中国科学: 信息科学 2023 年 第 53 卷 第 5 期: 993–1007

SCIENTIA SINICA Informationis

《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论文

雷达极化域调控超分辨的原理与方法

王罗胜斌*, 王雪松*, 徐振海

国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 长沙 410037

* 通信作者. E-mail: wangluoshengbin@nudt.edu.cn, wxs1019@vip.sina.com

收稿日期: 2022–01–24; 修回日期: 2022–04–06; 接受日期: 2022–06–01; 网络出版日期: 2023–05–08

国家自然科学基金 (批准号: 61625108) 资助项目

摘要 分辨是雷达领域的经典问题, 尽管经过几十年的发展, 但 "分不开、辨不清" 的矛盾在雷达各类应用中日益凸显. 在雷达分辨研究中, 模糊函数理论占据绝对主流, 同时尝试突破瑞利 (Rayleigh) 分辨极限的超分辨研究层出不穷, 这些方法具有一定的超分辨效果, 但因其前提假设而在工程应用中受限. 传统分辨理论并未考虑电磁场的极化特性, 利用极化技术可大幅提升雷达分辨能力, 研究极化与分辨的关系具有重大理论价值. 本文从模糊函数出发, 重点分析目标幅度和相位对分辨效果的影响, 得出 "等幅反相" 可使雷达突破分辨率极限, 结合雷达收发极化调控技术, 创新性提出极化域变焦理论, 通过全极化域距离像阐释超分辨原理, 并且针对实际雷达系统, 提出极化域变焦多目标检测与分辨方法, 实现多目标的正确判决和距离的有效估计. 仿真结果表明, 极化域变焦处理对交叉极化不敏感, 在高信噪比条件下可将雷达分辨力提升约 20 倍.

关键词 极化调控, 雷达超分辨, 模糊函数, 极化域变焦理论, 全极化域距离像

1 引言

分辨是雷达领域的经典问题, 雷达的发展始终伴随着对更强分辨能力的追求, 雷达分辨问题至今仍具有巨大的研究价值. 模糊函数是研究雷达分辨问题的经典理论工具, 提出至今已超过 70 年. 1948 年, Ville 在信号解析理论研究中引入时频瞬时谱用以表征信号的能量分布, 其表达式由文献 [1] 中第五章的式 (6) 给出, 这是模糊函数的最早形态. 1953 年, Woodward 在文献 [2] 中的第七章讨论了目标分辨和信号模糊度的关系, 并从两个目标的可分性出发, 引出式 (17) 用以描述目标在距离 – 速度维的模糊度, 即模糊函数, 写为

$$\chi(\tau,\phi)=\int u(t)u^*(t+\tau)\exp\{-2\pi \mathrm{j}\phi t\}\mathrm{d}t, \tag{1}$$

引用格式: 王罗胜斌, 王雪松, 徐振海. 雷达极化域调控超分辨的原理与方法. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 993–1007, doi: 10.1360/SSI-2022-0141

Wang L S B, Wang X S, Xu Z H. Principle and approach to polarization modulation for radar super-resolution (in Chinese). Sci Sin Inform, 2023, 53: 993–1007, doi: 10.1360/SSI-2022-0141

其中, $u(t)$ 表示发射波形, * 表示取共轭, τ 表示时延, ϕ 表示多普勒 (Doppler) 频率. 在此基础上定义了分辨率, 这是雷达领域首次关于 "Resolution" (分辨率) 的系统论述. 此后涌现出大量关于模糊函数和雷达分辨的研究, 逐渐形成统一的雷达分辨理论 [3,4]. 然而, 模糊函数有三大前提假设: 点目标假设、匹配滤波假设和无噪声假设, 导致由模糊函数定义的 "分辨力" 与雷达实际探测中的 "分辨效果" 存在不一致.

随着雷达在各领域中广泛应用, 任务场景日趋复杂, 密集多目标/多散射点的探测需求愈发迫切. 然而, "分辨率" 和 "分辨效果" 的矛盾日益凸显, 模糊函数的局限性随之显现, 理论上可分辨的目标未必能分辨, 理论上不可分辨的目标在一定条件下却可分辨. 为了解决 "分不开、辨不清" 的矛盾, 雷达界尝试突破经典分辨理论, 提出了一系列突破瑞利 (Rayleigh) 分辨极限的超分辨理论. 例如, 基于参数化模型假设提出的单脉冲技术, 可应用于低仰角目标跟踪, 实现同一波束内目标信号与多径反射信号的分辨 [5~8]; 基于空间相位假设提出的 MUSIC, ESPRIT 等空间谱方法, 可完成密集多目标参数精确估计 [9,10]; 基于稀疏性假设提出的压缩感知方法, 可突破实孔径雷达的角度分辨率, 实现超分辨成像 [11~14], 等等. 所有超分辨方法将分辨问题转化为估计问题, 均为非线性处理, 具有一定超分辨效果, 虽然对目标或来波均有前提假设, 适用范围有限, 但上述超分辨方法的提出具有重要的参考意义.

超分辨理论大多数是从电磁场标量模型中得到的, 其研究主要集中在时域、空域、多普勒域, 在极化域的尝试鲜为人知. 近年来, 极化雷达发展迅猛, 经过 80 余年的发展, 逐渐形成了完整的理论和技术体系, 例如, 瞬态极化理论、极化滤波技术、极化精密测量技术等, 在合成孔径雷达、大型地基雷达、气象雷达等系统中均有成功应用 [15~18]. 在研究雷达极化过程中, 易注意到一个物理事实: 在特定极化下, 相邻目标的合成回波差异很大, 例如, 考虑二面角和三面角的组合场景, 在 45° 线极化下仅存在三面角的响应, 在圆极化下仅存在二面角的响应. 相比于非极化雷达, 极化雷达可以探测矢量场, 获得更多的信息维度, 极化域与时域、空域、多普勒域正交, 极化的引入可以改善雷达分辨性能 [19~21], 研究极化与分辨的关系具有重要的理论价值.

本文针对极化雷达的时域分辨问题, 从雷达分辨机理出发, 阐释基于极化调控的极化域变焦理论以及超分辨原理, 进而提出多目标检测与分辨方法, 实现雷达分辨力的有效提升. 全文结构如下: 第 2 节简要介绍雷达分辨基础理论; 第 3 节阐述极化域变焦理论; 第 4 节提出极化域变焦多目标检测与分辨方法; 第 5 节给出仿真实验与结果分析; 第 6 节对全文进行了总结并针对极化域变焦技术进行展望.

2 雷达分辨基础理论

2.1 模糊函数

雷达系统的时 – 频域分辨力取决于 3 个因素: 信噪比、信号波形和信号处理方法. 目标分辨问题的基础前提是 "目标已被检测到", 隐含了高信噪比的假设. 另外, 信号处理系统通常利用匹配滤波实现最优接收, 此时雷达的分辨力仅取决于雷达信号和参数, 两者的关系可用模糊函数描述. 模糊函数的定义源于两个目标的可分度, 模糊函数值越小, 目标的可分度越高, 越有利于分辨.

考虑空间邻近的目标 1 和目标 2, 理想情况下, 目标回波分别表示为

$$x_1(t) = A_1 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_1} u(t - t_{d1}) \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0 + f_{d1})(t - t_{d1})}, \tag{2}$$

$$x_2(t) = A_2 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_2} u(t - t_{d2}) \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0 + f_{d2})(t - t_{d2})}, \tag{3}$$

其中, $u(t)$ 为发射波形, f_0 为中心频率, A_i, t_{di}, φ_i 和 f_{di} 分别为目标的幅度、相位、时延和多普勒频

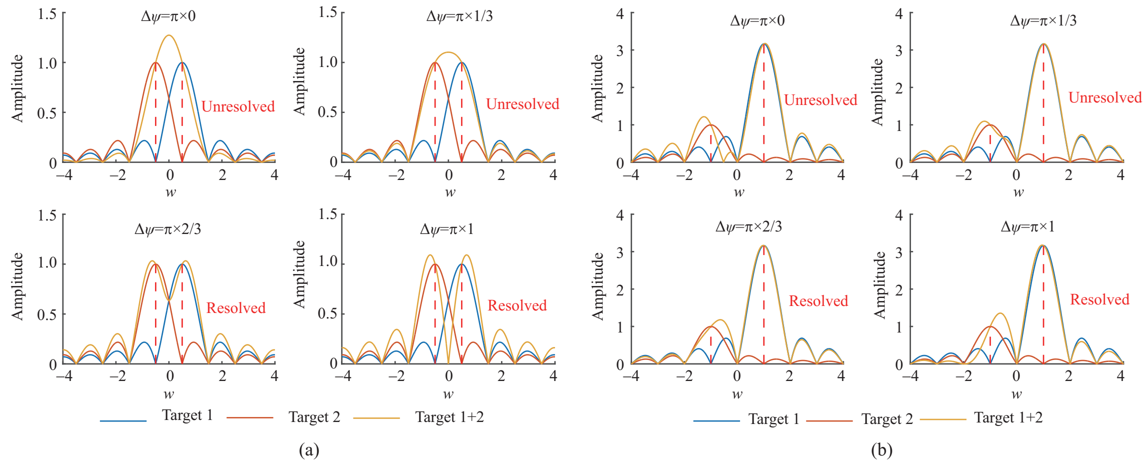

图 1　双目标分辨效果. (a) 等幅双目标; (b) “一强一弱” 双目标

Figure 1　Resolution results of two targets. (a) Two targets with equal amplitude; (b) one strong target accompanied with one weak target

率, i $(i=1,2)$ 表示目标序号. 采用误差均方最小准则作为最佳分辨准则, 则有

$$\begin{aligned}\varepsilon^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} |x_1(t)-x_2(t)|^2\,\mathrm{d}t \\ &= (A_1^2+A_2^2)\int_{-\infty}^{\infty}|u(t)|^2\,\mathrm{d}t - 2\sqrt{A_1A_2}\mathrm{Re}\{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Delta\varphi}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(f_0+f_{d2})\Delta t_d}\chi(\Delta t_d,\Delta f_d)\},\end{aligned}\tag{4}$$

其中, $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$ 表示相位差, $\Delta t_d=t_{d2}-t_{d1}$ 表示时延差, $\Delta f_d=f_{d2}-f_{d1}$ 表示多普勒频率差, $\chi(\Delta t_d,\Delta f_d)$ 具体写为

$$\chi(\Delta t_d,\Delta f_d)=\int_{-\infty}^{\infty}u(t)u^*(t+\Delta t_d)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\Delta f_d t}\mathrm{d}t.\tag{5}$$

$\chi(\Delta t_d,\Delta f_d)$, 即是模糊函数. 显然, ε^2 越大, 目标回波的差异越明显, 越有利于分辨. 式 (4) 中第一项表示信号能量, 仅取决于雷达的发射功率和目标的散射截面积, 目标的可分度主要由第二项决定. 由此可见, 模糊函数仅能反映信号波形的固有分辨力, 实际的分辨效果还与目标的幅度、相位、多普勒频率、时延等多种因素有关 [22].

在经典雷达分辨理论中, 仅用模糊函数研究目标分辨问题, 忽略了幅度和相位的影响, 导致由模糊函数定义的 “分辨率” 并不能刻画雷达对各种真实情况下邻近目标的 “分辨效果”. 如图 1(a) 所示, 当目标幅度相同且间隔恰好为 1 倍雷达分辨率时, “分辨效果” 受相对相位影响极大; 如图 1(b) 所示, 当目标幅度差异很大时, 即使间隔 2 倍雷达分辨率, 两者也难以区分.

2.2　雷达分辨力分析

考虑同一分辨单元内的双目标情况, 雷达接收的信号为各目标的线性叠加, 不妨设发射波形为线性调频信号, 带宽为 B, 则有 $\Delta t_d<1/B$. 在高信噪比条件下, 经过匹配滤波后, 接收信号变为

$$x(t)\approx A_1'\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_1'}\mathrm{sinc}[\pi B(t-\Delta t_d/2)]+A_2'\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_2'}\mathrm{sinc}[\pi B(t+\Delta t_d/2)],\tag{6}$$

其中, $\mathrm{sinc}(x)=\sin x/x$ 为 “辛克” 函数, A_i' 和 φ_i' 分别为匹配滤波输出的幅度和相位. 复信号的模值

为时域波形, 写为

$$\begin{aligned} y(t) &= |x(t)|^2 \\ &= |A_1'|^2\mathrm{sinc}^2(t_1) + |A_2'|^2\mathrm{sinc}^2(t_2) + 2\mathrm{Re}\{A_1'A_2'^*\}\cos\Delta\varphi'\mathrm{sinc}(t_1)\mathrm{sinc}(t_2), \end{aligned} \tag{7}$$

其中, $t_1 = \pi B(t - \Delta t_d/2)$, $t_2 = \pi B(t + \Delta t_d/2)$, $\Delta\varphi' = \varphi_1' - \varphi_2'$. 由于时域和距离域是线性映射关系, 式 (7) 中的时域波形亦称为 "距离像".

当时域波形存在可被检测的多个峰值, 且与各目标一一对应时, 多目标即可在时域分辨. 波形的峰值点可通过分析一阶导数和二阶导数得到, 为了便于分析, 利用泰勒 (Taylor) 展开将 "辛克" 函数近似为多项式:

$$\mathrm{sinc}(x) \approx 1 - \frac{x^2}{6}. \tag{8}$$

将式 (8) 代入式 (7) 中, 并对 $y(t)$ 一阶求导, 可得

$$y'(t) = \frac{2}{3}{A'}_1^2 t_1\left(\frac{1}{6}t_1^2 - 1\right) + \frac{2}{3}{A'}_2^2 t_2\left(\frac{1}{6}t_2^2 - 1\right) + \frac{2}{9}{A'}_1{A'}_2\cos\Delta\varphi'(t^3 - \Delta t_d^2 t - 6t). \tag{9}$$

进一步, 对 $y(t)$ 二阶求导, 可得

$$y''(t) = \frac{2}{3}{A'}_1^2\left(\frac{1}{2}t_1^2 - 1\right) + \frac{2}{3}{A'}_2^2\left(\frac{1}{2}t_2^2 - 1\right) + \frac{2}{9}{A'}_1{A'}_2\cos\Delta\varphi'(3t^2 - \Delta t_d^2 - 6). \tag{10}$$

由 $y'(t)$ 的零点可确定波形的极值点位置, 由 $y''(t)$ 的正负可确定极值点的属性 (波峰或是波谷).

显然, 若双目标幅度差异太大, 弱目标易被强目标淹没, 相比之下等幅双目标更易分辨. 假设 $A_1' = A_2'$, 此时易得到 $y'(0) = 0$, $t = 0$ 时刻可能出现波峰或是波谷. 当 $y''(0) \geqslant 0$ 时, $y(0)$ 为波谷, 双目标可分辨; 反之, 无可分辨. 由此得到等幅双目标可分辨的条件, 具体写为

$$\Delta t_d \geqslant \sqrt{\frac{6 + 6\cos\Delta\varphi'}{3 - \cos\Delta\varphi'}} \overset{\mathrm{def}}{=} g(\Delta\varphi'). \tag{11}$$

不难证明, 双目标同相时 ($\Delta\varphi' = 0$), $g(\Delta\varphi')$ 取得最大值 $\sqrt{6}$; 双目标反相时 ($\Delta\varphi' = \pm\pi$), $g(\Delta\varphi')$ 取得最小值 0. 由此可得, "等幅同相" 双目标最难分辨, "等幅反相" 双目标最易分辨.

如图 2 所示, "等幅同相" 情况下, 目标的间隔至少达到 1.33 倍分辨率1)才可分辨; "等幅反相" 情况下, 目标间隔只要稍大于 0 即可分辨. 另外, 表 1 给出了 "等幅反相" 的时域波形参量, 随着目标间隔减小, 虽然峰值幅度急剧减小, 但峰值旁瓣比缓慢减小, 双峰间距几乎不变. 也就是说, 双目标在 "等幅反相" 条件下具有极强的可分辨特性.

综上所述, 目标的相对幅相对分辨效果影响极大, 但模糊函数仅考虑不利于分辨的 "等幅同相" 情况, 导致传统分辨率反映的是雷达分辨性能的 "下界", "等幅反相" 可突破这一极限, 极大提升雷达分辨力, 达到超分辨的效果.

3 极化域变焦时域分辨原理

3.1 极化雷达信号模型

电磁波是一种矢量波, 由振幅、频率、相位、极化 4 种基本物理参量表征, 但经典分辨理论将电磁

1) 根据推导, 间隔需要达到 1.56 倍分辨率, 但推导过程中采用近似, 存在拟合误差, 1.33 倍分辨率为仿真实验结果.

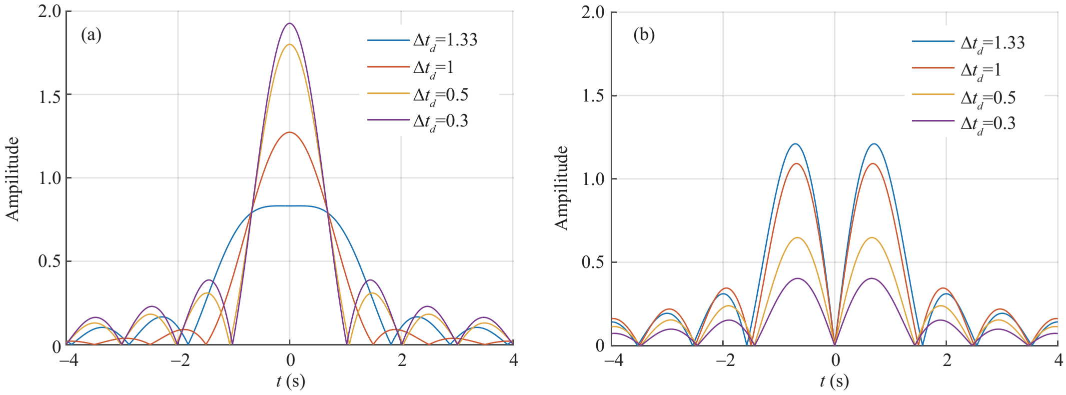

图 2 等幅双目标分辨效果. (a) 相位差为 0, (b) 相位差为 π

Figure 2 Resolution results of two equal-amplitude targets. (a) Phase offset is 0, (b) phase offset is π

表 1 等幅反向双目标波形参量

Table 1 Waveform parameters of two equal-amplitude and opposite-phase targets

	Distance interval/$\Delta\tau$									Trend
	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	
Peak amplitude	1.05	0.90	0.74	0.58	0.42	0.28	0.16	0.07	0.02	Reduce sharply
PSLR (dB)	9.63	9.31	9.05	8.84	8.66	8.52	8.42	8.34	8.30	Reduce slowly
Peaks interval/$\Delta\tau$	1.366	1.357	1.350	1.344	1.338	1.334	1.331	1.328	1.325	Almost no change

波假设为标量模型处理, 忽略了极化参量. 考虑电磁波的矢量特性, 式 (6) 改写为

$$x(t) = \bar{A}_1 \mathrm{e}^{\bar{\varphi}_1} \boldsymbol{h}_R^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_1 \boldsymbol{h}_T \mathrm{sinc}(t_1) + \bar{A}_2 \mathrm{e}^{\bar{\varphi}_2} \boldsymbol{h}_R^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_2 \boldsymbol{h}_T \mathrm{sinc}(t_2), \tag{12}$$

其中, $\bar{A}_i \mathrm{e}^{\bar{\varphi}_i} \boldsymbol{h}_R^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_i \boldsymbol{h}_T = A_i' \mathrm{e}^{\varphi_i'}$, $\boldsymbol{h}_T$ 和 $\boldsymbol{h}_R$ 为发射和接收极化矢量, $\boldsymbol{S}_i$ 为目标的极化散射矩阵.

采用 Jones 矢量表征极化, 极化状态矢量写为

$$\boldsymbol{h}(\phi, \tau) = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\tau - \mathrm{j}\sin\phi\sin\tau \\ \sin\phi\cos\tau - \mathrm{j}\cos\phi\sin\tau \end{bmatrix}, \tag{13}$$

其中, (ϕ, τ) 为极化椭圆几何描述子, 并且有 $\phi \in (-\pi/2, \pi/2]$, $\tau \in (-\pi/4, \pi/4]$. 假设发射和接收极化的椭圆几何描述子分别为 (ϕ_T, τ_T) 和 (ϕ_R, τ_R), 则有 $\boldsymbol{h}_T = \boldsymbol{h}(\phi_T, \tau_T)$, $\boldsymbol{h}_R = \boldsymbol{h}(\phi_R, \tau_R)$. $\boldsymbol{S}_i$ 为 2×2 复数矩阵, 表示为

$$\boldsymbol{S}_i = \begin{bmatrix} s_{11}^{(i)} & s_{12}^{(i)} \\ s_{21}^{(i)} & s_{22}^{(i)} \end{bmatrix}. \tag{14}$$

在单站雷达条件下, 极化散射矩阵具有互易性, 即 $s_{12}^{(i)} = s_{21}^{(i)}$.

极化雷达具备感知电磁波极化信息的能力, 可调控发射和接收的极化状态. 理想情况下, 极化雷达可采用任意极化状态发射和接收, "无级" 调控收发极化状态, 从而在极大范围内调节目标回波的幅度和相位, 实现 "等幅反相". 换而言之, 极化雷达具备超分辨的潜力.

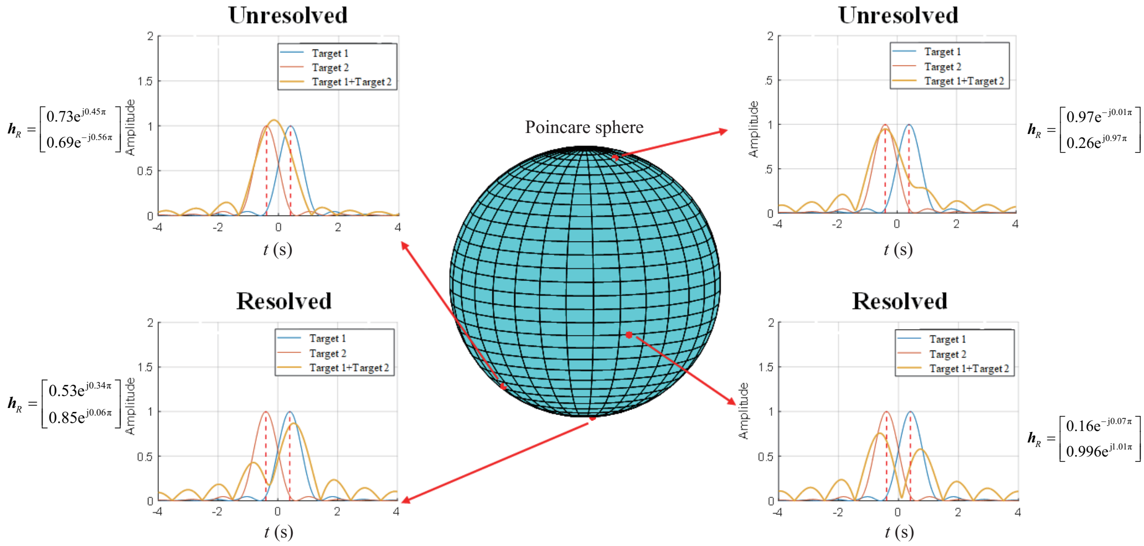

图 3　不同接收极化状态下的距离像

Figure 3　Range profile with different receive polarization states

3.2　极化域变焦

虽然采用极化调控的方式可以极大增强雷达的分辨能力, 但在实际探测过程中, 目标的极化散射矩阵未知, 并且雷达调控极化时存在系统误差, 通过单次测量无法直接实现超分辨, 需要通过大量极化域采样逼近 "等幅反相". 从信号处理的角度来看, 一种收发极化组合在极化域上对应一个滤波器, 对某些散射结构具有增强作用, 对另外一些散射结构具有抑制作用. 如图 3 所示, 采用 45° 线极化电磁波探测 "二面角 + 三面角" 双目标, 当调节接收极化状态时, 各目标在时域形成的峰值有高有低, 叠加形成的能量 "聚焦点" 在真实目标附近来回跳变, 主瓣形状各不相同.

在光学领域中, 物体的反射光是一种三维响应, 包含景深维信息, 照相机选择某一焦点, 将反射光投影至二维平面形成图像, 调节焦点可获得不同景深上的投影, 这种处理在光学领域称之为 "变焦". 从信号处理的角度出发, 这种投影等效为景深维度上一个极窄的滤波器, 光学 "变焦" 与调节收发极化状态在效果上极其相似, 微调将导致成像结果剧烈变化. 由此提出 "极化域变焦" 的概念, 即通过改变收发极化状态调控目标相对幅相, 改变相干叠加效果, 增强目标信息获取能力.

根据式 (12) 给出的信号模型, 包含极化参量的距离像可表示为

$$\gamma = \bar{A}_1^2|g_1|^2\mathrm{sinc}^2(t_1) + \bar{A}_2^2|g_2|^2\mathrm{sinc}^2(t_2) + 2\bar{A}_1\bar{A}_2\cos\Delta\bar{\varphi}\mathrm{Re}\{g_1g_2^*\}\mathrm{sinc}(t_1)\mathrm{sinc}(t_2), \tag{15}$$

其中, $g_1 = \boldsymbol{h}_R^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_1\boldsymbol{h}_T$, $g_2 = \boldsymbol{h}_R^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_2\boldsymbol{h}_T$. 从极化域变焦原理出发, 距离像是关于时间和极化椭圆几何描述子的多元函数, 应表示为 $\gamma(R,\phi_T,\tau_T,\phi_R,\tau_R)$. 式 (15) 可表征用任意极化激励目标的时域波形, 包含了 "可分辨" 和 "未分辨" 两类, 综合处理所有结果, 可将目标的可分性提升至最大.

3.3　全极化域距离像

特定的收发极化组合对不同的散射机理具有增强或抑制的作用, 对应的距离像是所有目标响应的融合, 将所有距离像线性累加, 形成的包络反映了多目标组合的轮廓尺寸, 可用于检测多目标的存在

性. 该包络定义为全极化域距离像, 具体写为

$$\Gamma(t)=\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\gamma(t)\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R. \tag{16}$$

观察式 (15), 与极化椭圆几何描述子有关的项为 $|g_1|^2$, $|g_2|^2$ 以及 $\mathrm{Re}\{g_1g_2^*\}$, 并且 $|g_1|^2$ 和 $|g_2|^2$ 形式相同, 所以求解式 (16) 仅需计算 $|g_i|^2$ 和 $\mathrm{Re}\{g_1g_2^*\}$ 的四重积分.

通过计算化简 (详见附录 A), 全极化域距离像可写为

$$\begin{aligned}\Gamma(t)=&\frac{\pi^4}{16}\left(|s_{11}^{(1)}|^2+2|s_{12}^{(1)}|^2+|s_{22}^{(1)}|^2\right)\bar{A}_1^2\mathrm{sinc}^2(t_1)+\frac{\pi^4}{16}\left(|s_{11}^{(2)}|^2+2|s_{12}^{(2)}|^2+|s_{22}^{(2)}|^2\right)\bar{A}_2^2\mathrm{sinc}^2(t_2)\\&+\frac{\pi^4}{8}\mathrm{Re}\{s_{11}^{(1)}s_{11}^{(2)*}+2s_{12}^{(1)}s_{12}^{(2)*}+s_{22}^{(1)}s_{22}^{(2)*}\}\bar{A}_1\bar{A}_2\cos\Delta\bar{\varphi}\mathrm{sinc}(t_1)\mathrm{sinc}(t_2).\end{aligned} \tag{17}$$

相比于常规一维距离像, 全极化域距离像包含了极化散射矩阵的各个元素. 单目标条件下的距离像是 “标准型”, 主瓣宽度与雷达距离分辨率相同, 主瓣位置指向目标, 不随收发极化改变. 但多目标的距离像是各目标 “标准型” 的融合, 主瓣展宽, 并且主瓣位置随收发极化在目标周围剧烈跳动. 如图 4(a) 和 (b) 所示, 单目标条件下, 常规一维距离像和全极化域距离像具有一致性, 均为 “标准型”; 多目标条件下, 全极化域距离像主瓣宽度远大于 “标准型”, 可用于判决目标属性 (“单目标” 或是 “多目标”), 实现多目标的检测.

按 “可分辨” 和 “未分辨” 将距离像分为两类, “可分辨” 有两个可检测的峰值, “未分辨” 仅有一个, 全极化域距离像可分解为

$$\Gamma(t)=\Gamma_{1p}(t)+\Gamma_{2p}(t), \tag{18}$$

其中, $\Gamma_{1p}(t)$ 为单峰极化域距离像, 是所有 “未分辨” 的累加; $\Gamma_{2p}(t)$ 为双峰极化域距离像, 是所有 “可分辨” 的累加. 虽然 “等幅反相” 可以极大增强目标的可分性, 但目标回波仍存在耦合, 导致 $\Gamma_{2p}(t)$ 的双峰位于双目标的两侧, 未能准确指向目标; 另一方面, $\Gamma_{1p}(t)$ 的峰值点位于双目标之间, 综合利用 $\Gamma_{1p}(t)$ 和 $\Gamma_{2p}(t)$ 可以指示目标真实位置. 如图 4(c) 所示, $\Gamma_{1p}(t)$ 的峰值点和 $\Gamma_{2p}(t)$ 的左侧峰值点可确定目标 1 所在区间, $\Gamma_{1p}(t)$ 的峰值点和 $\Gamma_{2p}(t)$ 的右侧峰值点可确定目标 2 所在区间.

综上所述, 极化域变焦处理具有目标选择性增强的效果, 利用多极化接收, 依据不同目标的极化敏感度实现雷达散射截面积 (radar cross section, RCS) 不同程度的增强或抑制, 根据距离像的主瓣展宽情况和距离像峰值分布, 实现多目标的检测与超分辨.

4　极化域变焦多目标检测与分辨方法

实际极化雷达系统通常以一种或两种极化方式发射, 采用水平极化和垂直极化双通道接收, 此时的接收极化矢量分别为 $[1\ 0]^{\mathrm{T}}$ 和 $[0\ 1]^{\mathrm{T}}$, 将两路信号进行加权, 可获得任意极化的接收效果. 虽然无法获取全极化域距离像, 但可通过接收端的极化域变焦形成多极化域距离像, 多极化域距离像是全极化域距离像的一个子集, 同样可用于多目标的时域超分辨.

考虑单极化发射 – 双极化接收体制, 假设以 $\boldsymbol{h}_{T_0}$ 的极化状态发射, 以垂直极化和水平极化接收, 并在数字域形成 L 种极化接收状态. 假设第 l $(l=1,\ldots,L)$ 种接收极化为 $\boldsymbol{h}_{R_l}$, 代入式 (15) 可得极化收发组合 $(\boldsymbol{h}_{T_0},\boldsymbol{h}_{R_l})$ 的距离像 $\gamma_l(t)$, 则多极化域距离像表示为

$$\bar{\Gamma}(t)=\sum_{l=1}^{L}\gamma_l(t). \tag{19}$$

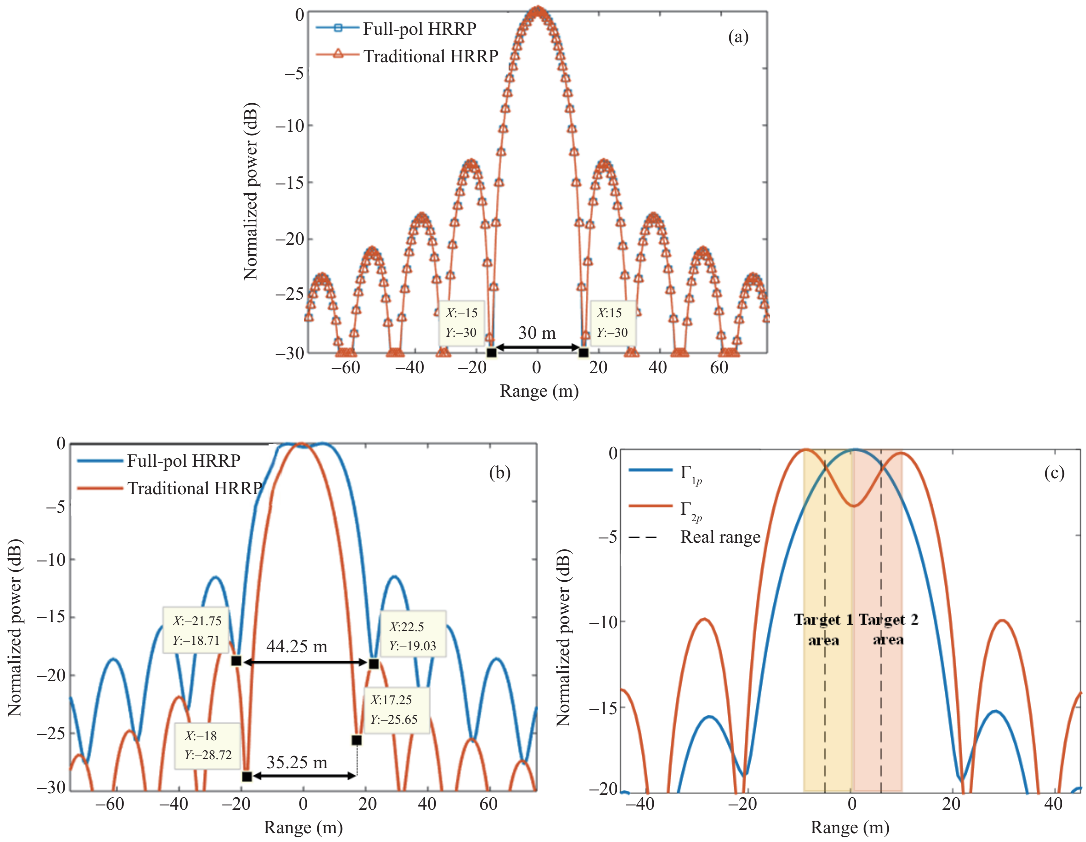

图 4　全极化域距离像.(a) 单目标情况; (b) 双目标情况; (c) 单/双峰分解

Figure 4　Full polarization range profile. (a) Single-target case; (b) multitarget case; (c) single-peak and double-peak decomposition

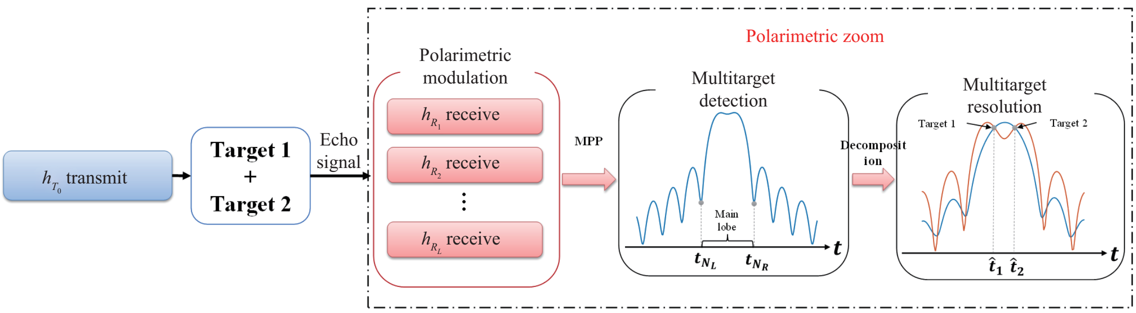

图 5　极化域变焦时域分辨处理流程

Figure 5　Processing flowchart of time-domain resolution via polarimetric zoom

多极化域距离像亦可分解为单峰和双峰两种情况, 写为

$$\bar{\Gamma}(t)=\bar{\Gamma}_{1p}(t)+\bar{\Gamma}_{2p}(t). \tag{20}$$

如图 5 给出了极化域变焦时域超分辨的处理流程, 具体如下.

极化域变焦多目标检测. 假设 $\bar{\Gamma}$ 的左、右第一零点位于 t_L 和 t_R, 则多极化域距离像的主瓣宽度

为 t_R-t_L, 由此判决目标属性:

$$\begin{cases} \mathrm{H}_0: t_R-t_L \leqslant \beta\cdot\frac{2}{B}, \\ \mathrm{H}_1: t_R-t_L > \beta\cdot\frac{2}{B}, \end{cases} \tag{21}$$

其中, H_0 表示单目标假设, H_1 表示多目标假设, β 为门限因子, 可根据经验调整, 通常略大于 1.

极化域变焦多目标分辨. $\bar{\Gamma}_{1p}$ 的峰值点位置记为 t_{1p}, $\bar{\Gamma}_{2p}$ 的两个峰值点位置分别记为 $t_{2p\text{-}L}$ 和 $t_{2p\text{-}R}$, 则 $[t_{2p\text{-}L}, t_{1p}]$ 为目标 1 所在区间, $[t_{1p}, t_{2p\text{-}R}]$ 为目标 2 所在区间. 从两个区间中搜索得到 $\bar{\Gamma}_{1p}$ 与 $\bar{\Gamma}_{2p}$ 相交点 $\hat{t}_1$ 和 $\hat{t}_2$. $\hat{t}_1$ 满足: $\bar{\Gamma}_{1p}(\hat{t}_1)=\bar{\Gamma}_{2p}(\hat{t}_1)$, $\hat{t}_1\in[t_{2p\text{-}L}, t_{1p}]$; $\hat{t}_2$ 满足: $\bar{\Gamma}_{1p}(\hat{t}_2)=\bar{\Gamma}_{2p}(\hat{t}_2)$, $\hat{t}_2\in[t_{1p}, t_{2p\text{-}R}]$. 目标 1 和目标 2 的距离估计为

$$\hat{R}_i=\frac{\mathrm{c}\hat{t}_i}{2}, \tag{22}$$

其中, c 表示光速.

5　仿真实验

考虑典型极化雷达系统, 以 45° 线极化发射, 发射波形为线性调频, 脉宽 $T_p=10$ μs, 带宽 $B=10$ MHz, 则距离分辨率为 15 m; 经过匹配滤波处理, 信号在时域和频域上得到积累, 信噪比可提升 $T_pB=20$ dB, 将匹配滤波后的信噪比记为 SNR. 以水平和垂直双极化接收, 采样频率为 300 MHz, 形成 $L=400$ 个数字极化接收通道. 考虑同一距离单元内的双目标场景, 假设目标的散射机理为三面角、二面角或非三面角, 相应的极化散射矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ 或 } \begin{bmatrix} 1 & 0.15 \\ 0.15 & 0.9\mathrm{e}^{\mathrm{j}0.2\pi} \end{bmatrix}.$$

首先, 定义双目标的幅相比为 $\rho=\frac{\bar{A}_2}{\bar{A}_1}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Delta\varphi}$, 假设目标 1 的信噪比为 10 dB, 目标间隔 15 m (1 倍分辨率), 考虑多个场景, 通过极化域变焦处理形成多极化域距离像, 如图 6 所示. 显然, 单目标的多极化域距离像为 “标准型”, 主瓣宽度为 2 倍距离分辨率, 与理论相符; 双目标的多极化域距离像为 “非标准型”, 与目标的极化散射特性、相对幅相等因素有关, 并且主瓣宽度远大于 2 倍距离分辨率, 所以利用主瓣宽度判决目标属性是有效的技术途径. 值得注意的是, 多极化域距离像能够反映目标的尺寸轮廓, 虽然其主瓣形状随目标的极化散射特性变化, 但主瓣宽度不变, 仅与目标间隔有关. 另外, 当双目标的极化散射特性相同时, 极化域变焦无法调控相对幅相, 主瓣宽度仅取决于初始幅相比, 多目标可能误判为单目标.

为进一步验证极化域变焦处理的多目标检测性能, 假设目标间的相位差服从 $(-\pi,\pi]$ 的均匀分布, 通过多次实验计算得到多目标的正确判决概率和单目标的误判概率, 仿真结果如图 7 所示. 显然, 信噪比越高、目标间隔越大, 多极化域距离像的主瓣轮廓越清晰明显, 多目标正确判决概率越高, 单目标误判概率越低. 当信噪比高于 10 dB 且目标间隔大于 0.5 倍距离分辨率时, 所提方法可有效判决目标属性, 多目标正确判决概率超过 90%, 单目标误判概率近乎为 0. 极化域变焦处理对目标极化散射特性并不敏感, 即使目标的极化散射特性相同亦可正确判决. 另外, 略微升高判决门限可有效减少单目标的误判概率, 但同时双目标的正确判决概率也随之下降. 需要强调的是, 此处的检测门限为经验值, 并非由主瓣宽度的统计分布导出, 多目标的恒虚警检测需要进一步深入研究.

在检测到多目标的基础上, 将多极化域距离像进行单/双峰分解, 考虑多种场景, 单峰和双峰极化域距离像如图 8 所示. 可以看出, 单/双峰极化域距离像与目标的极化散射特性、间隔、相对幅相均有

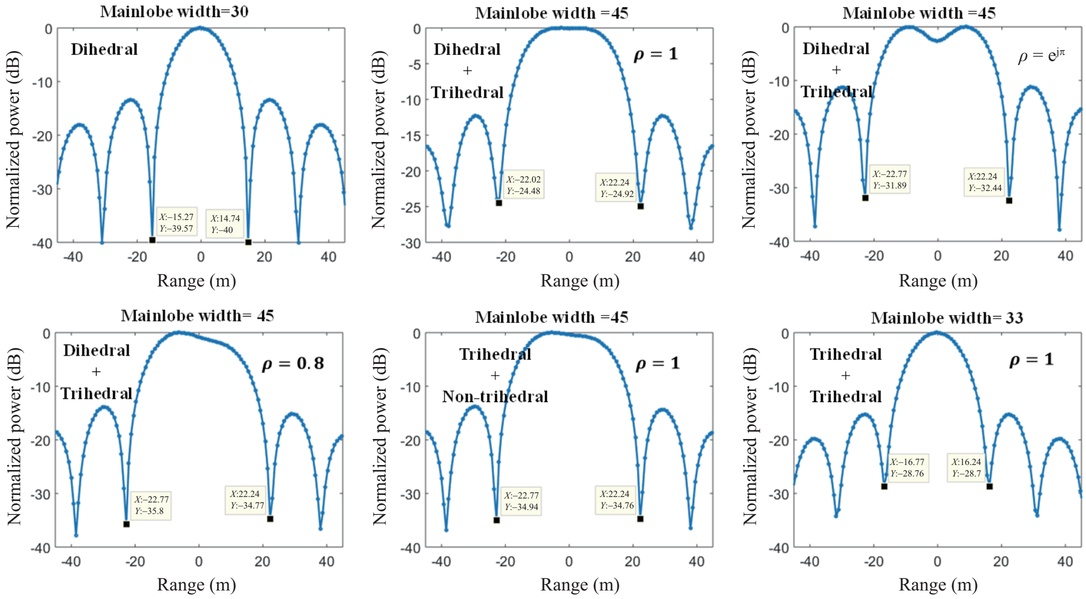

图 6 多极化域距离像主瓣宽度

Figure 6 Mainlobe width of multi-polarization range profile

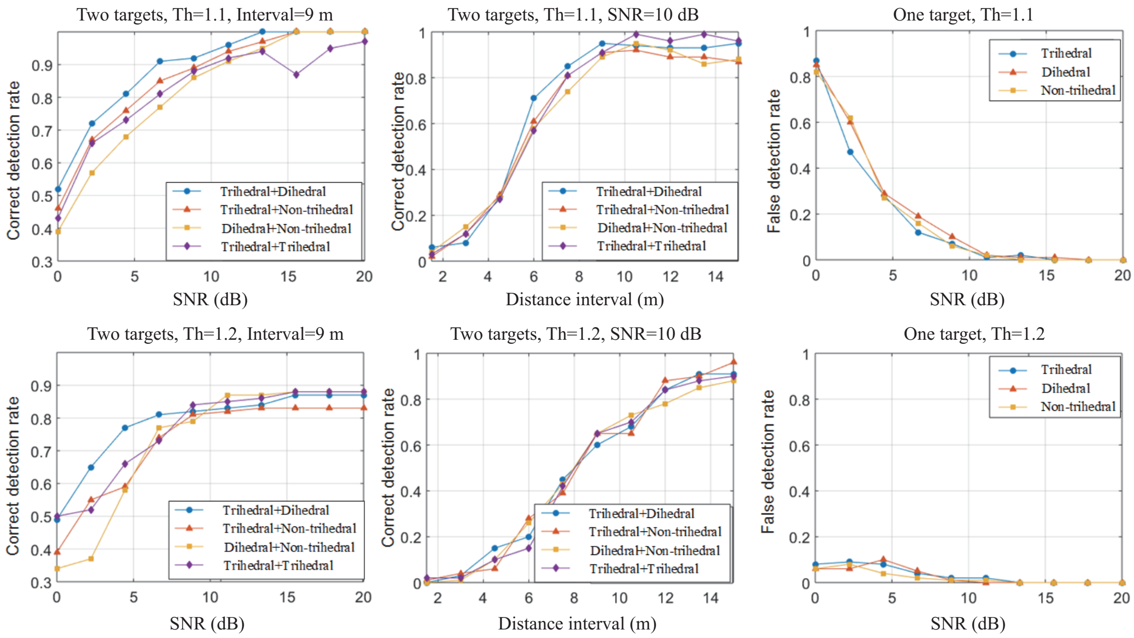

图 7 极化域变焦多目标检测性能

Figure 7 Performance of the multitarget detection via polarimetric zoom

关, 但利用两者的主瓣交点仍然可以较为准确地指示目标距离. 虽然单/双峰极化域距离像随目标间隔和相对幅相而改变, 但两者的主瓣交点依然在目标真值附近, 并对测距精度影响较小. 相比之下, 主瓣交点对目标的散射特性更为敏感, 对测距精度影响较大. 另外, 当双目标的极化散射特性相同时, 极化域变焦无法调控相对幅相, 在 $\rho = 1$ 条件下仅存在单峰情况, 无法实现双目标的时域超分辨. 双峰极

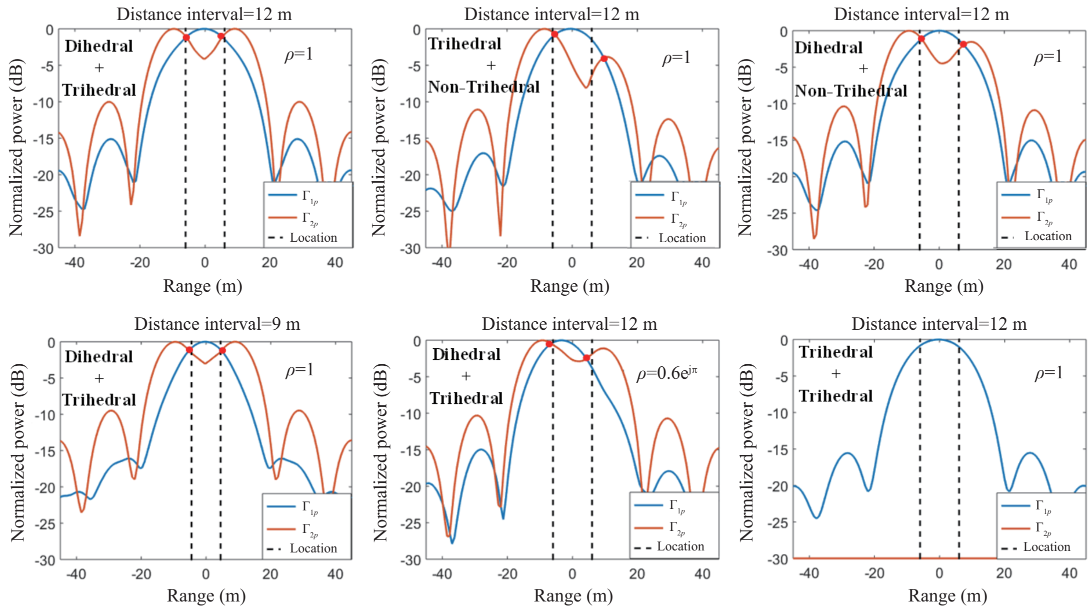

图 8　多极化域距离像单/双峰分解结果

Figure 8　One-peak and double-peak decomposition of multiple polarization range profile

表 2　双目标超分辨概率 (%)

Table 2　Two-target superresolution probability (%)

	Distance interval/Range resolution									
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
SNR = 10 dB	18	29	35	47	63	77	79	82	100	100
SNR = 15 dB	27	35	41	53	69	79	89	96	100	100
SNR = 20 dB	37	42	52	60	78	83	94	100	100	100
SNR = 25 dB	41	45	62	69	80	85	98	100	100	100
SNR = 30 dB	47	51	68	75	83	89	100	100	100	100

化域距离像的形成是实现超分辨的标志, 与信噪比、目标间隔、相对幅相等因素有关. 假设双目标的散射机理分别为三面角和二面角, 通过多次仿真实验统计不同条件下的超分辨概率, 结果如表 2 所示. 显然, 信噪比越高、目标间隔越大, 双目标分辨概率越高. 不妨假设, 当分辨概率超过 50% 时, 超分辨有效. 由此得出极化域变焦的超分辨性能, 当信噪比为 10 dB 时, 雷达分辨力提升约 5 倍; 当信噪比为 20 dB 时, 雷达分辨力提升约 6.7 倍; 当信噪比为 30 dB 时, 雷达分辨力可稳健提升近 20 倍.

为进一步验证极化域变焦处理的参数估计性能, 通过多次仿真统计双目标测距的均方根误差, 用以衡量目标的测距精度, 结果如图 9 所示. 由图 9(a) 可知, 随着信噪比升高, 估计误差不断降低, 但由于所提方法并非无偏估计, 估计误差逐渐趋于 1 m 左右, 测距精度无法进一步提升. 假设信噪比为 20 dB, 图 9(b) 给出了测距精度随目标间隔的变化曲线. 由图可知, 距离间隔越宽越有利于参数估计, 在实现超分辨的基础上, 中等信噪比条件下测距精度约为 1∼2 m.

最后, 考虑实际极化雷达系统, 双极化接收通道存在互耦, 造成信号存在相互 “污染”. 工程上以交叉极化隔离度衡量互耦程度, 隔离度越高, 互耦程度越低. 假设信噪比为 20 dB, 目标间隔为 12 m (0.8 倍距离分辨率), 表 3 给出了不同隔离度条件下多目标正确判决概率和距离估计误差. 可以看出,

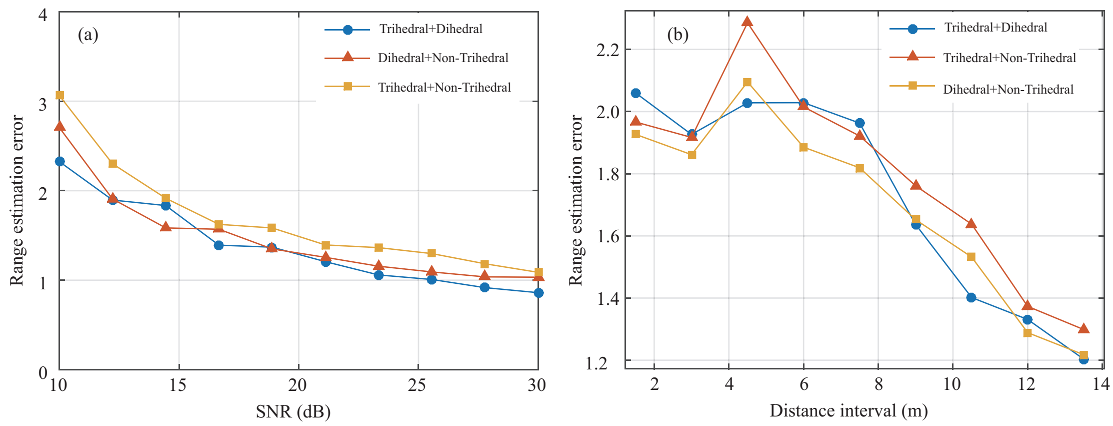

图 9　极化域变焦多目标分辨算法测距误差. (a) 目标间隔为 12 m; (b) 信噪比为 20 dB

Figure 9　Estimation error of two-target ranging via polarimetric zoom. (a) Interval between two targets is 12 m; (b) signal-to-noise ratio is 20 dB

表 3　不同交叉极化隔离度下的多目标分辨性能 (检测概率/估计误差)

Table 3　Detection probability and range estimation error versus cross polarization ratio

	Cross isolation (dB)					
	−5	−10	−15	−20	−25	−30
Dihedral+Trihedral	97%/1.84 m	97%/1.63 m	100%/1.49 m	100%/1.43 m	100%/1.45 m	100%/1.32 m
Trihedral+Non-trihedral	81%/1.94 m	95%/1.63 m	96%/1.45 m	100%/1.53 m	100%/1.40 m	100%/1.49 m
Dihedral+Non-trihedral	86%/2.13 m	97%/1.58 m	100%/1.65 m	100%/1.64 m	100%/1.45 m	100%/1.27 m

极化域变焦处理并未因接收通道互耦而导致分辨性能下降, 交叉极化隔离度仅需达到 −15 dB, 多目标检测性能和分辨性能与理论保持一致. 极化域变焦时域分辨方法对极化通道耦合并不敏感, 本质原因是极化域与时域正交, “通道泄露” 仅影响信号的幅度和相位, 目标在极化域仍存在差异, 极化域变焦处理依旧可实现有效时域分辨.

6　总结与展望

本文重点分析了目标相对幅相对雷达分辨效果的影响, 提出了极化域变焦理论, 通过全极化域距离像阐明了极化域变焦时域分辨原理, 并针对实际极化雷达系统提出了多目标检测与分辨方法, 实现了多目标的正确判决与距离的有效估计. 实验结果表明, 10 dB 信噪比条件下, 雷达分辨力提升约 5 倍; 30 dB 信噪比条件下, 雷达分辨力提升约 20 倍.

极化域变焦是一种全新的超分辨理论, 可应用于窄带成像、前视成像、抗地海杂波等. 需要注意的是, 本文仅考虑了双目标情况, 多目标条件下所提分辨方法性能下降, 将极化域变焦理论与参数化模型方法结合是处理多目标的可行途径, 该问题为下一步的研究重点; 另外, 极化域变焦理论亦可应用于空域和多普勒域, 多域联合的极化域变焦处理值得深入研究.

参考文献

1　Ville J. Théorie et applications de la notion de signal analytique. Cables et Transmission, 1948, 2: 61–74

2 Woodward P M. Probability and Information Theory, With Application to Radar. Oxford: Pergamon Press, 1953

3 Zhang Y W, Li S H T. Radar System Analysis. Beijing: National Defense Industry Press, 1981 [张有为, 李少洪同. 雷达系统分析. 北京: 国防工业出版社, 1981]

4 Ding L F, Geng F L, Chen J C. Radar Principles. 5th ed. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2014 [丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理. 第 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2014]

5 Xu Z H, Xiao S P, Xiong Z Y. Low Angle Tracking Techniques For Array Radars. Beijing: Science Press, 2014 [徐振海, 肖顺平, 熊子源. 阵列雷达低角跟踪技术. 北京: 科学出版社, 2014]

6 Xie T-F, Yang X-Y. Research on height finding technique based on super resolution in planar array VHF radar. Radar Sci Tech, 2015, 13: 164–166 [谢腾飞, 杨雪亚. 平面阵列米波雷达超分辨测高技术研究. 雷达科学与技术, 2015, 13: 164–166]

7 Xu Z H, Xiong Z Y, Song D, et al. Double-null monopulse low-angle tracking algorithm with array radars. J Nat Univ Def Tech, 2015, 37: 130–135 [徐振海, 熊子源, 宋聃, 等. 阵列雷达双零点单脉冲低角跟踪算法. 国防科技大学学报, 2015, 37: 130–135]

8 Wang L S B, Xu Z H, Liu X H, et al. Angular estimation of group targets using adaptive multi-null monopulse for array radar. J Nat Univ Def Tech, 2019, 41: 1–6 [王罗胜斌, 徐振海, 刘兴华, 等. 阵列雷达自适应多零点单脉冲群目标测角算法. 国防科技大学学报, 2019, 41: 1–6]

9 Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. In: Proceedings of RADC Spectral Estimation Workshop, Rome, 1979

10 Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing, 1989, 37: 984–995

11 Carlin M, Rocca P, Oliveri G, et al. Directions-of-arrival estimation through bayesian compressive sensing strategies. IEEE Trans Antenn Propagat, 2013, 61: 3828–3838

12 Alonso M T, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2010, 48: 4285–4295

13 Yang J, Kang Y, Zhang Y, et al. A Bayesian angular superresolution method with lognormal constraint for sea-surface target. IEEE Access, 2020, 8: 13419–13428

14 Lin M T. Study of radio electromagnetics vortex generation and application research. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2018 [林铭团. 电磁波涡旋的产生方法及应用研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2018]

15 Wang X S. Study on wideband polarization information processing. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 1999 [王雪松. 宽带极化信息处理的研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 1999]

16 Shi L F, Ren B, Ma J Z, et al. Recent developments of radar anti-interference techniques with polarimetry. Modern Radar, 2016, 38: 1–7, 29 [施龙飞, 任博, 马佳智, 等. 雷达极化抗干扰技术进展. 现代雷达, 2016, 38: 1–7, 29]

17 Wang X S. Status and prospects of radar polarimetry techniques. J Radar, 2016, 5: 119–131 [王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望. 雷达学报, 2016, 5: 119–131]

18 Wang X S, Chen S W. Polarimetric synthetic aperture radar interpretation and recognition: advances and perspectives. J Radar, 2020, 9: 259–276 [王雪松, 陈思伟. 合成孔径雷达极化成像解译识别技术的进展与展望. 雷达学报, 2020, 9: 259–276]

19 Novak L M, Halversen S D, Owirka G, et al. Effects of polarization and resolution on SAR ATR. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1997, 33: 102–116

20 Li Z H, Chang W, Yang J. Ship detection based on super-resolution polarimetric SAR images. Sys Engin Electron, 2015, 37: 1773–1777 [李增辉, 常雯, 杨健. 基于超分辨极化 SAR 图像的舰船检测算法. 系统工程与电子技术. 2015, 37: 1773–1777]

21 Wang S L, Xu Z H, Dong W, et al. A scheme of polarimetric superresolution for multitarget detection and localization. IEEE Signal Process Lett, 2021, 28: 439–443

22 Xu Z H, Wang L S B, Xiong Z Y. Influence of relative phase on radar resolutions. J Electr Electron Eng Educ, 2015, 37: 1–2, 53 [徐振海, 王罗胜斌, 熊子源. 相位差对雷达分辨的影响. 电气电子教学学报, 2015, 37: 1–2, 53]

附录 A 全极化域距离像的推导

在式 (15) 中, 与极化椭圆几何描述子有关的项为 $|g_1|^2$, $|g_2|^2$ 以及 $\mathrm{Re}\{g_1 g_2^*\}$, 将式 (15) 代入式 (16), 可得

$$\begin{aligned}\Gamma =&\bar{A}_1^2\mathrm{sinc}^2(t_1)\cdot\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}|g_1|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R+\bar{A}_2^2\mathrm{sinc}^2(t_2)\cdot\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}|g_2|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R\\&+2\bar{A}_1\bar{A}_2\cos\Delta\bar{\varphi}\mathrm{sinc}(t_1)\mathrm{sinc}(t_2)\cdot\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{Re}\{g_1g_2^*\}\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R.\end{aligned}\tag{A1}$$

令 $\boldsymbol{h}_T=[h_{T_1},h_{T_2}]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{h}_R=[h_{R_1},h_{R_2}]^{\mathrm{T}}$, 则有

$$\begin{aligned}|g_1|^2=&\left|h_{R_1}\right|^2\left|h_{T_1}\right|^2\left|s_{11}^{(1)}\right|^2+\left|h_{R_1}h_{T_2}+h_{R2}h_{T1}\right|^2\left|s_{12}^{(1)}\right|^2+\left|h_{R_2}\right|^2\left|h_{T_2}\right|^2\left|s_{22}^{(1)}\right|^2\\&+2\mathrm{Re}\left\{h_{R_1}^*h_{T_1}^*\left(h_{R_1}h_{T_2}+h_{R_2}h_{T_1}\right)s_{11}^{(1)*}s_{12}^{(1)}\right\}+2\mathrm{Re}\left\{h_{R_2}^*h_{T_2}^*\left(h_{R_1}h_{T_2}+h_{R_2}h_{T_1}\right)s_{22}^{(1)*}s_{12}^{(1)}\right\}\\&+2\mathrm{Re}\left\{h_{R_1}^*h_{T_1}^*h_{R_2}h_{T_2}s_{11}^{(1)*}s_{22}^{(1)}\right\}.\end{aligned}\tag{A2}$$

进一步, 对 $\left|h_{R_1}\right|^2\left|h_{T_1}\right|^2$ 进行四重积分:

$$\begin{aligned}&\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left|h_{R_1}\right|^2\left|h_{T_1}\right|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R\\&=\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left|h_{R_1}\right|^2\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R\cdot\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left|h_{T_1}\right|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\\&=\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left(\cos^2\phi_R\cos^2\tau_R+\sin^2\phi_R\sin^2\tau_R\right)\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R\cdot\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left(\cos^2\phi_T\cos^2\tau_T+\sin^2\phi_T\sin^2\tau_T\right)\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\\&=\frac{\pi^2}{4}\cdot\frac{\pi^2}{4}\\&=\frac{\pi^4}{16}.\end{aligned}\tag{A3}$$

同理亦有, $\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left|h_{R_1}\right|^2\left|h_{T_1}\right|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R=\frac{\pi^4}{16}$. 另外, 对 $\left|h_{R_1}h_{T_2}+h_{R2}h_{T1}\right|^2$ 进行四重积分:

$$\begin{aligned}&\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left|h_{R_1}h_{T_2}+h_{R2}h_{T1}\right|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R\\&=\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\left|h_{R_1}h_{T_2}\right|^2+|h_{R2}h_{T1}|^2+2\mathrm{Re}\{h_{R_1}^*h_{T_1}^*h_{R_2}h_{T_2}\}\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R\\&=\frac{\pi^4}{16}+\frac{\pi^4}{16}+0\\&=\frac{\pi^4}{8},\end{aligned}\tag{A4}$$

其中, $\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{Re}\{h_{R_1}h_{R_2}^*\}\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R=0$, $\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\mathrm{Re}\{h_{T_1}h_{T_2}^*\}\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R=0$.

将式 (A3) 和式 (A4) 代入式 (A2) 可得

$$\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}|g_1|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R=\frac{\pi^4}{16}\left|s_{11}^{(1)}\right|^2+\frac{\pi^4}{16}\left|s_{22}^{(1)}\right|^2+\frac{\pi^4}{8}\left|s_{12}^{(1)}\right|^2.\tag{A5}$$

同理有

$$\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}|g_2|^2\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R=\frac{\pi^4}{16}\left|s_{11}^{(2)}\right|^2+\frac{\pi^4}{16}\left|s_{22}^{(2)}\right|^2+\frac{\pi^4}{8}\left|s_{12}^{(2)}\right|^2.\tag{A6}$$

另外, 将 $g_1g_2^*$ 展开:

$$\begin{aligned}g_1g_2^*=&\left|h_{R_1}\right|^2\left|h_{T_1}\right|^2s_{11}^{(1)*}s_{11}^{(2)*}+\left|h_{R_1}h_{T_2}+h_{R2}h_{T1}\right|^2s_{12}^{(1)}s_{12}^{(2)*}+\left|h_{R_2}\right|^2\left|h_{T_2}\right|^2s_{22}^{(1)}s_{22}^{(2)*}\\&+2\mathrm{Re}\left\{h_{R_1}^*h_{T_1}^*\left(h_{R_1}h_{T_2}+h_{R_2}h_{T_1}\right)s_{11}^{(1)*}s_{12}^{(2)}\right\}+2\mathrm{Re}\left\{h_{R_2}^*h_{T_2}^*\left(h_{R_1}h_{T_2}+h_{R_2}h_{T_1}\right)s_{22}^{(1)*}s_{12}^{(2)}\right\}\\&+2\mathrm{Re}\left\{h_{R_1}^*h_{T_1}^*h_{R_2}h_{T_2}s_{11}^{(1)*}s_{22}^{(2)}\right\}.\end{aligned}\tag{A7}$$

进而, 对式 (A7) 进行四重积分:

$$\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}|\mathrm{Re}(g_1g_2^*)|^2\,\mathrm{d}\phi_T\mathrm{d}\tau_T\mathrm{d}\phi_R\mathrm{d}\tau_R=\frac{\pi^4}{16}\mathrm{Re}\left\{s_{11}^{(1)}s_{11}^{(2)*}+s_{22}^{(1)}s_{22}^{(2)*}+2s_{12}^{(1)}s_{12}^{(2)*}\right\}. \tag{A8}$$

将式 (A5), (A6) 和式 (A8) 代入式 (A1), 可将全极化域距离像简化为

$$\begin{aligned}\Gamma(t)=&\frac{\pi^4}{16}\left(|s_{11}^{(1)}|^2+2|s_{12}^{(1)}|^2+|s_{22}^{(1)}|^2\right)\bar{A}_1^2\mathrm{sinc}^2(t_1)+\frac{\pi^4}{16}\left(|s_{11}^{(2)}|^2+2|s_{12}^{(2)}|^2+|s_{22}^{(2)}|^2\right)\bar{A}_2^2\mathrm{sinc}^2(t_2)\\&+\frac{\pi^4}{8}\mathrm{Re}\left\{s_{11}^{(1)}s_{11}^{(2)*}+2s_{12}^{(1)}s_{12}^{(2)*}+s_{22}^{(1)}s_{22}^{(2)*}\right\}\bar{A}_1\bar{A}_2\cos\Delta\bar{\varphi}\mathrm{sinc}(t_1)\mathrm{sinc}(t_2).\end{aligned} \tag{A9}$$

Principle and approach to polarization modulation for radar super-resolution

Luoshengbin WANG*, Xuesong WANG* & Zhenhai XU

State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410037*, China*

* Corresponding author. E-mail: wangluoshengbin@nudt.edu.cn, wxs1019@vip.sina.com

Abstract As a classical topic in the radar field, radar resolution theory has been developing for decades. However, the fact that the radar fails to resolve multiple closely spaced targets is increasingly prominent in various applications. The theory of ambiguity function occupies a very important place in the research on radar resolution. Meanwhile, many super-resolution theories trying to break through the Rayleigh resolution limit are being proposed. Though these super-resolution approaches are partially effective, their practical use is limited because of the presupposition. The traditional resolution theory ignores the polarization of the electromagnetic field. Polarization enables radars to have super-resolution capacity. The research on the relationship between polarization and resolution has major theoretical significance. In this paper, we analyze the effect of amplitude and phase on resolution. It is known that optimal resolution can be achieved with equal amplitude and opposed phase. On this basis, we present an innovative polarimetric zoom theory for radar super-resolution. Based on radar polarization modulation, the principle of super-resolution is presented by introducing the concept of a full-polarization domain range profile. Additionally, we design an algorithm for multitarget detection and estimation using polarimetric zoom. Each target can be successfully detected and precisely measured. Finally, the simulation results demonstrate that the proposed approach is not sensitive to cross-polarization, and the resolution power can be improved by 20 times at high SNR.

Keywords polarization modulation, radar superresolution, ambiguity function, polarimetric zoom theory, full-polarization domain range profile