

一种对抗双站雷达的新型组合式干扰物设计

辛蔚, 刘鑫, 王伟东, 孟刚, 刘佳琪
(试验物理与计算数学国家重点实验室, 北京, 100076)

摘要: 双站雷达凭借其良好的抗干扰能力和准确的探测识别能力在军事领域中被广泛应用, 如何对这种收发分置的雷达系统实施有效干扰已成为当前的研究热点。典型干扰物的双站雷达截面 (Radar Cross Section, RCS) 随角度变化的波动幅度大, 双站散射强度较弱, 在对抗双站雷达方面不具优势。针对以上问题, 通过分析4类典型干扰物的双站散射特性, 提出一种对抗双站雷达的新型组合式干扰物, 然后对不同波段、不同尺寸、不同间距的新型组合式干扰物单体/阵列进行电磁仿真计算, 研究在不同参数下的双站散射特性, 并与典型干扰物进行对比分析。研究表明, 提出的新型组合式干扰物单体/阵列具有较强的双站散射强度, 并且在双站角变化时, 其RCS的波动幅度较小, 具有良好的双站散射特性, 为实现对双站雷达的有效干扰提供了技术支持。

关键词: 双站雷达; 组合式干扰物; 散射特性; 无源干扰; 电磁仿真

中图分类号: TN957.52; V44

文献标识码: A

A New Type of Combined Jammer Design Against Bistatic Radar

XIN Wei, LIU Xin, WANG Weidong, MENG Gang, LIU Jiaqi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematics, Beijing, 100076)

Abstract: Bistatic radar is widely used in military field by virtue of its good anti-jamming ability and accurate detection and identification ability, and how to effectively jam this transceiver-split radar system has become a current research hotspot. Typical jammers have large fluctuations of bistatic RCS with angle change and weak bistatic scattering strength, which are not advantageous in countering bistatic radar. Therefore, a new type of combined jammer against bistatic radar is proposed by analyzing the bistatic scattering characteristics of four types of typical jammers. Afterwards, electromagnetic simulation calculations are carried out on the new combined jammer monomer/array of different bands, sizes and spacings to study the bistatic scattering characteristics under different parameters, and compared with typical jammers. The results show that the new combined jammer monomer/array has strong bistatic scattering strength and the fluctuation amplitude of its RCS with respect to angle is smaller, with good bistatic scattering characteristics, providing technical support for effectively jamming of bistatic radar.

Keywords: bistatic radar; combined jammer; scattering characteristics; passive jamming; electromagnetic simulation

0 引言

随着雷达技术的不断发展, 双站雷达凭借其定位精确、抗干扰能力强、多角度探测能力突出等特点^[1-2], 在军事等领域中被广泛应用。双站雷达和典型雷达有所不同, 其发射机和接收机分置于相距很远的基地, 并且能够获取目标多个角度的双站散射信息^[3-4], 如何对这种收发分置的雷达系统进行有效干扰, 也成为雷达攻防对抗领域中的热点研究。

释放大量干扰物形成强烈散射从而对雷达系统形成压制干扰是一种常用的干扰手段。从干扰物的角度

来说, 当双站雷达发射机照射干扰物时, 干扰物散射的回波被另一侧的接收机接收, 其电磁波的入射方向和散射方向不同, 所以需要考虑干扰物本身的双站散射特性。双站散射主要描述的是目标被电磁波照射时, 其散射方向指向辐射源以外方向的散射现象。目前对于目标的双站散射特性正在开展深入的研究。文献 [5] 以典型八面体角反射器为研究对象, 通过电磁计算和暗室测量对比分析了单个角反射器、角反射器阵列单/双基地雷达截面 (Radar Cross Section, RCS) 各类特性, 揭示了双基地雷达与角反射器之间的几何关系对角反射器 RCS 的影响规律。文献 [6]

通过固定双站角和旋转目标对不同双站角下目标的雷达散射截面进行了测试分析，发现了其双站电磁散射的对称性、相似性和弱耦合性3大主要特性。文献[7]对圆形箔片形成的箔条云的双站散射特性进行研究，建立了双站散射截面模型。上述文献主要针对目标双站散射下的典型特征以及双站角变化对目标RCS的影响规律开展了研究，但是在如何利用目标的双站散射特性来更好地对抗双站雷达方面的研究还不够深入。

想要有效对抗双站雷达，必须释放大量的干扰物形成强烈散射，从而在雷达接收机处形成强烈杂波，干扰雷达对目标进行探测识别。这需要干扰物本身具有较大的双站散射强度，并且还需要尽量减小干扰物双站散射强度随着双站角变化的波动幅度，以确保在各个双站角下均能保持足够的散射效能。典型干扰物的双站RCS随角度变化的波动幅度大，双站散射强度较弱，在对抗双站雷达方面不具优势，因此想要达到更好的双站雷达干扰效果，对干扰物自身的双站散射特性有更高的要求。

本文通过计算分析4类典型干扰物双站散射特性，提出了一种新型组合式干扰物，然后对不同参数下的新型组合式干扰物单体/阵列进行电磁仿真计算，研究其双站散射特性，并与典型干扰物进行对比分析。

1 4类典型干扰物电磁计算建模与双站散射特性分析

1.1 典型干扰物的电磁计算建模

本文选取了4类结构对称的典型干扰物，分别为：圆片、球体、双棱锥八面体角反射器以及圆形八面体角反射器，干扰物结构参数如表1所示。方位角定义为 φ ，取值范围是 $0\sim 360^\circ$ ；俯仰角定义为 θ ，取值范围是 $0\sim 180^\circ$ 。此次电磁仿真，俯仰角 θ 始终保持 0° ，双站角 α 即为入射方位角与接收方位角角度之差，取值范围是 $0\sim 120^\circ$ 。对于干扰物单体，中心轴线尺寸 D 均为 100 mm 。对于干扰物阵列，采用5个相同尺寸、相同方向的目标，间隔均匀置于同一水平线上。

利用CST STUDIO SUITE电磁仿真软件对4类干扰物的双站RCS进行仿真计算，采用的方法为积分方程法，电磁仿真参数设置如表2所示。

表1 4类干扰物结构参数

Tab.1 Structural parameters of the four types of jammer

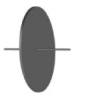
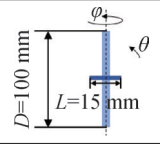
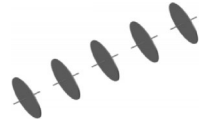

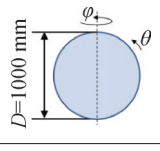
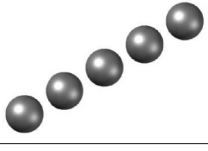

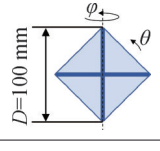
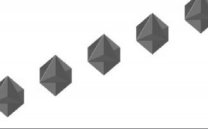

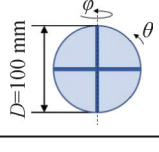
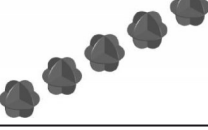
序号	干扰物单体结构	干扰物结构参数	干扰物阵列结构
1			
2			
3			
4			

表2 电磁仿真参数

Tab.2 Electromagnetic simulation parameters

参数	取值
雷达频率/GHz	10
单体目标轴线尺寸/mm	100
干扰物阵列数目/个	5
干扰物阵列间距/mm	75
双站角/ $^\circ$	$0\sim 120$, 步进 30

1.2 典型干扰物的双站散射特性分析

1.2.1 典型干扰物单体的双站散射特性分析

图1为4类典型干扰物单体在双站角分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 5个角度下的RCS对比。图2为4类典型干扰物单体RCS随双站角的变化曲线。

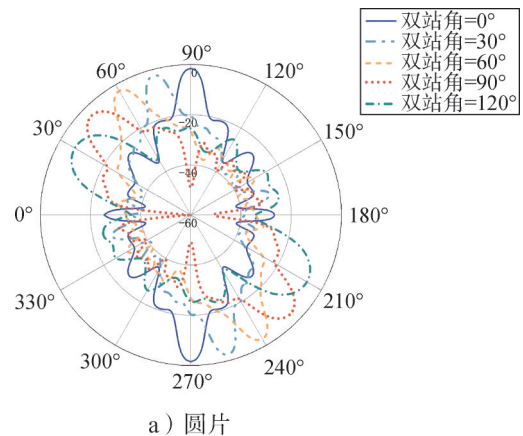
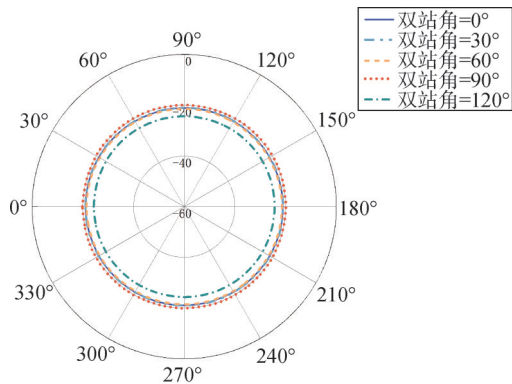
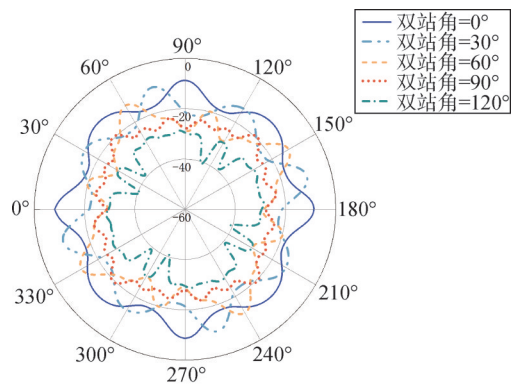


图1 4类典型干扰物单体的双站散射

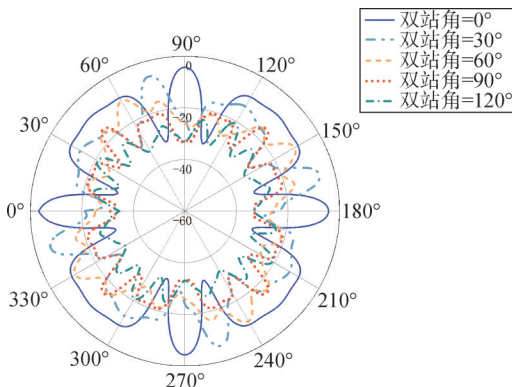
Fig.1 Bistatic scatter plots of four types of typical jammer monomers



b) 球体



c) 双棱锥八面体角反射器



d) 圆形八面体角反射器

续图1

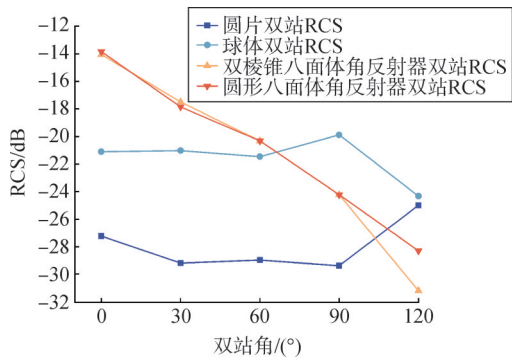


图2 4类典型干扰物单体RCS随双站角的变化曲线

Fig.2 Variation curves of RCS with bistatic station angle for four types of typical jammer monomers

由图1a可以看出，圆片在垂直于双站角平分线方向上的RCS达到最大值，而在其他方位角的RCS较小，相差20 dB以上。这是由圆片的结构特性决定的，根据圆片散射原理（见图3）可知，当大部分电磁波以 β 角度入射到圆片平面时，会产生镜面散射，此时电磁波的入射方向与散射方向关于平面法线对称，绝大部分回波都集中以 $\pi-\beta$ 角度射出，所以当接收方正处于 $\pi-\beta$ 时，回波强度达到最大，因此圆片在垂直于双站角平分线方向上的RCS达到最大值时，在其他方向上的RCS较小。并且结合图2来看，圆片的双站RCS均值随双站角变化的波动幅度不大，但其整体的双站散射强度较小，仅为-29 dB左右，远低于其他3类干扰物。

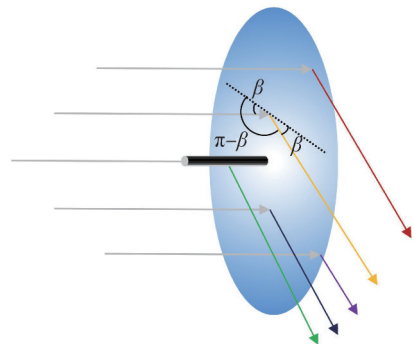


图3 圆片散射原理

Fig.3 Schematic diagram of circular scattering

根据图1b可看出，由于球体自身具有高度对称性，所以球体在每一双站角下的RCS值随方位角变化的波动幅度较小，分布较为平均。结合图2来看，球体整体的双站散射强度较大，平均可达到-22 dB，并且由球体散射原理（见图4）可以看出，无论电磁波从哪个方向入射，球体的散射均为全向均匀散射，不存在散射集中在某些角度导致RCS出现尖峰的问题，所以其双站RCS均值较为稳定，随双站角变化的波动幅度较小，仅为0.4 dB。

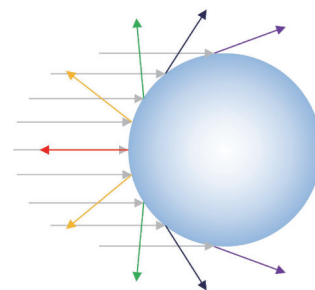


图4 球体散射原理

Fig.4 Schematic diagram of sphere scattering

从对抗双站雷达的角度来说，圆片的RCS均值随双站角变化的波动幅度不大，但其整体的散射强度较小，在对抗双站雷达时效果较差；球体的双站散射强度较大，且随双站角变化的RCS值较为稳定，波动幅度小，说明其双站散射特性在对抗双站雷达时具有一定优势；两类角反射器随着双站角的增大，双站散射强度显著下降，说明两类角反射器双站散射的方向性较强，在对抗双站雷达时不具优势。

1.2.2 典型干扰物阵列的双站散射特性分析

为了进一步研究干扰物阵列结构在对抗双站雷达时的双站散射特性，下面针对4类干扰物阵列的双站RCS开展研究，阵列中各单元之间的间距为75 mm，单元数量为5个。图5为双站角分别为0°、30°、60°、90°、120°5个角度下的RCS对比。图6为4类典型干扰物阵列RCS均值随双站角的变化曲线。

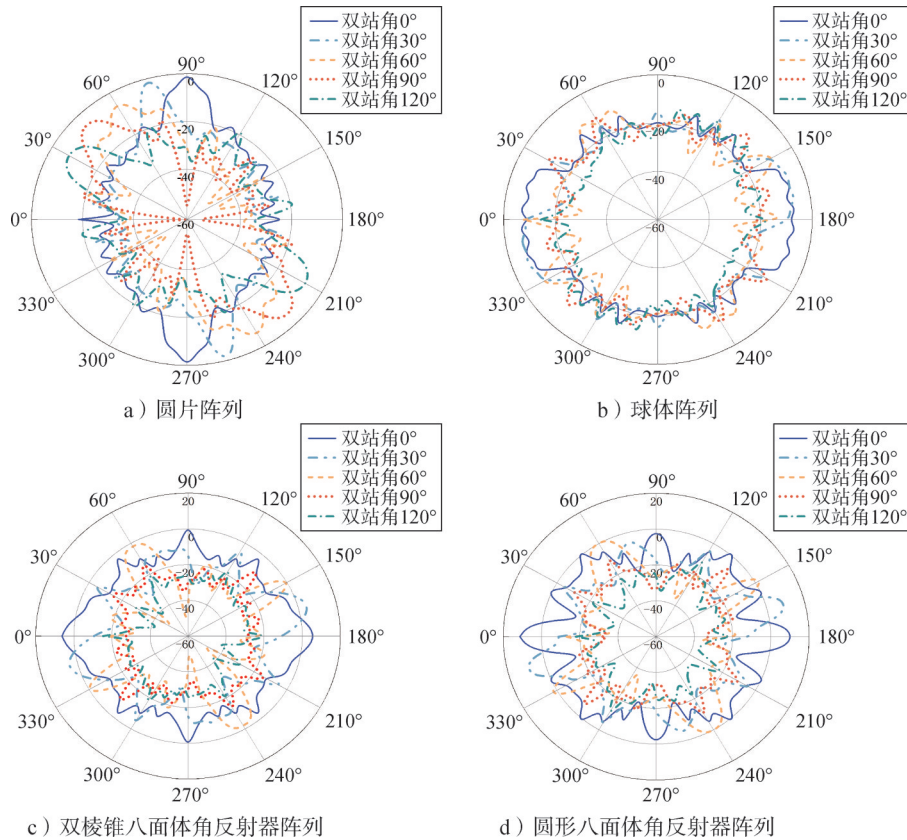


图5 4类典型干扰物阵列的双站散射

Fig.5 Bistatic scatter plots of four types of typical jammer arrays

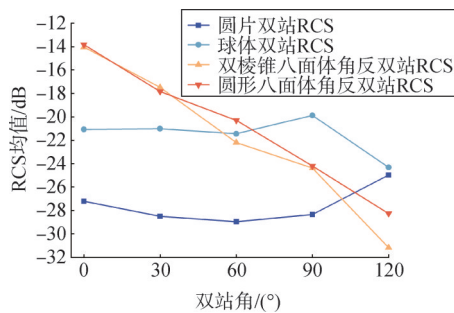


图6 4类典型干扰物阵列RCS均值随双站角的变化曲线

Fig.6 Variation curves of RCS with bistatic station angle for four types of typical jammer arrays

由图5结合图1、图6可以看出，圆片阵列双站RCS分布与圆片单体的双站RCS分布较为相似，在垂

直于双站角平分线方向上的RCS达到最大值，虽然圆片阵列的双站RCS均值随双站角变化的波动幅度不大，但其整体的RCS均值较小；球体阵列相较于球体单体来说，其双站RCS值随方位角变化的波动幅度有所增大，但其RCS均值随双站角的变化较为稳定；对于两类角反阵列来说，其RCS均值随着双站角的增大，RCS均值显著下降，最大可达-17 dB。

2 新型组合式干扰物结构的电磁计算建模与双站散射特性分析

2.1 新型组合式干扰物的电磁计算建模

根据上述对4类典型干扰物单体/阵列的电磁仿真

结果分析,圆片的RCS值随双站角变化的波动幅度较小,但圆片平面会将电磁波集中在同一方向射出,导致仅在某些方位角下的RCS值较为突出,而整体的散射强度较小;球体的双站散射强度较大,而且随双站角和方位角变化的RCS值都较为稳定,变化幅度较小,所以考虑将小半径的球体与圆片相组合形成新型组合式干扰物。新型组合式干扰物减小了电磁波可照射到圆片平面的面积,降低了某些方位角下较为突出的RCS值,抬高了其他方位角下的RCS值,同时,球体的存在也保证了新型组合式干扰物双站RCS均值在具有较小的波动幅度的同时具有较大的双站散射强度。图7为新型组合式干扰物的结构。

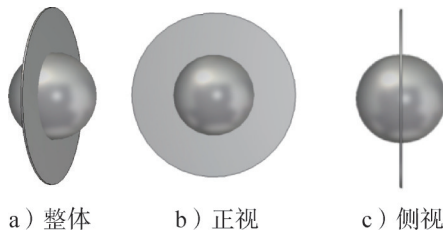


图7 新型组合式干扰物结构

Fig.7 Structure of the new combined jammer

再次利用 CST STUDIO SUITE 电磁仿真软件对新型组合式干扰物的双站RCS进行仿真计算,电磁仿真

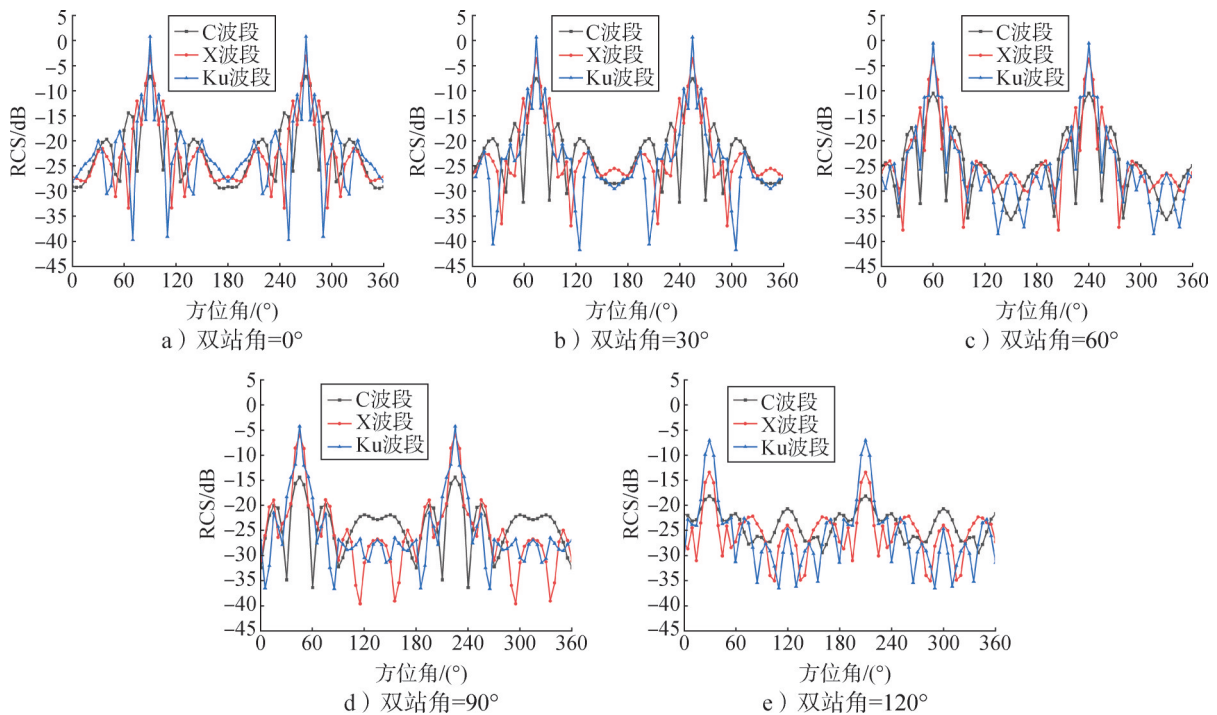


图8 新型组合式干扰物单体在C、X、Ku 3个波段下,不同双站角的RCS值随方位角变化的对比

Fig.8 Comparison of RCS with azimuth angle at different bistatic station angles for the new combined jammer monomer in C, X, Ku bands

参数设置如表3所示。

表3 新型组合式干扰物结构参数与电磁仿真参数设置
Tab.3 Structural parameters and electromagnetic simulation parameter for the new combined jammer

参数	取值
圆片轴线长度/mm	100
球体直径/mm	25、50、75
阵列间距/mm	50、75、100
雷达频率/GHz	6、10、15
双站角/(°)	0~120,步进30

2.2 新型组合式干扰物的双站散射特性分析

2.2.1 新型组合式干扰物单体的双站散射特性分析

本节主要研究不同波段、不同球体尺寸下新型组合式干扰物单体的双站散射特性。

a) 不同波段下的双站散射特性分析。

图8为新型组合式干扰物单体在C、X、Ku3个波段下,不同双站角的RCS随方位角的变化对比。其中,圆片直径为100 mm,球体直径为50 mm。图9为新型组合式干扰物单体在3个波段下,RCS均值随双站角的变化曲线。

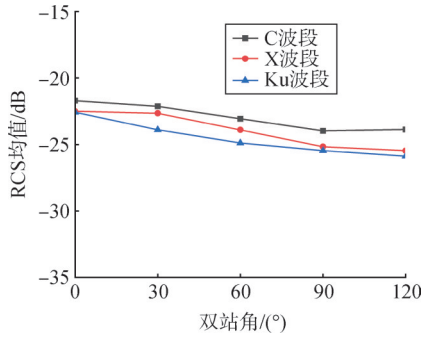


图9 新型组合式干扰物单体在3个波段下,RCS均值随双站角的变化曲线

Fig.9 Variation curves of RCS mean value with bistatic station angle for the new combined jammer monomer in three bands

由图8可以看出,在特定双站角下,新型组合式

干扰物单体RCS的波动幅度随着电磁波频率的增大而增大。当双站角不断增大时,3个波段下的RCS波动幅度逐渐减小。结合图9来看,随着电磁波频率的增大,不同双站角下的RCS均值逐渐减小。而且随着双站角的增大,3个波段下的RCS均值仍可保持较大值,可达到22 dB左右,且较为稳定,变化幅度较小,仅为1 dB左右。因此,在3个常用波段下,新型组合式干扰物在对抗双站雷达方面均有较大优势。

b) 不同球体尺寸下的双站散射特性分析。

图10为新型组合式干扰物单体在球体直径分别为25 mm、50 mm、75 mm下,不同双站角的RCS值随方位角变化的对比图,其中电磁波频率为10 GHz。图11为新型组合式干扰物单体在不同球体尺寸下,RCS均值随双站角的变化曲线。

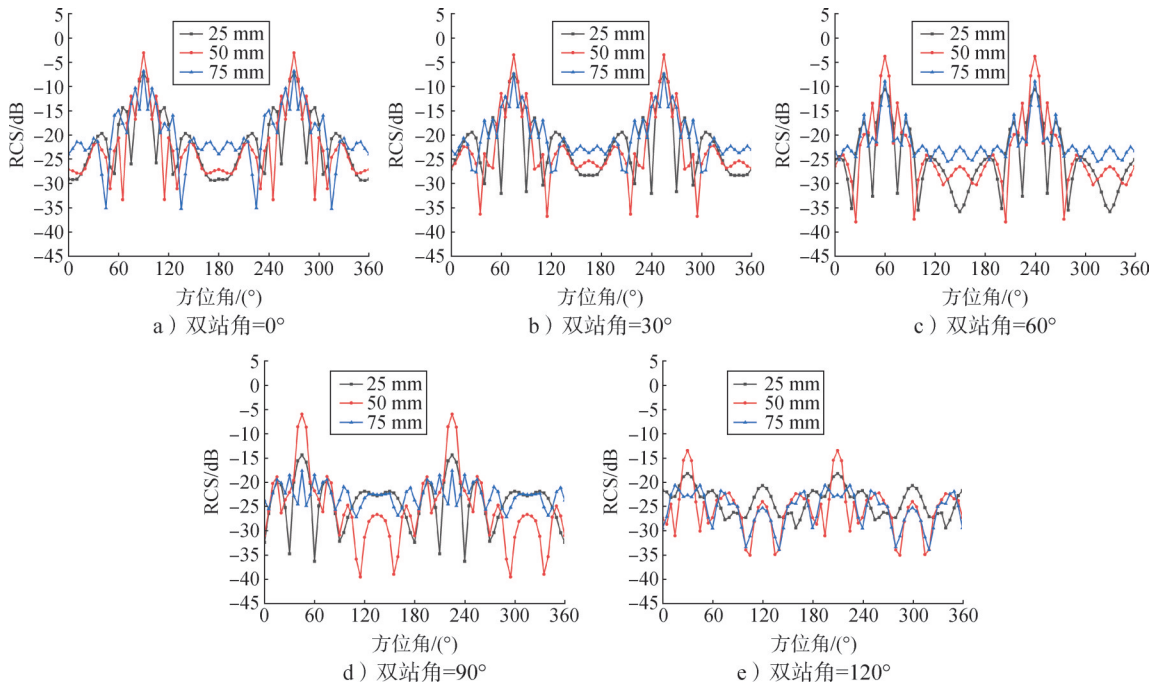


图10 不同球体直径下不同双站角的RCS值随方位角变化的对比

Fig.10 Comparison of RCS with azimuth angle at different bistatic station angles at different sphere diameters

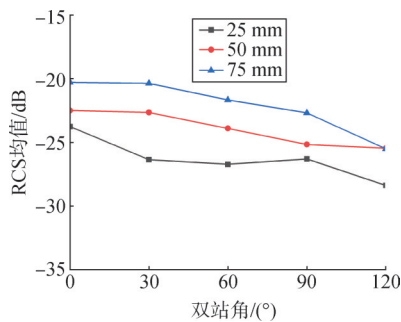


图11 不同球体尺寸下RCS均值随双站角的变化曲线

Fig.11 Variation curves of RCS mean value with bistatic station angle with different sphere sizes

由图10可以看出,球体直径较小或者较大时,在每一个双站角下的RCS值随方位角变化的波动幅度相对较小。当球体直径为25 mm时,散射受圆片结构的影响更大,大部分入射到圆片平面上的电磁波集中向同一个方向散射,使得某些方位角下的RCS值较大,而少部分入射到圆片边缘的电磁波散射很弱,导致某些方位角下的RCS值较小,因此在每一个双站角下的RCS值会产生一定的波动,但波动幅度相对较小;当球体直径为75 mm时,散射受球体结构的影响更大,大部分电磁波都射向球体部分,由于球体具有

高度对称性，散射较为均匀，所以在每一双站角下的 RCS 随方位角变化的波动幅度较小。同时结合图 11 来看，新型组合式干扰物单体随着球体直径的增大，不同双站角下的 RCS 均值也逐渐增大。

2.2.2 新型组合式干扰物阵列的双站散射特性分析

本节主要考虑不同的新型组合式干扰物阵列间距

对双站散射特性的影响。图 12 为新型组合式干扰物阵列在间距分别为 50 mm、75 mm、100 mm 下，不同双站角的 RCS 值随方位角变化的对比。图 13 为新型组合式干扰物阵列在不同间距下，RCS 均值随双站角的变化曲线。

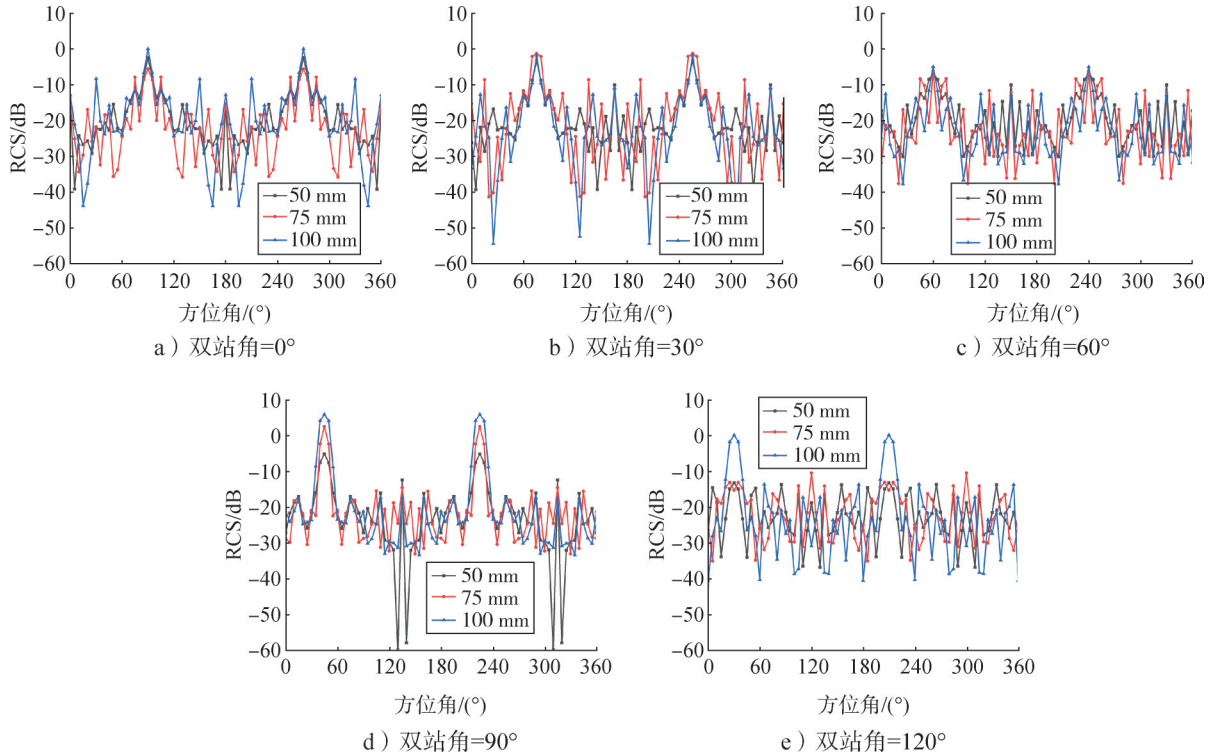


图 12 不同间距下不同双站角的 RCS 值随方位角的变化

Fig.12 Comparison of RCS with azimuth angle at different bistatic station angles at different spacings

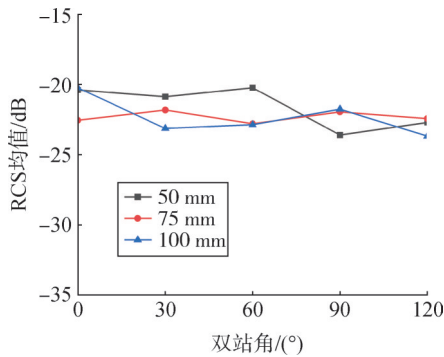


图 13 不同间距下 RCS 均值随双站角的变化

Fig.13 Variation curves of RCS mean value with bistatic station angle at different spacings

由图 12 可以看出，在特定双站角下，新型组合式干扰物阵列 RCS 的波动幅度随着间距的增大而增大。结合图 13 来看，随着双站角的增大，3 种间距下的干扰物阵列双站 RCS 均值波动幅度较小，并且阵列

间距对双站散射强度的影响不大，3 种间距下的 RCS 均值虽有波动，但基本稳定在 -22 dB 左右。因此在对抗双站雷达时，新型组合式干扰物阵列的间距不宜过大，在保证散射强度足够大时，其 RCS 值随方位角的波动幅度较小。

3 对比分析

对相同波段、相同尺寸、相同间距的典型干扰物单体/阵列与新型组合式干扰物单体/阵列的双站散射特性进行对比分析。其中电磁波频率为 10 GHz，单体中心轴线尺寸为 100 mm，阵列间距为 75 mm，新型干扰物中的球体直径为 75 mm。图 14 为 5 类干扰物单体的 RCS 均值随双站角变化的曲线以及 5 类干扰物阵列的 RCS 均值随双站角变化的曲线。

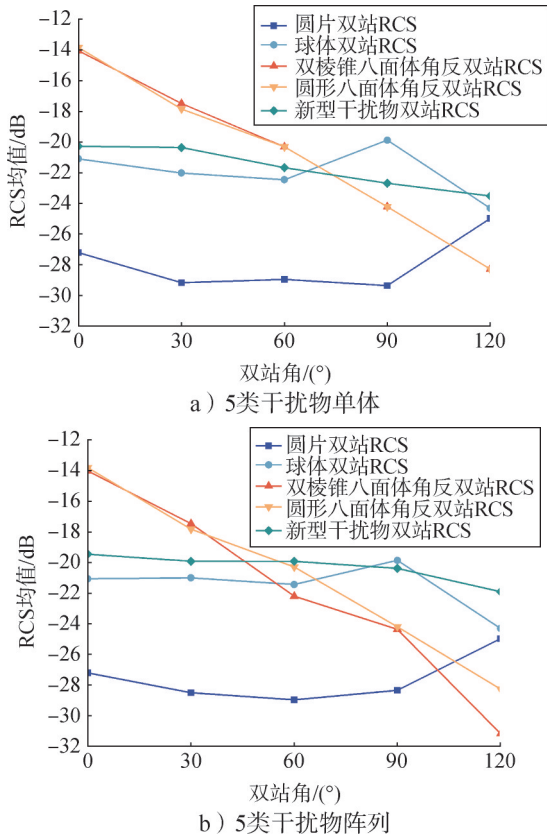


图 14 5 类干扰物单体/阵列的 RCS 均值随双站角变化的曲线
Fig.14 Variation curves of RCS mean value with bistatic station angle for the five types of jammer monomer/array

表 4 为 5 类干扰物单体双站角下的 RCS 均值以及最大波动幅值，表 5 为 5 类干扰物阵列双站角下的 RCS 均值以及最大波动幅值。

表 4 5 类干扰物单体双站角下的 RCS 均值以及最大波动幅值
Tab.4 The mean value of RCS and the maximum fluctuation amplitude of RCS at the bistatic station angles of five types of jammer monomer

干扰物类型	各双站角下的 RCS 均值/dB					最大波动幅值/dB
	0°	30°	60°	90°	120°	
圆片	-27.21	-29.16	-28.96	-29.35	-24.98	4.37
球体	-21.10	-21.02	-21.45	-19.88	-24.32	4.44
双棱锥八面体角反	-14.05	-17.48	-20.31	-24.21	-31.17	17.12
圆形八面体角反	-13.84	-17.84	-20.31	-24.21	-28.27	14.43
新型干扰物	-19.46	-19.93	-19.94	-20.40	-21.92	1.98

由图 14 结合表 4~5 可以看出，新型组合式干扰物单体/阵列相较于圆片，双站散射强度大大提高，可达到 -20 dB 左右；和球体相比，新型组合式干扰物单体/阵列的双站散射强度仅在双站角为 90° 附近时略低

于球体，在其他角度均大于球体，而且其双站 RCS 波动幅度小于球体；和两类角反相比较来说，随着双站角的不断增大，新型组合式干扰物单体/阵列的双站 RCS 的波动幅度很小，仅为 2 dB 左右。根据以上仿真分析可以看出，新型组合式干扰物单体/阵列均具有较大的双站散射强度，并且双站 RCS 值较为稳定，波动幅度较小，具有良好的双站散射特性。因此，新型组合式干扰物单体/阵列在对抗双站雷达方面具有较大优势。

表 5 5 类干扰物阵列双站角下的 RCS 均值以及最大波动幅值
Tab.5 The mean value of RCS and the maximum fluctuation amplitude of RCS at the bistatic station angles of five types of jammer arrays

干扰物类型	各双站角下的 RCS 均值/dB					最大波动幅值/dB
	0°	30°	60°	90°	120°	
圆片	-27.21	-28.50	-28.96	-29.36	-24.98	4.38
球体	-21.08	-21.02	-21.42	-19.88	-24.31	4.43
双棱锥八面体角反	-14.05	-17.48	-22.21	-24.38	-31.17	17.12
圆形八面体角反	-13.82	-17.84	-20.31	-24.21	-28.27	14.45
新型干扰物	-19.46	-19.93	-19.94	-20.40	-21.92	2.46

4 结束语

本文针对典型干扰物在对抗双站雷达时的局限性，提出了一种新型组合式干扰物。通过对不同波段、不同尺寸、不同间距的干扰物单体/阵列进行电磁仿真计算，研究其在不同参数下的双站散射特性，并与典型干扰物进行对比分析研究。结果表明，这种新型组合式干扰物单体/阵列和典型干扰物相比，有较强的双站散射强度，并且提高了双站 RCS 随角度变化的稳定程度，具有良好的双站散射特性，可为有效对抗双站雷达提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 庄敬敏. 基于雷达辐射源的无源双基地雷达目标检测方法与实践 [D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
ZHUANG Jingmin. Method and implementation of passive bistatic radar target detection based on radar radiation source [D]. Yantai: Yantai University, 2024.

[2] 严嘉豪. 三维海面双站电磁散射特性研究 [D]. 成都: 西华大学, 2023.
YAN Jiahao. Research on electromagnetic scattering characterizations of bistatic on three-dimensional sea surface [D]. Chengdu:

- Xihua University, 2023.
- [3] 赵锋, 邱梦奇, 艾小锋, 等. 典型角反射器单/双基地 RCS 特性对比分析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 50-58.
ZHAO Feng, QIU Mengqi, AI Xiaofeng, et al. Comparative analysis of monostatic and bistatic RCS characteristics for typical corner reflectors[J]. Modern Defense Technology, 2023, 51(1): 50-58.
- [4] 李婷婷. 双站雷达成像几何与辐射特性分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
LI Tingting. Analysis of imaging geometry and radiometric characterizations of bistatic radar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [5] 成天桢, 刘尚钊, 韦杉, 等. 双基地雷达作战与抗干扰效能的分析[J]. 现代防御技术, 2015, 43(3): 1-6+14.
CHENG Tianzhen, LIU Shangchao, WEI Shan, et al. Performance analysis of bistatic radars under jamming[J]. Modern Defense Technology, 2015, 43(3): 1-6+14.
- [6] 黄沛霖, 姬金祖, 武哲. 飞行器目标的双站散射特性研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2008(1): 140-143.
HUANG Peilin, JI Jinzu, WU Zhe. Research on the bistatic RCS characteristic of aircraft[J]. Journal of Xidian University, 2008(1): 140-143.
- [7] 周水庚. 圆形箔片云的双站雷达散射截面模型[J]. 上海航天, 1992(3): 31-35.
ZHOU Shuigeng. Bistatic radar scattering cross-section modeling of circular foil clouds[J]. Aerospace Shanghai, 1992(3): 31-35.

作者简介

- 辛蔚(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为目标特征控制。
刘鑫(1975—), 女, 研究员, 主要研究方向为目标特征控制。
王伟东(1979—), 男, 研究员, 主要研究方向为目标特征控制。
孟刚(1963—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器设计。
刘佳琪(1963—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器设计。

(上接第77页)

- [9] 赵杨博. 民营液体火箭公里级垂直起降飞行试验成功[J]. 现代企业, 2022(7): 6.
ZHAO Yangbo. The kilometer-level VTVL flight test of a private liquid rocket was succeeded[J]. Modern Enterprise, 2022(7): 6.
- [10] 星辰. 朱雀三号可复用火箭首次垂直起降飞行试验取得成功[J]. 国际太空, 2024(2): 10-11.
XING Chen. The first VTVL flight test of the reusable Zhuque-3 rocket was a succeeded[J]. Space International, 2024(2): 10-11.
- [11] 包为民. 可重复使用运载火箭技术发展综述[J]. 航空学报, 2023, 44(23): 629555.
BAO Weimin. A review of reusable launch vehicle technology development[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(23): 629555.
- [12] WANG Lixin, GUO Youguang, ZHANG Qi, et al. Suggestion for aircraft flying qualities requirements of a short-range air combat mission[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 881-897.
- [13] 杨威, 杜军. 飞机气动布局设计与飞行性能品质[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
YANG Wei, DU Jun. Aircraft aerodynamic layout design and flight performance quality[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [14] 原继萍. 大气飞行器的原始气动参数分析[C]. 北京: 第十届航天控制技术学术会议, 2009.
YUAN Jiping. Analysis of the original aerodynamic parameters of aircraft[C]. Beijing: The 10th Academic Conference on Aerospace Control Technology, 2009.
- [15] 汤一华, 余梦伦, 杨勇, 等. 第二代可重复使用运载器及其再入制导技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(1): 26-31.
TANG Yihua, YU Menglun, YANG Yong, et al. Second generation reusable launch vehicle and its reentry guidance technologies[J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(1): 26-31.
- [16] 马野, 许健, 邵秋虎. 后航天飞机时代天地往返运载器发展趋势研究[J]. 中国航天, 2015(3): 17-22.
MA Ye, XU Jian, SHAO Qiuhu. Research on the development trend of space-to-earth shuttle vehicles in the post-space shuttle era[J]. Aerospace China, 2015(3): 17-22.

作者简介

- 伊鑫(1982—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为飞行控制系统设计、动力学建模与仿真、飞行器总体设计。
胡海峰(1978—), 男, 研究员, 主要研究方向为导航、制导与控制。
贺元军(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器设计。