right)}\right)^2 \quad (28)$$

成像回波数据在经过上述成像步骤处理后,距离及

方位向包络呈 sinc 函数形式,在正侧视及较大斜视条件下实现了对目标良好聚焦。

3 仿真实验

通过仿真实验证明上述推导的正确性以及有效性。成像模式采用条带模式,成像场景如图 1 所示,仿真参数如表 1 所示,雷达平台运动轨迹以及点目标 P 的位置如图 1 所示,P 点位于场景中心。

表 1 EWKA 仿真参数

参数	数值
载波频率	16 GHz
脉冲宽度	2×10^{-6} s
子载波数目	512
带宽	256 MHz
雷达平台运动速度	20 m/s
光速	3×10^8 m/s
中心斜距	1 200 m
距离向采样率	512 MHz
方位向合成孔径长度	11.25 m
真实天线孔径长度	2 m
脉冲重复频率	100 Hz

在正侧视条件下对点目标 P 的 OFDM 信号的 SAR 成像回波数据利用 2.1 节所述方法处理后,距离压缩后的结果如图 3 所示,距离向能量得到了重新聚焦,实现了有效压缩,在本文所设的参数条件下,距离徙动量较小,因而压缩后的结果近似地与方位轴平行,完成第 3 节所述步骤后,得到成像结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,成像回波数据经过 2.1 节所提算法处理后可以聚焦成一个点,对传统 RDA 算法以及本节所提算法处理后的成像结果进行距离及方位向的切片分析,相应的结果如图 5 和 6 所示。其中,图 5 为点目标方位向切片,图 6 为点目标距离向切片。对点目标 P 的峰值旁瓣比(peak side lobe ratio, PSLR)与积分旁瓣比(integrated side lobe ratio, ISLR)进行计算,所得结果如表 2 所示,可以看出在正侧视条件下,本文所提算法对点目标具有良好的成像性能,且相比于传统的 RDA,方位向性能有明显提升,方位向 PSLR 从 -12.32 dB 提升到 -17.024 dB,提升约 38.1%,距离向性能相差不大。在此仿真参数下,方位向的理论分辨率为:

表 2 正侧视点目标 PSLR 与 ISLR

Table 2 PSLR and ISLR of point targets in forward- and side-looking modes (dB)			
		PSLR	ISLR
EWKA	距离向	-13.460 7	-9.814 3
	方位向	-17.024 4	-11.746 4
RDA	距离向	-13.362 9	-9.822 5
	方位向	-12.327 0	-9.082 9

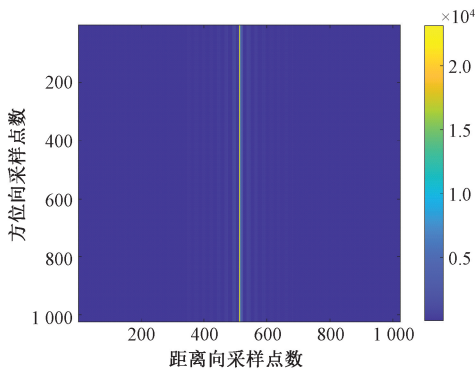


图 3 正侧视距离压缩后时域信号幅度

Fig. 3 Amplitude diagram of time-domain signals after range compression in forward- and side-looking modes

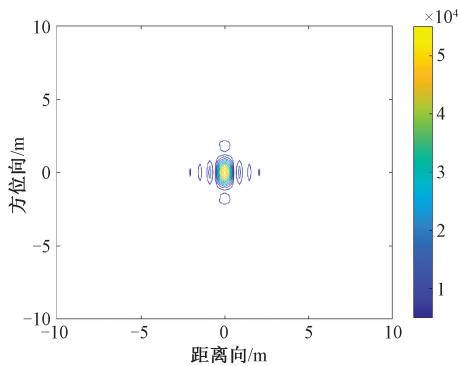


图 4 正侧视单点目标成像

Fig. 4 Imaging of a single point target in forward- and side-looking modes

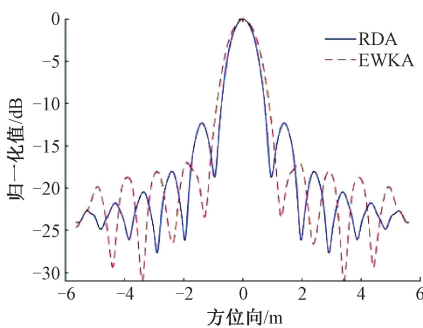


图 5 正侧视单点目标方位向切片

Fig. 5 Azimuthal slice of a single point target in forward- and side-looking modes

$$\rho_a = \frac{L_a}{2} = 1 \text{ m} \quad (29)$$

其中, L_a 为真实天线孔径长度。距离向的理论分辨率为:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} = 0.5859 \text{ m} \quad (30)$$

其中, c 为光速, B 为带宽。利用“3 dB 带宽”方法对点目标 P 的距离向和方位向分辨率进行计算, 结果如表 3 所示, 距离向和方位向分辨率接近理论分辨率, 仿真验证了本文所提算法在正侧视场景下优越的成像性能。

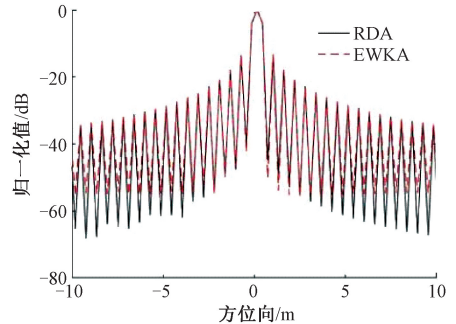


图 6 正侧视单点目标距离向切片

Fig. 6 Range slice of a single point target in forward- and side-looking modes

表 3 正侧视点目标分辨率

Table 3 Broadside-looking point target resolution (m)

		分辨率
EWKA	距离向	0.5859
	方位向	1.0547

表 4 斜视点目标 PSLR 与 ISLR

Table 4 PSLR and ISLR of point targets in squint-looking mode (dB)

		PSLR	ISLR
EWKA	距离向	-13.2722	-9.9677
	方位向	-13.3482	-11.8123
RDA	距离向	-16.6804	-16.8819
	方位向	-7.7011	-5.995

假设多点目标的分布情况如图 7 所示, 9 个点目标在场景中心均匀间隔分布, 距离向间隔为 2 m, 方位向间隔为 2 m。对其在正侧视条件下的成像回波数据进行上述步骤的处理, 得到的多点目标成像结果如图 8 所示, 多点目标经成像处理后均得到了很好的聚焦, 且位置与成像前保持一致, 仿真证明本文所述算法在正侧视条件下可以实现良好的二维成像性能。

在斜视角为 25° 时, 用本文所提算法对 P 点生成的回波数据进行处理后, 距离压缩结果如图 9 所示。由于斜视角的存在, 其与正侧视下的距离压缩结果(图 3)相比, 发生了一定的倾斜, 经 2.1 节所述方法处理后, 成像结果如图 10 所示, 在标准的正侧视成像中, 距离旁瓣和方位旁瓣分别与距离向和方位向正交排列。然而, 在图 10 中, 由于斜视角的存在, 导致距离旁瓣和方位旁瓣不再保持原来的排列方向, 发生了一定的倾斜, 但经本文

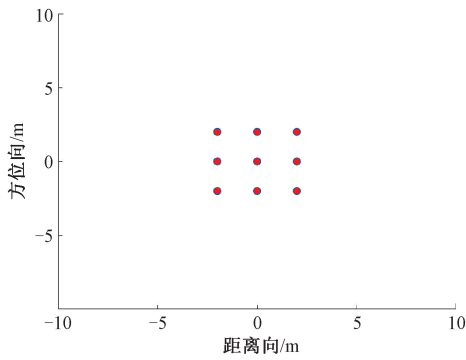


图 7 多点目标分布

Fig. 7 Distribution diagram of multiple point targets

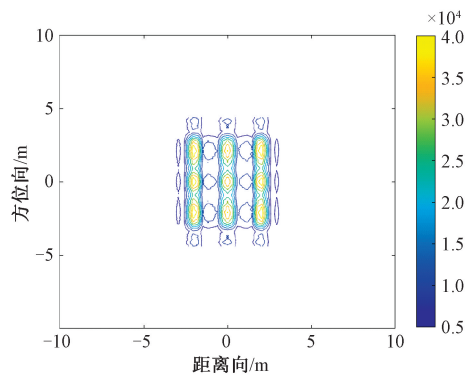


图 8 正侧视多点目标成像

Fig. 8 imaging of multiple point targets in forward- and side-looking modes

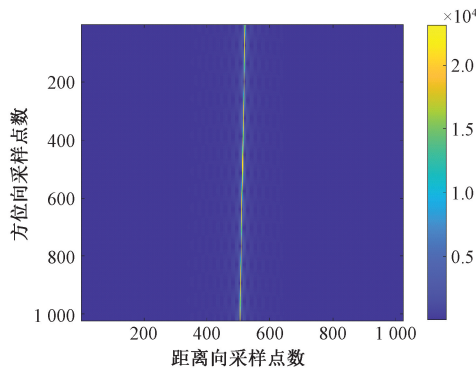


图 9 斜视距离压缩后时域信号幅度图

Fig. 9 Amplitude diagram of time-domain signals after range compression in oblique view mode

所提算法处理后,从表 4 可以看出,仍具有很好的聚焦效果。图 11 为经传统的 RDA 算法处理后的成像结果,其在斜视角为 25°条件下,发生了几何畸变,从表 4 可以看出,传统的基于 RDA 的 OFDM 成像算法在方位向上 PSLR 下降到 -7.701 1 dB,方位向出现了散焦,因而传统

RDA 算法不适合在斜视条件下进行基于 OFDM 信号的合成孔径成像。

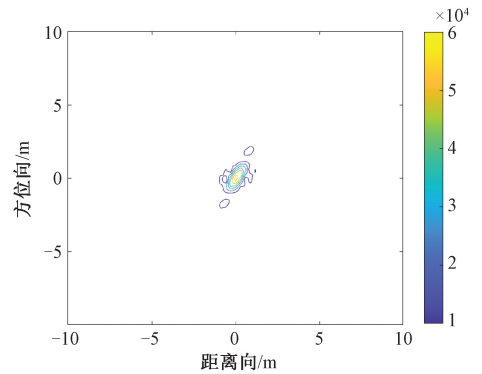


图 10 斜视 EWKA 单点目标成像

Fig. 10 Imaging of a single point target in oblique view mode

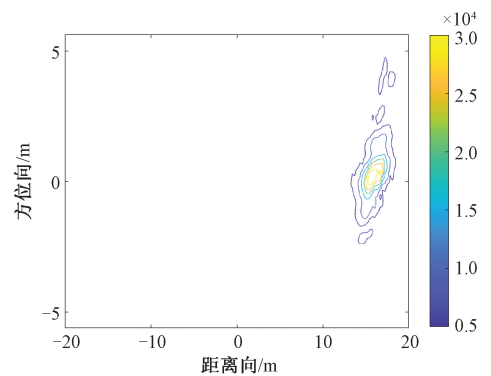


图 11 基于 RDA 的斜视成像

Fig. 11 Strabismus imaging based on RDA

在斜视情况下,场景中心多点目标的分布情况如图 7 所示,图 12 为多点目标在斜视角为 25°时的成像结果,图 12 中多点目标均实现了很好的聚焦,且位置与成像前保持一致,仿真结果证明在较大斜视情况下,本文所提方法仍然具有良好的聚焦效果。

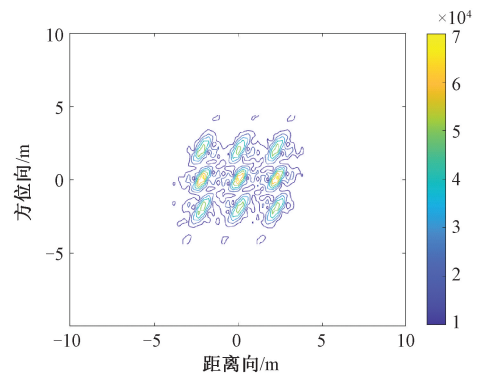


图 12 基于 EWKA 的斜视多点目标成像

Fig. 12 Imaging of multiple point targets in oblique view mode

4 结 论

本文提出了基于 EWKA 的 OFDM 信号的合成孔径成像算法。其中,基于 EWKA 的 OFDM 信号的合成孔径成像方法是将拓展后的 Omega-K 算法应用到基于 OFDM 信号的合成孔径成像领域,对基于 OFDM 信号的合成孔径成像回波进行建模分析,并对去掉循环前缀后的回波数据进行成像处理,在距离向和方位向上与相应的参考函数相乘,随后对斜视条件下引起的误差进行相位补偿,最后通过 Stolt 插值在二维频域解除距离向及方位间的高阶相位耦合,并对多普勒频率偏移进行补偿,实现基于 OFDM 信号的合成孔径成像。最后通过对比仿真验证了本文所提方法在基于 OFDM 信号的合成孔径成像领域对点目标具有很好的成像性能,仿真验证了本文所述的算法可行性和有效性,为较大斜视角的 OFDM 信号的合成孔径成像技术提供了理论基础,扩大了基于 OFDM 信号的合成孔径成像使用场景范围,为基于 OFDM 信号的合成孔径成像提供新思路。

参考文献

- [1] 丁赤飏,仇晓兰,吴一戎. 全息合成孔径雷达的概念、体制和方法[J]. 雷达学报,2020,9(3):399-408.
DING CH B, QIU X L, WU Y R. Concepts, systems and methods of holographic synthetic aperture radar[J]. Journal of Radars, 2020, 9(3): 399-408.
- [2] 戴金洲,杜磊,沙硕,等. 环境感知毫米波雷达抗干扰算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(9):126-132.
DAI J ZH, DU L, SHA SH, et al. Anti-interference algorithm of environment-aware millimeter wave radar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 126-132.
- [3] 杨建华,赵轩,郭全民,等. 基于路侧激光雷达的障碍物目标检测方法[J]. 国外电子测量技术,2023,42(1):13-19.
YANG J H, ZHAO X, GUO Q M, et al. Obstacle target detection method based on roadside LiDAR[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 13-19.
- [4] 王舒玉,张海辉,方学立,等. 雷达通信一体化 5G 信号设计方法[J]. 信号处理,2023,39(6):996-1005.
WANG SH Y, ZHANG H H, FANG X L, et al. 5G Signal Design Method for Radar and Communication Integration[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(6): 996-1005.
- [5] 刘永军,廖桂生,唐皓,等. FSK-FMCW 雷达通信一体化信号设计与处理方法研究[J]. 信号处理,2022,38(11):2265-2275.
LIU Y J, LIAO G SH, TANG H, et al. Integrated FSK-FMCW radar and communication signal design and processing method [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(11): 2265-2275.
- [6] 黄驿轩. 通信雷达一体化波形设计及信号处理[D]. 成都:电子科技大学,2022.
HUANG Y X. Design and signal processing of integrated communication-radar waveforms [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [7] 刘凡,袁伟杰,原进宏,等. 雷达通信频谱共享及一体化:综述与展望[J]. 雷达学报,2021,10(3):467-484.
LIU F, YUAN W J, YUAN J H, et al. Spectrum sharing and integration of radar and communication: review and prospect [J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 467-484.
- [8] 赵珊珊,杜鸿飞,刘子威,等. OTFS 雷达通信一体化复用波形设计[J]. 信号处理,2024,40(7):1239-1248.
ZHAO SH SH, DU H F, LIU Z W, et al. OTFS radar communication integrated multiplexed waveform design[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(7): 1239-1248.
- [9] 李琬璐. 雷达通信一体化波形优化设计研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
LI W L. Research on optimal design of integrated radar-communication waveforms [D]. Xi' an: Xidian University, 2022.
- [10] 普运伟,陈新杰,余永鹏,等. 基于模糊函数多维结构度量特征的雷达辐射源信号流在线分选[J]. 仪器仪表学报,2023,44(8):277-288.
PU Y W, CHEN X J, YU Y P, et al. Online sorting of radar emitter signal streams based on multidimensional structural measurement features of ambiguity function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 277-288.
- [11] GARMATYUK D S. Simulated imaging performance of UWB SAR based on OFDM [C]. 2006 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Waltham, 2006: 237-242.
- [12] 刘永军. 基于 OFDM 的雷达通信一体化设计方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
LIU Y J. Research on OFDM-based integrated radar-communication design methods [D]. Xi' an: Xidian

University, 2019.

- [13] Hossain M A, Elshafiey I, Alkanhal M A. High resolution UWB SAR based on OFDM architecture [C]. 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2011: 1-4.
- [14] ZHANG T X, XIA X G. OFDM synthetic aperture radar imaging with sufficient cyclic pre-fix [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53(1): 394-404.
- [15] XING W J, MIN R, LI J, et al. An improved CP-OFDM SAR imaging algorithm combined with GAIN [C]. IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2024: 6779-6782.
- [16] 喻祥. OFDM SAR 信号分析与成像技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2016.
YU X. Research on OFDM SAR signal analysis and imaging technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [17] ELYOUNCHA A, ERIKSSON L E B, ROMEISER R. Correlation between the backscatter and doppler shift modulations in SAR images and its effect on the doppler centroid Estimation [C]. IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2023: 3962-3965.
- [18] 尚智宇,唐波,张龙斌,等. 海上风电机雷达回波及其微多普勒特征 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(11): 49-56.
SHANG ZH Y, TANG B, ZHANG L B, et al. Radar echoes and micro-doppler characteristics of offshore wind turbines [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11): 49-56.
- [19] 张天贤,夏香根. OFDM SAR 成像方法综述 [J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 243-258.
ZHANG T X, XIA X G. An overview of OFDM SAR imaging methods [J]. Journal of Radars, 2020, 9(2): 243-258.
- [20] 范崇伟,黄晓涛. 基于编码项补偿的 OFDM 信号 SAR 成像 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1833-1839.
FAN CH Y, HUANG X T. The imaging of SAR based on OFDM waveforms signal with the compensation of coding term [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 1833-1839.

作者简介



邓贵文, 2023 年于吉林大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士生, 主要研究方向为雷达通信一体化。

E-mail: 992991763@qq.com

Deng Guiwen received his B. Sc. degree from JiLin University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include integration of radar and communication.



李晋(通信作者), 2003 年于浙江大学获得学士学位, 2006 年于电子科技大学获得硕士学位, 2010 年于电子科技大学获得博士学位, 现为电子科技大学研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达技术、雷达系统理论、雷达信号处理等。

E-mail: lijinqin@uestc.edu.cn

Li Jin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 2003, M. Sc. degree from the University of Electronic Science and Technology of China in 2006, Ph. D. degree from the University of Electronic Science and Technology of China in 2010. Now he is a professor at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include Terahertz radar technology, radar system theory, radar signal processing.



邢婉君, 2021 年毕业于合肥工业大学, 目前为电子科技大学博士生, 研究方向为 SAR 成像与通信一体化、一体化系统波形设计。

E-mail: xwanjun@std.uestc.edu.cn

Xing Wanjun graduated from Hefei University of Technology in 2021 and is currently a Ph. D. candidate at the University of Electronic Science and Technology of China. Her research interests focus on integrated SAR imaging and communication, as well as waveform design of integrated systems.



吴文彬, 2023 年于河北大学获得学士学位, 现为电子科技大学学生, 主要研究方向为太赫兹高分辨率合成孔径雷达成像。

E-mail: uestcw@163.com

Wu Wenbin received his B. Sc. degree from HeBei University in 2023, Now he is a student at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include Terahertz high-resolution synthetic aperture radar imaging.