

基于二维尺度维纳后滤波器的 SFCW MIMO 雷达 成像伪影抑制方法

蒲 涛, 童宁宁

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 为了抑制传统后向投影成像方法产生的伪影,提出了一种基于二维尺度维纳后滤波的伪影抑制方法。首先,针对步进频连续波 MIMO 雷达,将频域 BP 成像方法建模为一个二维无失真波束形成器;然后,利用带尺度因子的二维维纳后滤波器使波束形成结果的均方误差最小;最后,分析了尺度因子对单目标和多目标成像性能的影响。现有基于相干因子(CF)的伪影抑制方法仅是所提方法具有不同尺度因子时的特例。通过选择适当的尺度因子,该方法可以克服 CF 方法的一些局限性。仿真结果表明,所提方法在距离向和方位向都能有效地抑制成像过程产生的伪影。

关键词 伪影抑制;MIMO 雷达;步进频连续波;维纳后滤波器

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.05.015

中图分类号 TP391 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)05-0094-05

Artifact Suppression for SFCW MIMO Radar Imaging Based on 2D Scaled Wiener Post-Filter

PU Tao, TONG Ningning

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract In order to suppress the artifacts in the reconstructed target image obtained by the conventional back projection methods, a 2D scaled Wiener post-filter based method is proposed in this paper. Firstly, for a stepped-frequency continuous-wave (SFCW) radar system, the frequency domain BP (FDBP) imaging method is formulated as a 2D distortion-less beamformer. Then, the 2D Wiener post-filter with a scaling factor is adopted to minimize the mean square error of the beamforming result. At last, the influence of the scaling factor on the imaging performance for both single target and multiple targets is analyzed. Coherence factor (CF) based methods, which have been used for artifact suppression, can be interpreted as the special cases of the proposed method with different scaling factors. By selecting a proper scaling factor, the limitations of CF based methods can be overcome. Simulation results demonstrate that, both in range direction and azimuth direction, the artifacts in the reconstructed target image can be effectively suppressed by the proposed method.

Key words artifacts suppression; MIMO radar; SFCW; winer post-filter

收稿日期: 2019-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61701526,61901511,62001507);陕西省自然科学基金(2019JM-322)

作者简介: 蒲涛(1995—),男,四川广元人,硕士生,主要从事目标探测与识别研究。E-mail:601010361@qq.com

引用格式: 蒲涛,童宁宁. 基于二维尺度维纳后滤波器的 SFCW MIMO 雷达成像伪影抑制方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(5): 94-98. PU Tao, TONG Ningning. Artifact Suppression for SFCW MIMO Radar Imaging Based on 2D Scaled Wiener Post-Filter[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(5): 94-98.

基于步进频连续波 (Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW) 的 MIMO 雷达在多个领域中均有广泛的应用,如穿墙人体检测、位移监测和地下物质检测等^[1-3]。其中,二维成像是实现所需功能的重要信号处理步骤之一。传统上,通常使用后向投影方法 (Back Projection, BP) 来进行成像^[4]。然而,BP 方法重构的目标图像存在许多伪影,给后续的目标检测或者干涉测量等工作带来了不利影响。

现有伪影抑制方法有很多,如窗函数法^[3]、互相关法^[5]和 CLEAN 法等^[6]。近年来,基于相干因子 (Coherence Factor, CF) 及其变体 (如广义 CF、符号 CF 和相位 CF 等) 的伪影抑制方法得到了广泛的研究^[7-9]。CF 的定义为给定信号的相干功率与其非相干功率的比值。文献^[10]证明了基于 CF 的伪影抑制方法等价于 DAS 无失真波束形成器的全尺度维纳后滤波器,同时,文献^[10]提出,可根据实际情况,选择不同的尺度因子,在鲁棒性较好的维纳后滤波器和鲁棒性较差的 CF 方法之间做出权衡。然而,成像伪影通常也由 SFCW 信号的有限带宽和 MIMO 雷达的系统函数造成,这在大多数现有的基于 CF 的伪影抑制方法中并没有得到考虑。因此,大多数方法实际上只能抑制由有限孔径长度上所有空间采样点相干叠加引起的一维方位向伪影。

对于 SFCW MIMO 雷达,频域 BP 成像方法实际可以看作一个二维无失真波束形成器。因此,为了同时消除有限孔径和有限带宽所造成的二维伪影,本文将一维尺度维纳后滤波器扩展到二维情况。文献^[11]提出了一种基于二维扩展 CF (Extended CF, ECF) 的伪影抑制方法,这种方法可以看作是所提出方法的全尺度版本。在多目标情况下,基于 ECF 的伪影抑制方法会低估目标的反射系数,使弱目标无法得到检测。对于所提出的方法,通过选择适当的尺度因子,可以在一定程度上克服这些局限性,很好地抑制伪影。另外,本文还讨论并通过仿真结果验证了尺度因子对最终成像性能的影响。

1 信号模型和 BP 成像方法

1.1 SFCW MIMO 雷达

图 1 为 M 发 N 收的 SFCW MIMO 雷达的几何结构,其中,第 m 个发射阵元坐标为 $(x_m, 0)$,第 n 个接收阵元坐标为 $(x_n, 0)$ 。假设一点目标位于 (x_0, y_0) ,则其到第 l 对接收机和发射机 (即第 l 个空间采样点) 的平均距离可以表示为:

$$R_l = \left[\sqrt{(x_m - x_0)^2 + y_0^2} + \sqrt{(x_n - x_0)^2 + y_0^2} \right] / 2 \quad (1)$$

式中: $l = (m - 1)N + n = 1, 2, \dots, MN$ 。

假设成像区域被划分为 $I \times J$ 个网格点,其中 x 轴被划分为 I 个网格, y 轴被划分为 J 个网格,而且目标分别位于特定的网格点上,则对于第 q 个频率和第 l 个空间采样点,解调后的接收信号可以表示为:

$$S(l, q) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sigma(x_i, y_j) e^{-j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} + n(l, q) \quad (2)$$

式中: $f_q = f_0 + (q - 1)\Delta f$, f_0 为起始频率, Δf 为频率间隔; $R_l(x_i, y_j)$ 表示位于 (x_i, y_j) 处的目标对应第 l 个空间采样点的距离; $\sigma(x_i, y_j)$ 为目标反射系数; c 是光速; $n(l, q)$ 是噪声。

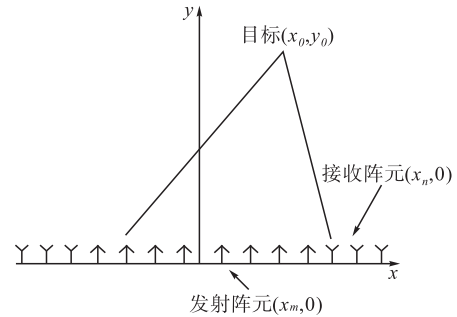


图 1 SFCW MIMO 雷达几何结构

1.2 BP 成像方法

频域后向投影 (Frequency Domain Back Projection, FDBP) 方法是 SFCW 雷达的典型成像方法之一,其通过对所有空间采样点和所有频率的接收信号进行相干叠加,得到目标的反射系数。基于 FDBP 和接收信号 $S(l, q)$,位于 (x_i, y_j) 点处的目标的反射系数可以由式 (3) 估计得出:

$$\sigma_{\text{FDBP}}(x_i, y_j) = \frac{1}{QMN} \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^{MN} S(l, q) e^{j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} \quad (3)$$

式中: Q 为总的步进频数。

在实际应用中,为减少运算量,常使用时域后向投影 (Time Domain Back Projection, TDBP) 方法来代替 FDBP 进行成像。基于 TDBP 方法,目标反射系数可以由下式估计得到:

$$\sigma_{\text{TDBP}}(x_i, y_j) = \frac{1}{MN} \sum_{l=1}^{MN} S_t(l, 2R_l(x_i, y_j)/c) \quad (4)$$

式中:

$$S_t(l, 2R_l(x_i, y_j)/c) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q S(l, q) e^{j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} \quad (5)$$

是第 l 个空间采样点对应的时域距离压缩信号,可通过快速傅里叶逆变换得到。

1.3 伪影及其产生原因

虽然 BP 成像方法简单易行,但其成像结果具有较强的伪影。强伪影使得弱目标不易检测,且多

目标的伪影会产生假峰,对后续处理造成负面影响。产生伪影的一个原因是 SFCW 信号的有限带宽。一般来说,每个空间采样点对应的时域距离压缩信号是一个类 sinc 函数。强目标在一定距离内的旁瓣会在其近距离内产生伪影。此外,雷达的系统函数也可能对距离压缩造成影响,从而产生比类 sinc 函数更高的旁瓣电平。

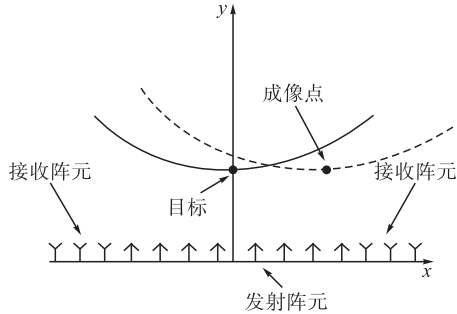


图2 所有空间采样点相干叠加造成的伪影

即使在理想距离压缩的情况下,在对所有空间采样点的距离压缩信号做相干求和的过程中仍会产生伪影。如图2所示,对于实际没有目标的成像点,其双曲线与目标双曲线的交点将使该成像点具有非零值。如果孔径尺寸变大,伪影水平会相对降低。因此,可以将这种伪影视为由有限的孔径长度引起的。

2 基于二维尺度维纳后滤波器的伪影抑制

2.1 二维尺度维纳后滤波器

重新考虑基于式(3)的 FDBP 成像方法,定义成像点 (x_i, y_j) 处经过相位补偿的接收信号为:

$$S(x_i, y_j) = [S(1, 1)e^{+j4\pi f_1 R_1(x_i, y_j)/c}, \dots, S(MN, Q)e^{+j4\pi f_Q R_{MN}(x_i, y_j)/c}]^T \quad (6)$$

此时,式(3)可以被重写为:

$$\sigma_{\text{FDBP}}(x_i, y_j) = \mathbf{W}^H \mathbf{S}(x_i, y_j) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{W} = \frac{1}{MNQ} [1, 1, \dots, 1]^T \in C^{MNQ \times 1}$ 可以看作对距离和方位进行压缩的均匀加权二维无失真波束形成器。

此外,式(2)中 $\mathbf{S}(x_i, y_j)$ 可由下式给出:

$$\mathbf{S}(x_i, y_j) = \sigma(x_i, y_j) \mathbf{1} + \mathbf{P} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{1}$ 是 $MNQ \times 1$ 的全 1 向量; \mathbf{P} 是包含目标和噪声的非期望向量。因此,当使用均匀加权二维无失真波束形成器时,可以得到:

$$\sigma_{\text{FDBP}}(x_i, y_j) = \sigma(x_i, y_j) + \mathbf{W}^H \mathbf{P} \quad (9)$$

从式(9)可以看出 $\mathbf{W}^H \mathbf{P}$ 是产生伪影的根本原因。因此,需要进一步处理来降低 $\mathbf{W}^H \mathbf{P}$ 的影响。

对于任意给定的无失真波束形成器,即 $\mathbf{W}^H \mathbf{1} = 1$, 维纳后滤波器可以用来最小化估计值的均方误差^[9], 即:

$$H_{\text{wiener}} = \arg \min_H E \{ |\sigma(x_i, y_j) - H \mathbf{W}^H \mathbf{S}(x_i, y_j)|^2 \} \quad (10)$$

式(10)中 H_{wiener} 的估计结果为:

$$H_{\text{wiener}} = \frac{|\sigma(x_i, y_j)|^2}{|\sigma(x_i, y_j)|^2 + \mathbf{W}^H \mathbf{R}_p \mathbf{W}} \quad (11)$$

式中: \mathbf{R} 为 $\mathbf{S}(x_i, y_j)$ 的协方差矩阵; \mathbf{R}_p 为非期望向量 \mathbf{P} 的协方差矩阵。通过 H_{wiener} , 位于 (x_i, y_j) 处目标的反射系数可以被估计为:

$$\sigma_{\text{wiener}}(x_i, y_j) = H_{\text{wiener}} \mathbf{W}^H \mathbf{S}(x_i, y_j) \quad (12)$$

在式(11)中, $\sigma(x_i, y_j)$ 和 \mathbf{R}_p 是未知的,需要进行估计得到。当 \mathbf{P} 中仅包含噪声时,可以用 $\sigma_{\text{FDBP}}(x_i, y_j)$ 作为 $\sigma(x_i, y_j)$ 的估计值,并且通过下式计算 $\mathbf{W}^H \mathbf{R}_p \mathbf{W}$:

$$\mathbf{W}^H \mathbf{R}_p \mathbf{W} = \frac{1}{MNQ} \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^{MN} \left| S(l, q) e^{j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} - \sigma_{\text{FDBP}}(x_i, y_j) \right|^2 \quad (13)$$

然而,除了噪声, \mathbf{P} 中还包含有来自其他目标的非期望值。因此,上述估计方法并不恰当,会导致伪影抑制效果不佳。考虑到基于 CF 的方法在点目标一维伪影抑制中取得的良好效果,对式(11)进行修改,可以得到二维尺度维纳后滤波器,表示为:

$$H_{\text{wiener}} = \frac{|\sigma(x_i, y_j)|^2}{|\sigma(x_i, y_j)|^2 + \beta \mathbf{W}^H \mathbf{R}_p \mathbf{W}} \quad (14)$$

式中: β 为尺度因子; $\sigma(x_i, y_j)$ 和 $\mathbf{W}^H \mathbf{R}_p \mathbf{W}$ 分别由式(7)和式(13)估计得到。

2.2 对比分析

2.2.1 与一维 CF 方法的关系

重新考虑式(4)给出的 TDBP 方法,成像点 (x_i, y_j) 的时域信号可表示为:

$$S_t(x_i, y_j) = [S_t(1, 2R_1(x_i, y_j)/c), \dots, S_t(MN, 2R_{MN}(x_i, y_j)/c)] \quad (15)$$

因此,式(4)可以被重写为

$$\sigma_{\text{TDBP}}(x_i, y_j) = \mathbf{W}_t^H \mathbf{S}_t(x_i, y_j) \quad (16)$$

式中: $\mathbf{W}_t = \frac{1}{MN} [1, 1, \dots, 1]^T \in C^{MN \times 1}$ 为时域均匀加权无失真波束形成器。

基于 CF 的方法^[6] 利用相干因子乘以由 TDBP 方法的所得结果来降低由有限孔径长度造成的伪影。此时, (x_i, y_j) 处点目标的反射系数可以表示为:

$$\sigma_{CF}(x_i, y_j) = CF(x_i, y_j) \cdot \mathbf{W}_t^H \mathbf{S}_t(x_i, y_j) \quad (17)$$

式中,

$$CF(x_i, y_j) = \frac{\left| \sum_{l=1}^{MN} S_t(l, 2R_l(x_i, y_j)/c) \right|^2}{MN \sum_{l=1}^{MN} \left| S_t(l, 2R_l(x_i, y_j)/c) \right|^2} = \frac{\left| \sigma_{TDBP}(x_i, y_j) \right|^2}{\left| \sigma_{TDBP}(x_i, y_j) \right|^2 + \xi_{CF}^2} \quad (18)$$

$$\xi_{CF}^2 = \sum_{l=1}^{MN} \left| S_t(l, 2R_l(x_i, y_j)/c) - \sigma_{TDBP}(x_i, y_j) \right|^2 \quad (19)$$

比较式(18)和式(14),可以看出,在一维情况下,基于 CF 的方法可以看作全尺度维纳后滤波器,即尺度因子 $\beta = MN$ 。然而,基于 CF 的伪影抑制方法仅考虑了由有限孔径长度上所有空间采样点相干叠加时引起的伪影,忽略了由有限带宽引起的伪影,从而这类伪影仍然存在。

2.2.2 与二维 ECF 方法的关系

在文献[10]中,基于 CF 的伪影抑制方法被扩展到超宽带雷达的情况。ECF 被定义为来自所有频率和空间采样点的信号的总相干功率与总非相干功率之比,此时, (x_i, y_j) 点目标的反射系数可以表示为:

$$\sigma_{ECF}(x_i, y_j) = ECF(x_i, y_j) \cdot \mathbf{W}^H \mathbf{S}(x_i, y_j) \quad (20)$$

式中:

$$ECF(x_i, y_j) = \frac{\left| \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^{MN} S(l, q) e^{j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} \right|^2}{MNQ \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^{MN} \left| S(l, q) e^{j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} \right|^2} = \frac{\left| \sigma_{FDBP}(x_i, y_j) \right|^2}{\left| \sigma_{FDBP}(x_i, y_j) \right|^2 + \xi_{ECF}^2} \quad (21)$$

$$\xi_{ECF}^2 = \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^{MN} \left| S(l, q) e^{j4\pi f_q R_l(x_i, y_j)/c} - \sigma_{FDBP}(x_i, y_j) \right|^2 \quad (22)$$

与式(14)相比,基于 ECF 的伪影抑制方法显然是所提出方法的全尺度情况,即在尺度因子 $\beta = MNQ$ 时,基于 ECF 的伪影抑制方法与所提出方法相同。尽管基于 ECF 的方法可以获得比基于 CF 的方法更好的伪影抑制性能,但是,仿真结果表明,ECF 方法会低估目标的反射系数,从而使得弱目标无法得到检测。

2.2.3 尺度因子的作用

本文所提出的尺度维纳后滤波器设有尺度因子 β ,其范围为从 0 到 MNQ 的整数。当 $\beta = 0$ 时, $H_{wiener} = 1$ 。此时,BP 成像方法产生的伪影不会得

到抑制。当 $\beta = 1$ 时,尺度维纳后滤波器将降级为标准维纳后滤波器。由于式(13)不能很好地估计 P 的功率,仅有部分成像伪影会得到抑制。当 $\beta = MNQ$ 时,尺度维纳后滤波器会转变为基于 ECF 的伪影抑制方法。因此,应当在鲁棒性较好的标准维纳滤波器和鲁棒性较差的 ECF 方法之间做好权衡来选择尺度因子 β 。在后面的仿真部分,本文分析了不同情况下伪影抑制性能和鲁棒性之间的关系。

3 仿真实验

为了评估所提出的伪影抑制方法的性能,本文进行了仿真试验,仿真参数见表 1,MIMO 雷达的阵列结构如图 3 所示。发射信号从 4 GHz 到 8 GHz 以约 3.9 MHz 的频率步进,步进频数为 1 024,为了减少运算量且与分辨率相当,网格数设置为 41。

表 1 仿真参数

参数	值
起始频率/GHz	4
截止频率/GHz	8
步进频数/GHz	1 024
发射机/接收机数目	8/8
X 轴网格数	41
Y 轴网格数	41

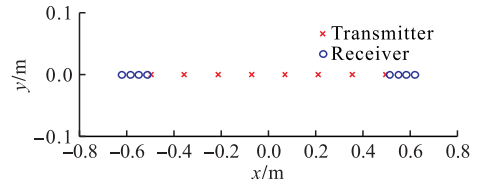


图 3 MIMO 雷达的阵列结构

为模拟实际情况,在接收信号中加入高斯白噪声,信噪比为 10 dB。图 4 给出了不同方法对位于 $(0, 2)$ 处的点目标的成像结果。如图 4(a)所示,由于有限的带宽和有限的孔径长度,FDBP 方法产生了许多强伪影。基于 CF 的方法可以获得较好的伪影抑制效果,如图 4(b)所示。然而,由于其仅能对有限孔径长度产生的伪影进行抑制,仍然存在由有限带宽引起的强伪影。对于尺度因子 $\beta = 1$ 的所提方法,由于式(13)低估了非期望信号的功率,因此伪影不能得到很好的抑制;与图 4(a)所示相比,仅抑制了由加性噪声引起的伪影,如图 4(c)所示。当尺度因子 $\beta = 65 536$ 时,所提出的方法与基于 ECF 的伪影抑制方法相同,距离向和方位向的伪影均得到很好的抑制,如图 4(d)所示,在 60 dB 的动态范围内,没有残留伪影。

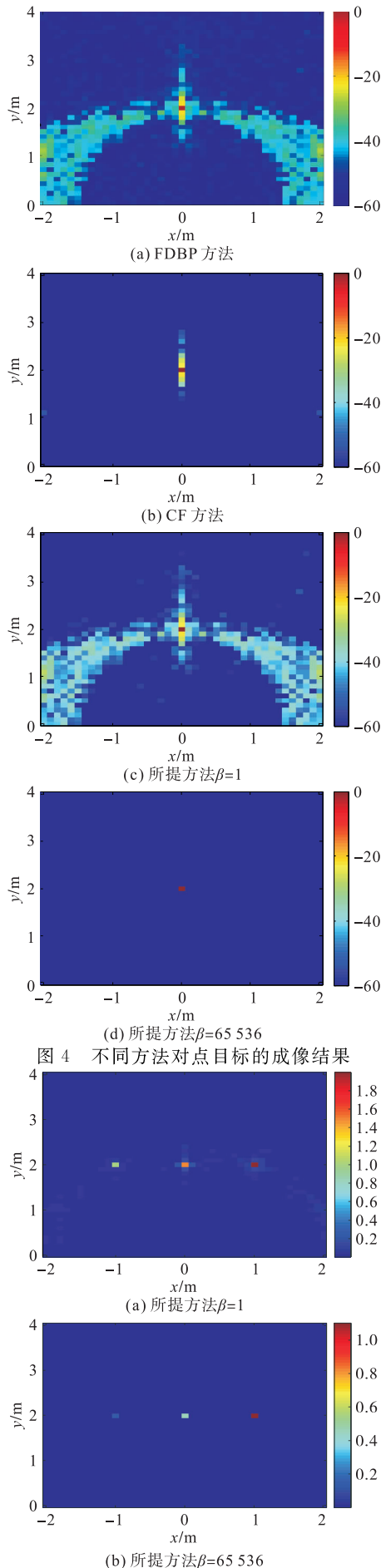


图 4 不同方法对点目标的成像结果

图 5 不同 β 值时两个目标的成像结果

但是,随着尺度因子的增大,非期望信号的功率也会增大。如上所述,当尺度因子 $\beta = 65536$ 时,所提出的尺度维纳后滤波器,即基于 ECF 的伪影抑制方法,会低估目标的反射系数,使弱目标无法得到有效检测。为了证明这个现象,当尺度因子 $\beta = 1$ 和 $\beta = 65536$ 时,利用所提方法对反射系数幅度比为 $1 : 1.5 : 2$ 且分别位于 $(1, 2)$, $(0, 2)$ 和 $(-1, 2)$ 的 3 个目标进行成像的结果如图 5 所示。从图 5(a) 可以看出,当尺度因子 $\beta = 1$ 时,虽然残留了一些伪影,但这 3 个目标反射系数的幅度比得到了比较理想的估计。然而,从图 5(b) 可以看出,伪影抑制的代价是对目标反射系数的错误估计,3 个目标反射系数均被不同程度的低估,在 $(-1, 2)$ 处反射系数较低的目标几乎是不可检测的,而 $(0, 2)$ 处的目标反射系数也被大幅低估,可以看出,较大的 β 值会导致反射系数的错误估计,尤其是对弱目标的影响更大,甚至淹没弱目标。因此,应在不同实际成像应用的情况下在伪影抑制性能和鲁棒性之间进行良好的权衡。

为了显示尺度因子 β 对成像结果的影响,我们 在一个目标的情况下,计算了不同 β 值下的最大成像旁瓣电平;同时,在两个目标的情况下,计算了不同 β 值下两目标反射系数估计的幅度比,结果如图 6 所示。可以看出,随着尺度因子 β 的增加,旁瓣电平将逐渐降低,而幅度比将逐渐增加。在图 6 中,黑色垂直线表示 $\beta = 2048$,在这种情况下,旁瓣幅度降低到大约 -40 dB 并且两目标幅度比变化不大。因此,在实际中可以利用 $\beta = 2048$ 来平衡伪影抑制性能和鲁棒性。

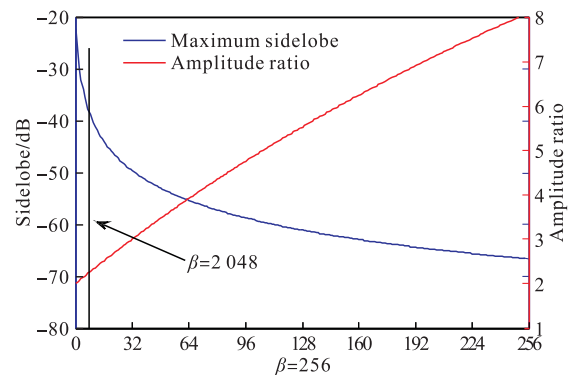


图 6 最大旁瓣和目标幅度比与尺度因子 β 的关系

4 结语

通过将传统的 FDBP 成像方法转化为二维无失真波束形成器,本文采用尺度维纳后滤波器来抑制由有限带宽和有限孔径引起的成像伪影。基于 CF

(下转第 105 页)

- finer Networks[J]. Computer Communications, 2018, 130: 50-59.
- [9] REITBLATT M, FOSTER N, REXFORD J, et al. Abstractions for Network Update [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 323-334.
- [10] KATTA N P, REXFORD J, WALKER D. Incremental Consistent Updates[C]//Proceedings of The Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. NY: ACM, 2013: 49-54.
- [11] HONG C Y, KANDULA S, MAHAJAN R, et al. Achieving High Utilization with Software-Driven WAN [C]//ACM SIGCOMM Computer Communication Review. NY: ACM, 2013, 43(4): 15-26.
- [12] JIN X, LIU H H, GANDHI R, et al. Dynamic Scheduling of Network Updates [C]//ACM SIGCOMM Computer Communication Review. NY: ACM, 2014, 44(4): 539-550.
- [13] Li G, Qian Y, Zhao C, et al. Ddp: Distributed Network Updates in Sdn[C]//2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2018: 1468-1473.
- [14] Nguyen T D, Chiesa M, Canini M. Decentralized Consistent Updates in SDN[C]//Proceedings of the Symposium on SDN Research. NY:ACM, 2017: 21-33.
- [15] MAHAJAN R, WATTENHOFER R. On Consistent Updates in Software Defined Networks[C]//Proceedings of the Twelfth ACM Workshop on Hot Topics in Networks. NY: ACM, 2013: 1-7.
- [16] MATTOS D M F, DUARTE O C M B, PUJOLLE G. Reverse Update: A Consistent Policy Update Scheme for Software-Defined Networking[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(5): 886-889.
- [17] LUDWIG A, MARCINKOWSKI J, SCHMID S. Scheduling Loop-Free Network Updates: It's Good to Relax! [C]//Proceedings of the 2015 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. NY: ACM, 2015: 13-22.
- [18] WANG W, HE W, SU J, et al. Cupid: Congestion-Free Consistent Data Plane Update In Software Defined Networks[C]//IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. NJ: IEEE, 2016: 1-9.

(编辑:韩茜)

(上接第 98 页)

的方法和基于 ECF 的方法分别是所提方法的特例。通过仿真分析和验证了尺度因子对最终成像性能的影响。与基于 CF 的方法相比,所提方法能更有效地抑制伪影。通过选择合适的尺度因子,所提方法比基于 ECF 的方法更适用于多目标情况。在实际应用中,如何更好地自适应选择尺度因子需要进一步研究。

参考文献

- [1] 许强,金添,邱磊. 基于多特征结合的 MIMO 穿墙雷达“鬼影”抑制[J]. 现代电子技术, 2015, 38(19): 1-7.
- [2] FENG W, FRIEDT J M, NICE G, et al. 3-D Ground-Based Imaging Radar Based on C-Band Cross-MIMO Array and Tensor Compressive Sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(10): 1585-1589.
- [3] YANG J, JIN T, HUANG X, et al. Sparse MIMO Array Forward-Looking GPR Imaging Based on Compressed Sensing in Clutter Environment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(7): 4480-4494.
- [4] 王怀军,黄春琳,陆珉,等. MIMO 雷达反向投影成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1567-1573.
- [5] FENG W, YI L, SATO M. Near Range Radar Imaging Based on Block Sparsity and Cross-Correlation Fusion Algorithm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(6): 2079-2089.
- [6] ZHUGE X, YAROVOY A G. Sparse Multiple-Input Multiple-Output Arrays for High-Resolution Near-Field Ultra-Wideband Imaging[J]. IET Microwaves, Antennas Propagation, 2011, 5(13): 1552-1562.
- [7] BURKHOLDER R J, BROWNE K E. Coherence Factor Enhancement of Through-Wall Radar Images[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9): 842-845.
- [8] LU B, SUN X, ZHAO Y, et al. Phase Coherence Factor for Mitigation of Sidelobe Artifacts in Through-The-Wall Radar Imaging[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2013, 27(6): 716-725.
- [9] LIU J, JIA Y, KONG L, et al. Sign-Coherence-Factor-Based Suppression for Grating Lobes in Through-Wall Radar Imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(11): 1681-1685.
- [10] NILSEN C I C, HOLM S. Wiener Beamforming and the Coherence Factor in Ultrasound Imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(6): 1329-1346.
- [11] HU J, ZHU G, JIN T, et al. Grating Lobe Mitigation Based on Extended Coherence Factor in Sparse MIMO UWB Array[C]//2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP). IEEE, 2014: 2098-2101.
- [12] FORTUNY-GUASCH J. A Fast and Accurate Far-Field Pseudopolar Format Radar Imaging Algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1187-1196.

(编辑:陈斐)