

采用子阵多输入多输出的天基预警雷达 强杂波抑制方法

周贺, 吴建新, 张磊

(中山大学电子与通信工程学院, 518107, 广东深圳)

摘要: 针对天基预警雷达因其高速平台运动带来严重的距离模糊和多普勒模糊, 导致杂波背景强进而降低雷达目标检测性能的问题, 提出一种基于子阵级多输入多输出天基预警雷达强杂波抑制方法。构建基于子阵级多输入多输出天基雷达模型并分析远距离机动目标相参性, 确定目标出现线性距离徙动和不出现多普勒频率扩散时的最大相参积累时间, 以保证长时间相参积累可行性; 针对多输入多输出雷达长驻留的特点采用长时间积累提高多普勒分辨率, 降低一个距离-多普勒单元的杂波功率, 在保证搜索效率的情况下降低该单元杂噪比, 并采用 3/5 准则检测盲区图评估天基雷达检测性能; 在强杂波背景下改善了信杂噪比, 提高了目标检测概率。实验仿真表明, 所提方法相比相控阵雷达可有效降低杂波背景, 在单脉冲重复频率下即可达到很好的检测效果, 比相控阵雷达检测性能提高约 20.48%。

关键词: 多输入多输出; 天基预警雷达; 目标相参性; 长时间积累

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202404016 **文章编号:** 0253-987X(2024)04-0170-12

A Strong Clutter Suppression Method for Space-Based Early Warning Radar Using Subarray Multiple Input Multiple Output

ZHOU He, WU Jianxin, ZHANG Lei

(School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Shengzhen, Guangdong 518107, China)

Abstract: A method for strong clutter suppression in space-based early warning radar based on subarray-level multiple-input multiple-output (MIMO) is proposed to address the problem of severe distance blur and Doppler blur caused by the high-speed platform motion of space-based early warning radar, which leads to strong clutter background and reduced radar target detection performance. Initially, a subarray-level MIMO-based space-based radar model is constructed and the phase parameterization of the long-range maneuvering target is analyzed to determine the maximum phase parameter accumulation time when the target has linear distance migration and does not have Doppler frequency spread, ensuring the feasibility of long-time phase parameter accumulation. Subsequently, based on the characteristics of the MIMO radar's long dwell time, long-time accumulation is adopted to improve the Doppler resolution, reduce the clutter power of a distance-Doppler unit, lower the clutter-to-noise ratio (CNR) of the unit while ensuring the search efficiency, and evaluate the detection performance of the space-based radar by using the

收稿日期: 2023-09-27。 作者简介: 周贺(1995—), 男, 博士生; 吴建新(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62101603, 62201623); 广东省自然科学基金资助项目(2021A1515011979)。

网络出版时间: 2023-12-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231211.1042.002>

3/5 criterion detection blind map. Ultimately, the signal-to-clutter noise ratio (SCNR) is improved in a strong clutter background, and the probability of target detection is increased. The experimental simulation shows that the proposed method can effectively reduce the clutter background compared with the phased array radar and can achieve a good detection effect under the single pulse repetition frequency. The detection performance is improved by about 20.48% compared with that of the phased array radar.

Keywords: multiple-input multiple-output; space-based early warning radar; target coherence; long time accumulation

近几十年来,天基预警雷达系统凭借平台高度优势及更高的机动特性和更宽的探测范围,在交通监测、气象监测等方面得到了广泛应用^[1-6]。然而,天基雷达高平台意味着需对机动目标进行远距离观测,平台高速运动容易出现严重的多普勒模糊、距离模糊和低信杂噪比(signal to clutter noise ratio, SCNR)等问题^[7-8],这将导致杂波呈现复杂非平稳特性,使得用于估计杂波协方差矩阵的独立同分布(independent and identical distribution, IID)训练样本数严重不足,进而导致传统空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP)方法性能无法满足实际应用需求^[9-12]。

长时间积累技术能有效提高回波信噪比(signal to noise ratio, SNR),是提高雷达机动目标检测能力的一种有效方法。长时间相参积累(long-time coherent integration, LTCI)^[13]同时利用信号幅度和相位信息,实现快时间和慢时间维联合积累以获得更高积累增益,但在较长积累时间内,可能会出现复杂距离徙动和多普勒频率扩散现象,影响积累效果。另外,传统体制雷达多为高增益窄波束模式,无法保证足够有效长积累时间,限制了长时积累技术的发展和运用。

近年来,多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)雷达体制因其波形分集具有较高空间自由度受到工程及科研人员的广泛关注,在波形设计、参数估计和目标检测等方面涌现了大量研究成果^[14-18]。MIMO雷达其中一个重要优势在于发射固定波束因此不需要对空间进行扫描,波束范围内同一目标被照射时间大大延长,这为长时间相参积累提供了足够的时间保障。另外,相控阵MIMO新体制雷达(也称子阵级MIMO雷达)^[19]结合MIMO雷达和相控阵雷达优点,将系统发射阵列划分为多个子阵,每个子阵向空间目标发射正交信号形成虚拟孔径扩展,提高了目标探测能力。子阵内发射相干信号,提高雷达功率利用率和接

收端信噪比,进而提高雷达系统目标检测和参数估计性能。

针对上述天基预警雷达存在严重距离模糊和多普勒模糊导致杂波背景强,且传统STAP方法已无法适用的问题:本文首先分析天基雷达下变加速机动目标相参性,即确定不发生多普勒频率扩散和只具有线性距离徙动的最大相参积累时间;然后,针对子阵级MIMO雷达长驻留的特点采用长时间积累技术提高信噪比;同时,提高多普勒分辨率,降低一个距离-多普勒单元的杂波功率,进而降低该单元杂噪比(clutter to noise ratio, CNR),并采用3/5准则检测盲区图评估天基雷达检测性能;最终,改善输出信杂噪比,从而提高天基雷达目标检测概率。

1 子阵级MIMO天基雷达模型

1.1 信号模型

假设天基子阵级MIMO雷达收、发阵元数分别为 N 和 M ,并将 M 个发射阵元均匀划分为 K 个子阵,每个子阵有 L 个发射阵元,子阵内间距为 $d = \lambda/2$ (λ 为工作波长),则子阵间间距为 LD ,如图1所示。同一子阵阵元发射相同窄带波形,第 k 个子阵发射波形为 $s_k(t)$,发射信号矢量可写为

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_k(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (1)$$

不同子阵间发射信号应满足正交条件,即发射信号的自相关矩阵为单位阵

$$\int \mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H dt = \mathbf{I}_K \quad (2)$$

第 n 个接收阵元接收到的位于 θ_0 方向的远场目标回波信号为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a} \mathbf{b}^T(\theta_0) \mathbf{s}(t - \tau) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 、 $\mathbf{b}(\theta_0)$ 、 $\mathbf{n}(t)$ 分别表示雷达接收信号矢量、目标发射导向矢量、接收导向矢量及噪声矢量,表达式分别如下

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{a}(\theta_0) = [1, e^{-j\theta_0}, \dots, e^{-j(M-1)\theta_0}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{b}(\theta_0) = [1, e^{-j\phi}, \dots, e^{-j(N-1)\phi}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T \quad (7)$$

$\mathbf{n}(t)$ 可建模为均值 0、协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的高斯白

噪声^[20]; $\phi_0 = L(2\pi d \sin \theta_0)/\lambda$ 为子阵间空间相位差; $\phi = (2\pi d \sin \theta_0)/\lambda$ 为接收阵元空间相位差; τ 为总时延。

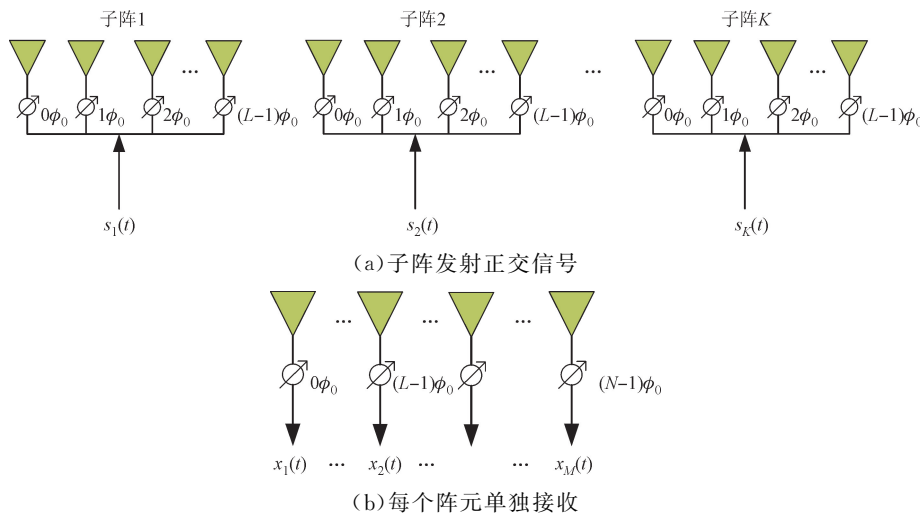


图 1 子阵级 MIMO 雷达收发阵元示意

Fig. 1 Sub-array level MIMO radar transceiver element schematic

1.2 子阵级 MIMO 雷达信噪比分析

根据雷达方程, 子阵级 MIMO 雷达全阵列目标

功率为 $P_M = \frac{(P_a/K)T_a G_t G_r \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 (R_t R_r)^2}$, 则对应信噪比为

$$I_{\text{SNR}, M} = \frac{(P_a/K)T_a G_t G_r \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 (R_t R_r)^2 k T_0 F_n L_s} \quad (8)$$

式中: P_a 为天基雷达发射平均功率, 由于发射阵列均分为 K 个子阵, 则每个子阵发射功率为 P_a/K ; T_a 为相干积累时间; G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线增益; σ_0 为目标截面积; R_t 及 R_r 分别为发射机和接收机到目标的距离; k 为玻尔兹曼常数; T_0 为标准温度; F_n 为噪声系数; L_s 为雷达系统损耗。

具有相同阵列形式的相控阵雷达全阵列接收信号信噪比可表示为

$$I_{\text{SNR}, P} = \frac{P_a T_a G_t G_r \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 (R_t R_r)^2 k T_0 F_n L_s} \quad (9)$$

比较式(8)和式(9), 得到

$$\frac{I_{\text{SNR}, M}}{I_{\text{SNR}, P}} = \frac{1}{K} \quad (10)$$

由此可知, 子阵级 MIMO 雷达输出信噪比仅为相控阵雷达的 $1/K$, 在其他参数不变情况下, 需要 K 倍的相参脉冲积累才能达到和相控阵雷达相同输出信噪比。

2 远距离机动目标相参性分析

因天基平台高速运动及采用长时间相参积累, 目标极易发生距离徙动和多普勒频率扩散, 本节将

讨论目标出现线性距离徙动及不发生多普勒频率扩散现象的最大相参积累时间。

图 2 为天基平台与机动目标在斜距平面内的几何结构, A 为目标初始位置, B 为经过一段时间后目标位置, 平台运动速度为 v , 目标的方位向速度和径向速度分别为 v_a 和 v_c , a_a 和 a_c 分别表示目标的方位向加速度和径向加速度, R_0 表示天基雷达到目标最近斜距。一个相干脉冲积累时间内雷达发射的脉冲数为 Q , 雷达的脉冲重复周期为 T_r , 则积累时间 $T_a = QT_r$, 并假定在积累时间内天基平台运动速度、目标的方位向速度、径向速度、方位向加速度均保持不变。

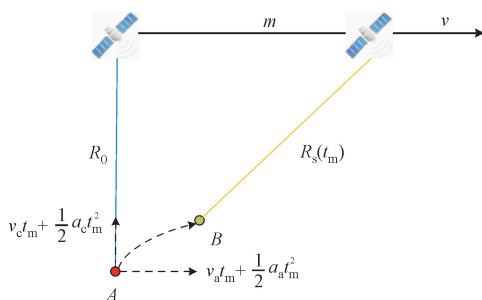


图 2 天基平台和机动目标在斜距平面内的几何结构

Fig. 2 Geometry of space-based platforms and maneuvering targets in the oblique distance plane

由图 2 可知, 天基平台和机动目标的瞬时斜距可表示为

$$R(t_m) =$$

$$\sqrt{(\mathcal{U}t_m - v_a t_m - \frac{1}{2}a_a t_m^2)^2 + (R_0 - v_c t_m - \frac{1}{2}a_c t_m^2)^2} \quad (11)$$

式中: $t_m = qT_r$ ($q = 0, 1, \dots, Q-1$) 为慢时间变量。对瞬时斜矩在 $t_m = 0$ 处进行泰勒展开

$$R_s(t_m) = R_0 + a_1 t_m + a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 + \dots \quad (12)$$

$$a_1 = -v_c \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{(v - v_a)^2}{2R_0} - \frac{a_c}{2} \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{v_c(v - v_a)^2}{2R_0^2} + \frac{a_a(v_a - v)}{2R_0} \quad (15)$$

式(13)~(15)分别表示天基平台与目标之间的速度、加速度和第二加速度。

假设子阵级 MIMO 雷达子阵内第 l 个阵元发射窄带线性调频信号为

$$s_l = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi\mu t^2) \exp(j2\pi f_c t) \quad (16)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T_p}{2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: rect 是矩形窗函数; T_p 和 f_c 分别为脉冲宽度和载频; μ 为距离调频率。

第 n 个接收阵元收到的基带信号可表示为

$$s_{r,l}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp(j\pi\mu(t - \tau)^2) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_s(t_m)}{\lambda}\right) \exp(-j(l-1)\phi) \quad (18)$$

式中: 传输总时延 $\tau = \frac{2R_s(t_m)}{c}$, c 为光速。对式(18)进行脉冲压缩

$$s_{r,l}(t, t_m) = A_p \text{sinc}\left(B\left(t - \frac{2(R_0 + a_1 t_m + a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 + \dots)}{c}\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi a_1 t_m}{\lambda}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi(a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 + \dots)}{\lambda}\right) \exp(-j(l-1)\phi) \quad (19)$$

式中: A_p 和 B 分别为脉压后的回波幅度和信号带宽; 信号包络 $\text{sinc}(\cdot)$ 为辛格函数。指数项中的第二项与目标等效速度有关, 会引起多普勒中心偏移, 第3项与目标等效加速度有关, 将会导致多普勒频率扩展。因此, 第3项指数项中偏移量 ($\Delta r = a_2 t_m^2 + a_3 t_m^3 + \dots$) 不能超过波长的一半, 即

$$\Delta r = R_s(t_m) - R_0 - a_1 t_m \leq \lambda/2 \quad (20)$$

由式(19)和式(20)可知, 当积累时间不断增加, 回波包络位置变化量超过距离分辨率时, 只发生线性距离徙动, 可通过 Keystone 变换^[21] 对其进行矫正。

为了实现天基雷达机动目标良好相参积累, 在某一瞬时斜矩和目标等效速度下, 子阵级 MIMO 天基雷达应存在一个最大允许相干积累时间 T_m , 在所允许相干积累时间内直接进行傅里叶变换将不会出现多普勒频率扩展现象。

3 长时间相参累积降低距离多普勒单元杂噪比原理

由第2节可知, 当相干积累时间不超过 T_m , 机动目标可用一阶运动模型描述, 此时采用长时间积累技术可提高多普勒分辨率, 进而降低一个距离多普勒单元的杂噪比, 最终通过提高信杂噪比来改善目标检测性能。

具体地, 对于信号带宽为 B 、积累时间为 T_a 的天基雷达, 其距离分辨率为 $\Delta R = c/2B$, 多普勒分辨率可近似表述为 $\Delta f_d = 1/T_a$ ^[22]。由此可看出, 随着积累时间的不断增加多普勒分辨率越来越高。已知某一距离-多普勒杂波单元的俯仰角和方位角分别为 φ_i 和 θ_i , 几何关系如图3所示。 H 为天基雷达轨道高度, R_e 为地球半径, $R_s(t_m)$ 为天基平台某一距离-多普勒单元 D 的瞬时斜矩, φ_g 为擦地角。

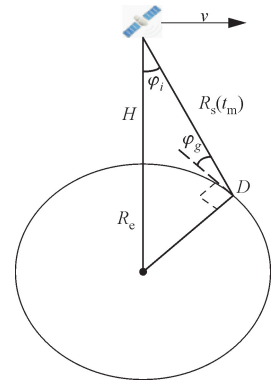


图3 天基平台和某一距离-多普勒单元几何关系

Fig. 3 Space-based platform and geometric relation of a certain range-Doppler element

假设天基雷达工作在正侧阵构型, 此时多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos\theta_i \cos\varphi_i \quad (21)$$

对上式两边求微分可得

$$\Delta f_d = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta_i \cos \varphi_i \Delta \theta_i \quad (22)$$

当 $\sin \theta_i = 1$ 时,可获得最大多普勒通道

$$\Delta \theta_i = \frac{\lambda}{2vT_a \cos \varphi_i} \quad (23)$$

对于某一距离-多普勒杂波单元,有效截面积可表示为

$$\sigma_i = \frac{\sigma_v R_s(t_m) \Delta R \Delta \theta_i}{\sqrt{1 - (\sin \varphi_g)^2}} \quad (24)$$

式中: σ_v 为后向散射系数。

此时,天基雷达收到该距离-多普勒单元杂波功率可写为

$$P_D = \frac{P_a G_t G_r \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 (R_t R_r)^2 L_s} \quad (25)$$

输出噪声功率可表示为

$$P_n = kT_0 B F_n \quad (26)$$

则该距离-多普勒单元杂噪比可表示为

$$I_{\text{CNR},i} = \frac{P_D}{P_n} = \frac{P_a G_t G_r \lambda^2 T_a \sigma_i}{(4\pi)^3 (R_t R_r)^2 kT_0 F_n L_s} \quad (27)$$

由式(27)可知,在其他参数确定情况下,随着积累时间不断增加,单个距离-多普勒单元有效截面积不断减小,导致到达天基雷达杂波功率下降,进而降低单个距离-多普勒单元的杂噪比,最终增加信杂噪比提高目标检测概率。

4 天基雷达系统检测性能评估

检测盲区图是一种可评估雷达系统性能好坏的有效方法^[23],所谓检测盲区图是指距离-速度二维平面,图中每个点只有0和1两种值分别代表没有检测到目标和可以检测到目标。对于某一距离和某一速度的目标,可以从检测盲区图中直接看出其是否能被检测到。天基雷达在进行目标检测时可采用多脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF)联合检测方法提高检测性能,本文采用3/5准则检测,即天基雷达在一个波位处连续发射多组PRF相干脉冲,若有3组或3组以上可以检测到同一距离同一径向速度处的目标,则认为该位置存在目标。

图4为多PRF下检测盲区图形成过程^[24]。图中: P_d 为检测概率; P_{fa} 为虚警概率。给定雷达系统参数,对于特定目标散射横截面积,在子阵级MIMO天基雷达系统下,式(8)已给出目标信噪比随距离变化关系,而理论计算的整个杂波场景下某一距离-多普勒单元杂噪比可表示为

$$I_{\text{CNR},i} = \frac{(P_a/K) G_t G_r \lambda^2 T_a \sigma_i}{(4\pi)^3 (R_t R_r)^2 kT_0 F_n L_s} \quad (28)$$

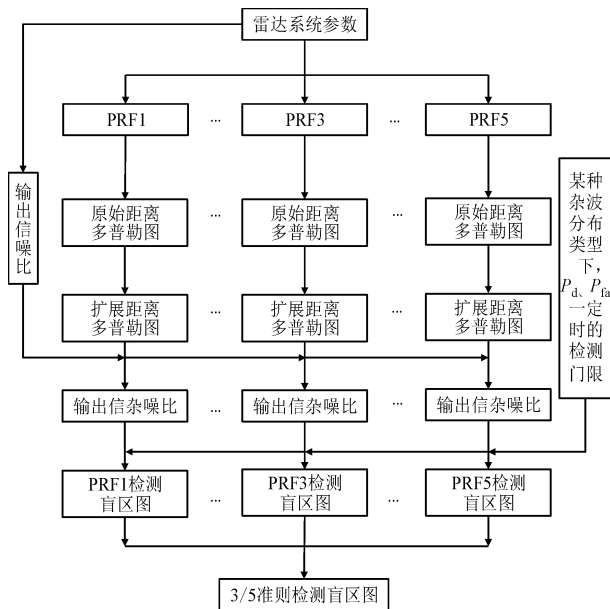


图4 多PRF下检测盲区图形成过程

Fig. 4 The formation process of detecting the blind area map under multiple PRFs

原始距离多普勒单元的杂噪比是在理论计算整个杂波场景杂噪比基础上通过距离、多普勒模糊折叠并相加得到。

对于扩展距离多普勒图即为原始距离多普勒图根据距离模糊和速度模糊次数分别在距离和多普勒维扩展的杂噪比图。设目标的探测距离范围是 $R_t \in [0, R_{\max}]$, 目标的探测速度范围为 $v_t \in [-v_m, v_m]$ 。雷达系统的最大不模糊距离为 R_u , 某一组PRF为 $f_{r,j}$, 则对于斜距为 R_t 、速度为 v_t 的目标, 其在原始距离多普勒图坐标可表示为 $(\text{mod}(2v/\lambda f_{r,j}, 1), \text{mod}(R_t, R_u))$, 从而可以得到与该目标竞争的杂噪比为 $(I_{\text{CNR},i}(\text{mod}(R_t, R_{u,j}), \text{mod}(f_d/f_{r,j}, 1)))$, 将该杂噪比代入扩展距离多普勒图中, 可得

$$I_{\text{CNR},i}(v_t, R_t) = I_{\text{CNR},i}(\text{mod}(2v_t/(\lambda f_{r,j}), 1), \text{mod}(R_t, R_{u,j})) \quad (29)$$

根据输出信噪比和扩展杂噪比, 可得输出信杂噪比

$$I_{\text{SCNR}(R_t, v_t)} = \frac{P_M}{P_D + P_n} = \frac{I_{\text{SNR},M}}{I_{\text{CNR},i} + 1} \quad (30)$$

比较输出信杂噪比和检测门限, 可得单PRF下检测盲区图, 图中像素值为

$$Z_j(R_t, v_t) = \begin{cases} 1, & \frac{I_{\text{SCNR}(R_t, v_t)}}{\xi} \geq 1 \\ 0, & \frac{I_{\text{SCNR}(R_t, v_t)}}{\xi} < 1 \end{cases} \quad (31)$$

式中: ξ 为检测门限,需由检测概率、虚警概率和信杂噪比三者之间的关系来确定^[25]。根据 3/5 检测准则,得到检测盲区图,图中像素值为

$$Z(R_l, v_t) = \begin{cases} 1, & \sum_{j=1}^5 Z_j(R_l, v_t) \geq 3 \\ 0, & \sum_{j=1}^5 Z_j(R_l, v_t) < 3 \end{cases} \quad (32)$$

5 实验仿真分析

本节将探究天基雷达下远距离机动目标线性距离徙动和不出现多普勒频率扩散现象的条件,验证子阵级 MIMO 天基预警雷达可通过长时间积累提高信噪比,分析 MIMO 天基雷达长时间积累杂噪比及检测性能。假设天基 MIMO 雷达系统工作在正侧阵构型下,其具体系统参数如表 1 所示。

表 1 天基 MIMO 雷达系统仿真参数

Table 1 Simulation parameter of space-based MIMO radar system

仿真参数	数值
轨道高度/km	632.589
载波频率/GHz	1
平台速度/(m·s ⁻¹)	7 540
发射峰值功率/kW	100
带宽/MHz	1
发射、接收阵元数	1 500
子阵数	10
阵元间隔/m	0.15
脉冲重复频率/Hz	3 150, 3 500, 3 700 4 100, 4 300
目标截面积/m ²	50
方位向速度/(m·s ⁻¹)	100
径向速度/(m·s ⁻¹)	100
方位加速度/(m·s ⁻²)	-10
径向加速度/(m·s ⁻²)	10

5.1 机动目标相参性分析

探究天基雷达下远距离机动目标线性距离徙动和不出现多普勒频率扩散现象条件。在图 2 天基平台和机动目标几何场景下,图 5 给出了相干积累时间、雷达最大探测距离和偏移量的关系。由图 5 可知,在其他雷达参数确定下,偏移量会随着最大探测距离不断增大和相干积累时间不断减小而越来越小。其中,红线表示满足条件的临界值,红线上半部分为符合条件的相干积累时间和最大探测距离所在

区域。例如,当天基雷达探测距离为 2 000 km 时,所允许最大相干积累时间为 0.136 s,即机动目标在 2 000 km 内且相干积累时间不超过 0.136 s 就不会出现多普勒频率扩散现象。

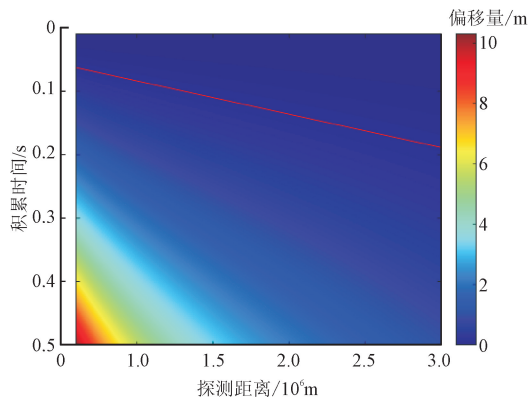
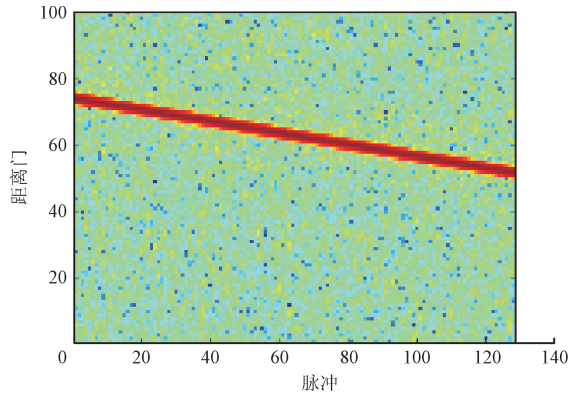
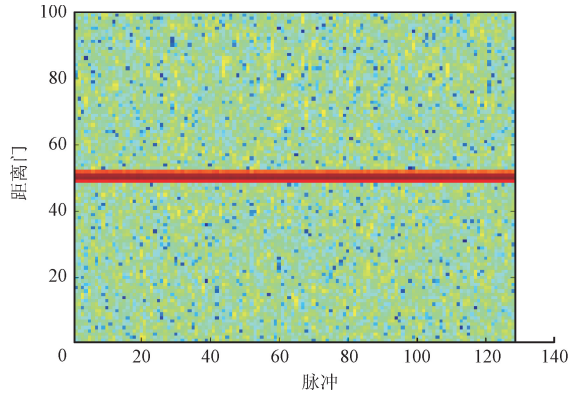


图 5 相干积累时间、雷达最大探测距离和偏移量的关系
Fig. 5 Relationship between coherent accumulation time, maximum radar detection distance and offset

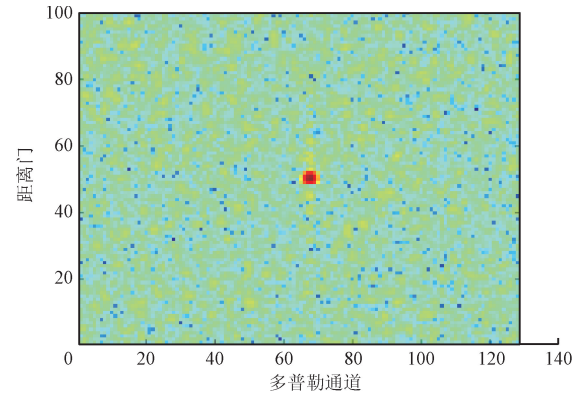
图 6(a)为积累时间不超过 T_m 时目标发生线性距离徙动,图 6(b)为 Keystone 变换对线性距离徙动进行校正,图 6(c)为脉冲多普勒(pulse Doppler, PD)处理后的目标,说明并未发射多普勒频率扩散现象,证明了采用长时间积累的可行性。



(a)目标线性距离徙动



(b)Keystone 校正

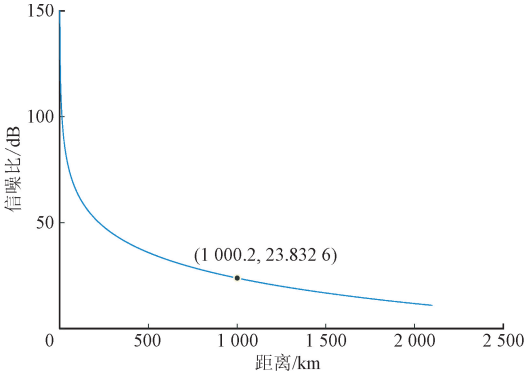


(c)PD 处理

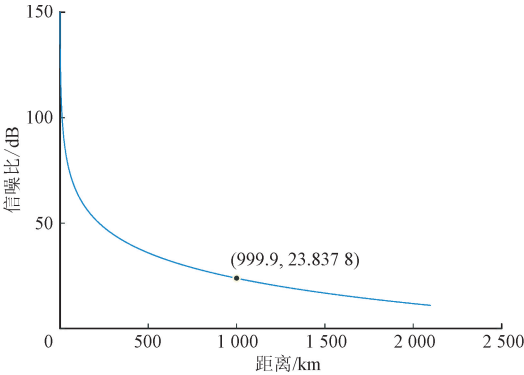
图 6 目标发生线性距离徙动和不发生多普勒频率扩散情况
Fig. 6 Targets undergo linear distance migration and do not emit Doppler frequency dispersion

5.2 MIMO 雷达通过长时间积累提高信噪比

为了便于比较,设定相控阵具有相同的阵列构型。由图 7 可知,两种模式下输出信噪比均随雷达探测距离不断增大而逐渐减小,但子阵级 MIMO 模式下需更长相干积累时间才能达到同相控阵相似的输出信噪比,且积累时间倍数恰好为均匀划分子阵个数,这符合式(10)中的理论推导。



(a)相控阵模式,相干积累时间 0.01 s



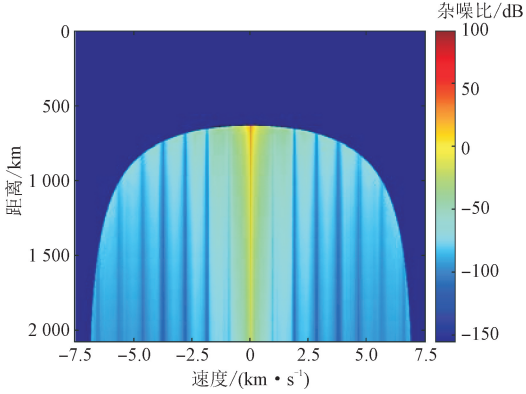
(b)子阵级 MIMO 模式,相干积累时间 0.1 s

图 7 输出信噪比随雷达探测距离变化曲线

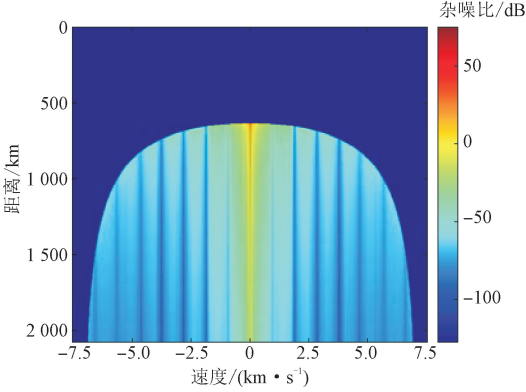
Fig. 7 The output signal to noise ratio varies with the detection distance of radar

5.3 子阵级 MIMO 天基雷达长时间积累 CNR 分析

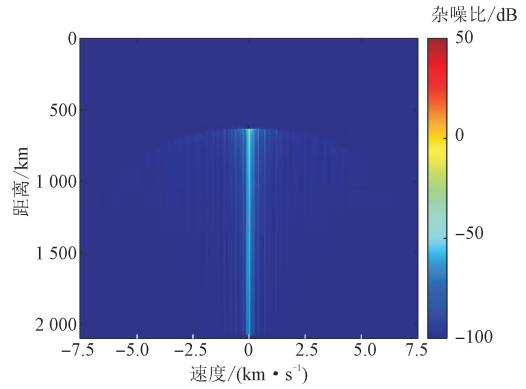
图 8 为理论计算的整个杂波场景在距离速度平面上的杂噪比图。其中,图 8(c)子阵级 MIMO 模式相干积累时间为 0.1 s,相较图 8(a)相控阵模式和图 8(b)文献[10]中传统 STAP 方法且相干积累时间 0.01 s 时输出杂噪比更低,由于天基雷达杂波严重的距离模糊和多普勒模糊导致 STAP 性能下降。为了进一步说明,图 9 展示了 3 种方法在 0 速度和 1 500 km 距离下输出 CNR 随探测距离和速度变化曲线,本文所提方法比相控阵模式和相控阵 STAP 处理具有更低的输出 CNR,证明了本文采用长时间积累降低天基 MIMO 雷达输出 CNR 可行性及有效性。



(a)相控阵模式,相干积累时间 0.01 s



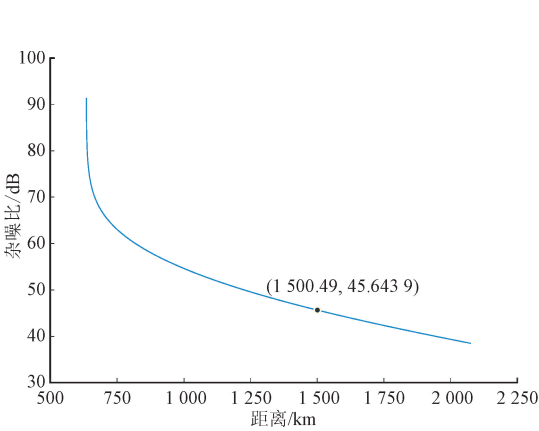
(b)相控阵 STAP 处理,相干积累时间 0.01 s



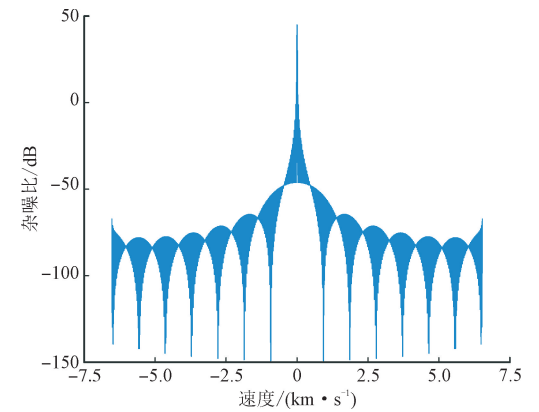
(c)子阵级 MIMO 模式,相干积累时间 0.1 s

图 8 距离-速度杂噪比图

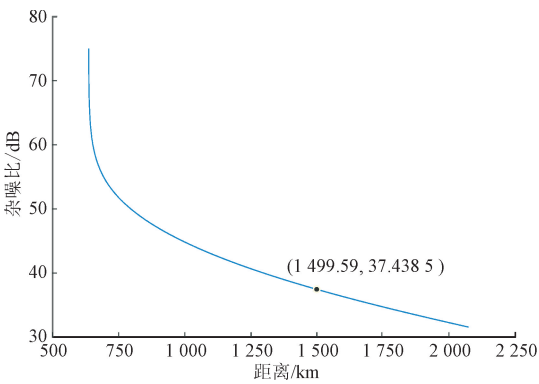
Fig. 8 Distance-velocity clutter to noise ratio graph



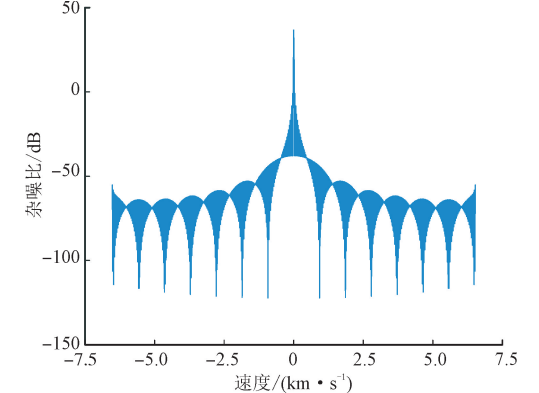
(a)相控阵模式,CNR 随距离变化曲线



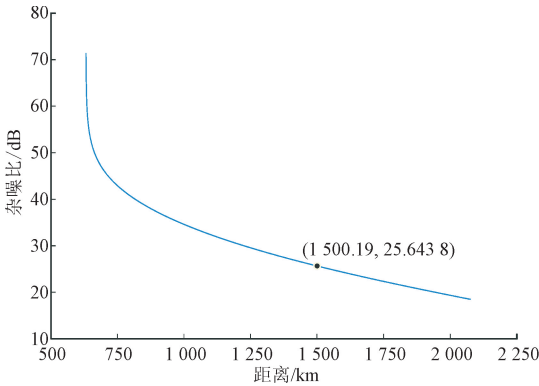
(b)相控阵模式,CNR 随速度变化曲线



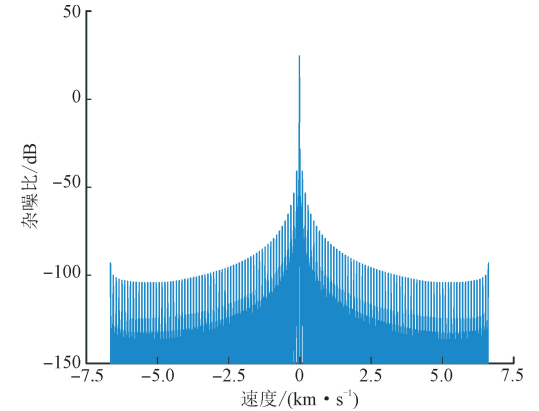
(c)相控阵 STAP 处理,CNR 随距离变化曲线



(d)相控阵 STAP 处理,CNR 随速度变化曲线



(e)子阵级 MIMO 模式,CNR 随距离变化曲线



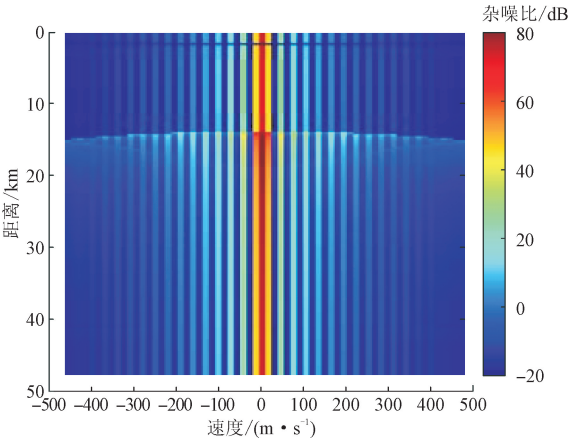
(f)子阵级 MIMO 模式,CNR 随速度变化曲线

图 9 输出杂噪比随速度和探测距离变化曲线

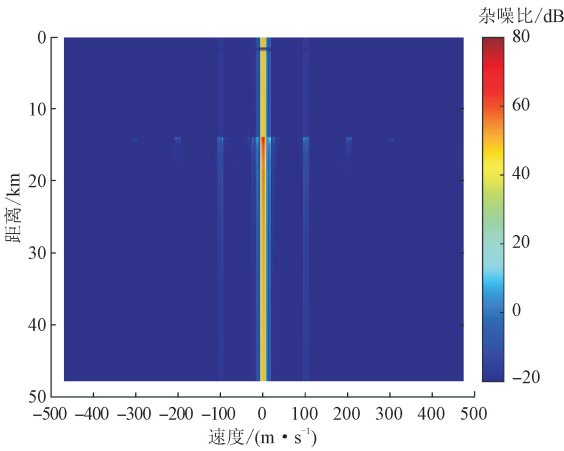
Fig. 9 The output clutter to noise ratio varies with speed and detection distance

5.4 子阵级 MIMO 天基雷达检测性能分析

由 5.2 节可知,子阵级 MIMO 雷达通过长时间积累达到了同相控阵雷达相似的输出信噪比。脉冲重复频率为 3 150 Hz 时,图 10 和图 11 分别给出了两种阵列模式下经过距离、多普勒模糊折叠相加后的杂噪比图,即原始距离多普勒图和距离、多普勒模糊次数扩展后的杂噪比图。由图 10 和图 11 可知,子阵级 MIMO 模式下,不管是在折叠后还是扩展后的杂噪比均比相控阵模式下的 CNR 更低。



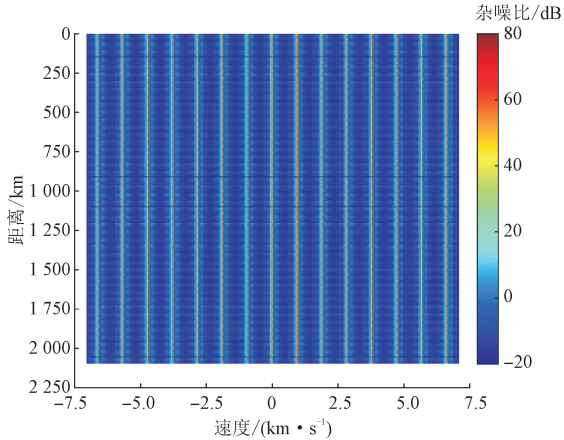
(a)相控阵模式,折叠后的杂噪比图



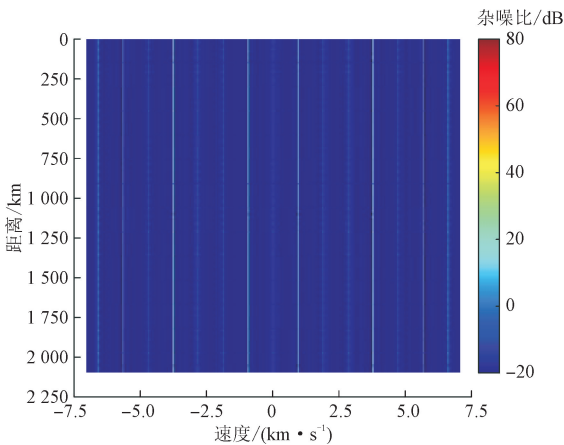
(b)子阵级 MIMO 模式,折叠后的杂噪比图

图 10 两种阵列模式下折叠后的杂噪比图

Fig. 10 Clutter to noise ratio graph after folding in two array modes



(a)相控阵模式,扩展后的杂噪比图

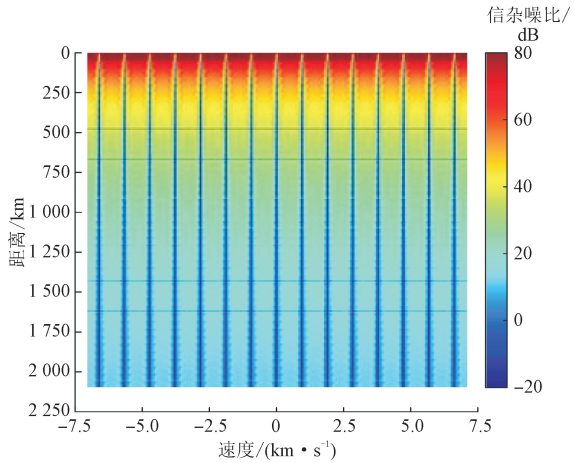


(b)子阵级 MIMO 模式,扩展后的杂噪比图

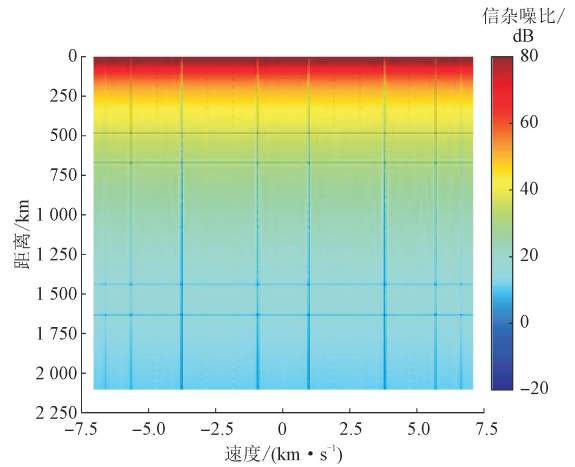
图 11 两种阵列模式下扩展后的杂噪比图

Fig. 11 Clutter to noise ratio graph after expansion in two array modes

图 12 给出了相控阵和子阵级 MIMO 模式下,在整个探测区域内的输出信杂噪比图。由此可看出,随着探测距离的不断增大,两种阵列模式下输出 SCNR 均逐渐减小。



(a)相控阵模式,输出信杂噪比图



(b)子阵级 MIMO 模式,输出信杂噪比图

图 12 两种阵列模式下输出信杂噪比图

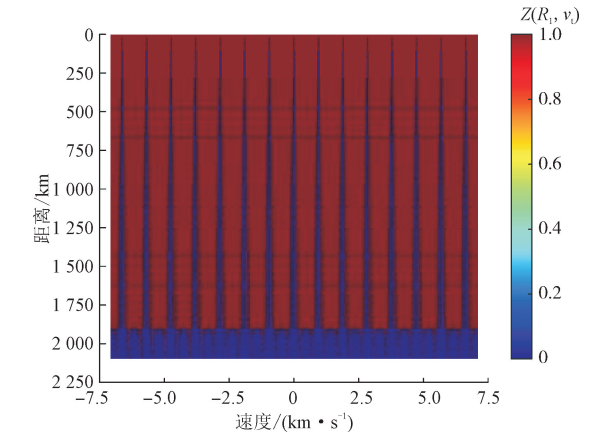
Fig. 12 Output signal to clutter noise ratio in two array modes

由上述分析可知,检测门限由检测概率、虚警概率和信杂噪比共同确定。表 2 给出了 3 种杂波分布类型下的检测门限,单 PRF 下检测概率 P_d 为 0.5,虚警概率 P_{fa} 为 10^{-6} ,本文设定杂波分布为瑞利分布,则满足此检测条件最小检测门限为 11.242 6 dB。图 13 为脉冲重复频率为 3 150 Hz 两种阵列模式下盲区检测图,其中红色部分表示可检测区域,蓝色部分为盲区。图 13(a)为相控阵雷达检测盲区图,可检测区域占有所有检测范围百分比为 76.62%,而图 13(b)子阵级 MIMO 模式下可检测区域占有所有检测范围百分比为 92.28%,相较相控阵雷达检测性能提升明显。

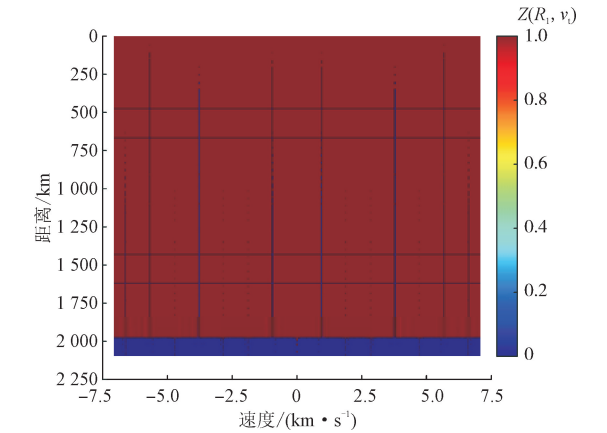
表 2 不同杂波分布的检测门限

Table 2 Detection thresholds for different clutter distributions

虚警概率	分布	检测门限/dB
10^{-4}	瑞利	9.397 9
	威布尔	14.268 9
	对数正太	17.893 3
10^{-6}	瑞利	11.242 6
	威布尔	17.218 1
	对数正太	24.011 6
10^{-8}	瑞利	12.533 0
	威布尔	19.306 0
	对数正太	29.080 8



(a)相控阵模式,检测盲区图



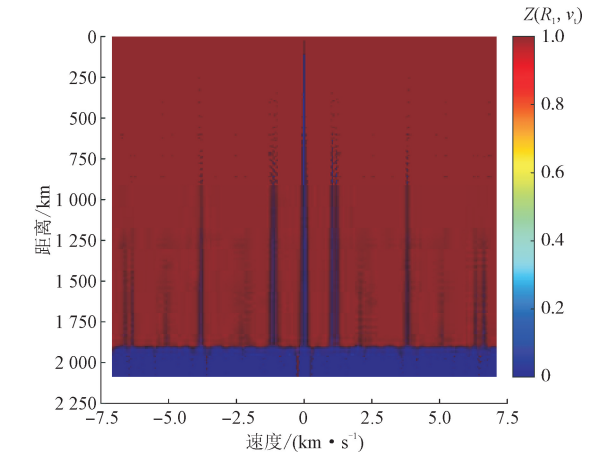
(b)子阵级 MIMO 模式,检测盲区图

图 13 单 PRF 下两种阵列模式下检测盲区图

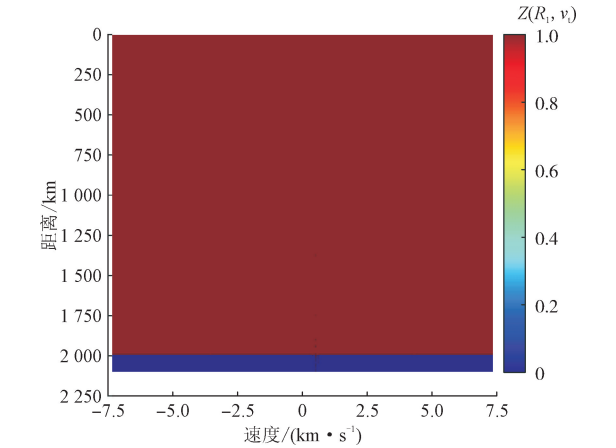
Fig. 13 Detection blindness maps for two array modes under single PRF

图 14 给出了多 PRF 下两种阵列模式检测盲区图。相较于图 13 中单 PRF 检测盲区图,在多 PRF 3/5 准则下两种阵列模式检测性能皆有提升。图 13(a)中相控阵雷达可检测区域占有所有检测范围百分比为

87.71%,而图 14(a)中子阵级 MIMO 雷达可检测区域占有所有检测范围百分比为 94.63%。由图 13 和图 14 可知,如不做特殊要求,子阵级 MIMO 雷达不需采用多 PRF 检测,在单 PRF 下即可达到很好的检测性能,而相控阵雷达只有在多 PRF 下才具有较好的检测性能。



(a)相控阵模式,检测盲区图



(b)子阵级 MIMO 模式,检测盲区图

图 14 多 PRF 下两种阵列模式下检测盲区图

Fig. 14 Detection blindness maps for two array modes under multiple PRFs

6 结 论

本文针对天基预警雷达具有较强的杂波背景及传统 STAP 方法无法有效抑制的问题,提出一种基于子阵级 MIMO 改善天基预警雷达检测性能的强杂波抑制方法。实验结果表明:在所允许最大相干积累时间内,目标只发生线性距离徙动和不出现多普勒频率扩散,在最大探测距离下证明了采用长时间积累的可行性,Keystone 变换后可直接进行相参积累,不影响后续检测性能。另外,所提方法在单 PRF 下相较相控阵天基雷达检测性能提升约

20.48%,而相控阵雷达只有在多PRF检测下才具有较好的检测效果。

参考文献:

- [1] 罗倩, 闫鸿慧. 天基雷达的PRF设计[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(1): 89-91.
LUO Qian, YAN Honghui. PRF design of space based radar [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(1): 89-91.
- [2] 潘洁, 李道京, 周建卫, 等. 大型稀疏阵列天基雷达系统分析[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3269-3274.
PAN Jie, LI Daojing, ZHOU Jianwei, et al. Space-based radar system analysis based on large scale sparse array [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(12): 3269-3274.
- [3] BAUMGARTNER S V, KRIEGER G. Fast GMTI algorithm for traffic monitoring based on a priori knowledge [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11): 4626-4641.
- [4] RENGA A, GRAZIANO M D, MOCCIA A. Segmentation of marine SAR images by sublook analysis and application to sea traffic monitoring [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(3): 1463-1477.
- [5] ZHANG Juan, DING Tong, ZHANG Linrang. Long-time coherent integration algorithm for high-speed maneuvering target detection using space-based bistatic radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-16.
- [6] DRAGOSEVIC M V, BURWASH W, CHIU S. Detection and estimation with RADARSAT-2 moving-object detection experiment modes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(9): 3527-3543.
- [7] HUANG Penghui, ZOU Zihao, XIA Xianggen, et al. A novel dimension-reduced space-time adaptive processing algorithm for spaceborne multichannel surveillance radar systems based on spatial-temporal 2-D sliding window [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-21.
- [8] ZHAN Muyang, HUANG Penghui, LIU Xingzhao, et al. Space maneuvering target integration detection and parameter estimation for a spaceborne radar system with target Doppler aliasing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13: 3579-3594.
- [9] 张增辉, 胡卫东, 郁文贤. 天基雷达空时二维杂波建模与仿真[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 24-27.
ZHANG Zenghui, HU Weidong, YU Wenxian. Modeling and simulation of space-time two-dimensional clutter for space-based radar [J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 24-27.
- [10] 段克清, 李想, 行坤, 等. 基于卷积神经网络的天基预警雷达杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 386-398.
DUAN Keqing, LI Xiang, XING Kun, et al. Clutter mitigation in space-based early warning radar using a convolutional neural network [J]. Journal of Radars, 2022, 11(3): 386-398.
- [11] QIU Zizhou, LIAO Zhipeng, XU Jingwei, et al. Range-ambiguous clutter suppression for space-based early warning radar using vertical FDA and horizontal EPC [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 1-5.
- [12] ZHANG Tianfu, WANG Zhihao, XING Mengdao, et al. Research on multi-domain dimensionality reduction joint adaptive processing method for range ambiguous clutter of FDA-phase-MIMO space-based early warning radar [J]. Remote Sensing, 2022, 14(21): 5536.
- [13] JIN Ke, LI Gongquan, LAI Tao, et al. A novel long-time coherent integration algorithm for Doppler-ambiguous radar maneuvering target detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 9394-9407.
- [14] 刘玉春, 王洪雁. 提升空时自适应检测性能的多输入多输出雷达稳健波形设计[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(8): 124-131.
LIU Yuchun, WANG Hongyan. A robust waveform design of mimo radars for improving detection performance of space-time adaptive processing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(8): 124-131.
- [15] YI Jianxin, WAN Xianrong, LEUNG H, et al. MIMO passive radar tracking under a single frequency network [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(8): 1661-1671.
- [16] TANG Jun, LI Ning, WU Yong, et al. On detection performance of MIMO radar: a relative entropy-based study [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(3): 184-187.
- [17] WU Linlong, BABU P, PALOMAR D P. Transmit waveform/receive filter design for MIMO radar with multiple waveform constraints [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(6): 1526-1540.
- [18] WU Chaoyi, ZHANG Tianyi, LI Jian, et al. Parameter estimation in PMCW MIMO radar systems with few-bit quantized observations [J]. IEEE Transactions

on Signal Processing, 2022, 70: 810-821.

[19] HASSANIEN A, VOROBYOV S A. Phased-MIMO radar: a tradeoff between phased-array and MIMO radars [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6): 3137-3151.

[20] WANG Hongyan, PEI Bingnan, WANG Zumin, et al. Robust waveform optimization for MIMO radar to improve the worst-case detection performance [C]// 2014 IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1098-1101.

[21] HUANG Xiang, ZHANG Linrang, LI Shengyuan, et al. Radar high speed small target detection based on Keystone transform and linear canonical transform [J]. Digital Signal Processing, 2018, 82: 203-215.

[22] ZHOU Peng, MARTORELLA M, ZHANG Xi, et al. Circular scan ISAR mode super-resolution imaging of ships based on a combination of data extrapolation and compressed sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6883-6894.

[23] 晁逸群. 机载预警雷达杂波干扰抑制及性能评估 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

[24] 王婷婷. 机载雷达性能评估与协同探测方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[25] 任鹏丽. 海杂波背景下机载雷达性能评估与目标检测算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

(编辑 陶晴 刘杨)