

文章编号: 2095-4980(2019)03-0413-05

## 分布式孔径相参合成雷达技术试验验证与分析

周宝亮, 周东明, 高红卫, 鲁耀兵

(北京无线电测量研究所, 北京 100039)

**摘要:** 实现收发全相参合成对运动目标稳定跟踪是分布式孔径相参合成雷达技术进步的重要标志, 首先介绍分布式孔径相参合成雷达的基本理论, 再从接收相参和收发相参 2 个阶段对飞机目标跟踪试验进行分析, 分别给出了相参合成信噪比增益改善、相位差值变化和跟踪航迹等试验结果。试验结果表明目标跟踪稳定, 信噪比增益改善接近理论值。在此基础上, 给出 2 部 X 波段大型实装相控阵雷达卫星目标相参合成跟踪试验结果, 实现收发全相参合成对卫星目标稳定跟踪。通过试验验证分布式孔径相参合成雷达具有技术可行性和工程可实现性。

**关键词:** 分布式; 相参合成; 运动目标跟踪; 试验验证

**中图分类号:** TN958

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201903.0413

## Test and analysis of distributed aperture coherence-synthetic radar technology

ZHOU Baoliang, ZHOU Dongming, GAO Hongwei, LU Yaobing

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Realizing the stable tracking of moving targets by the transmit-receive-coherence mode is an important symbol of the technological progress of distributed aperture coherence-synthetic radar. Firstly, the basic theory of the distributed aperture coherence-synthetic radar is briefly introduced, then, the aircraft target tracking test is analyzed from two stages of receive-coherence and transmit-receive-coherence. The test results of coherent-synthetic Signal-to-Noise Ratio(SNR) gain improvement, phase difference changes and target tracking track are given respectively. Test results show that the target tracking is stable and the SNR gain improvement is close to the theoretical value. On this basis, the test results of satellite target coherence-synthetic of two X-band large-scale phased array radars are given to realize the stable tracking of high-speed moving satellite targets in transmit-receive-coherence mode. Technical feasibility and engineering achievability of distributed aperture coherence-synthetic radar are fully verified by the test.

**Keywords:** distributed; coherence-synthetic; moving target tracking; test verification

分布式孔径相参合成雷达通过多孔径分散布置以及空间能量聚焦, 巧妙解决了雷达大威力探测与机动性之间的矛盾, 具有生存能力强、效费比高、角分辨力高、识别能力强、扩展性强和实现性好等诸多优势, 可应用于防空反导、精密测量和空间目标监视等领域, 适用于车载、舰载、机载和弹载等多个平台。分布式孔径相参合成雷达有效利用多孔径的空域和能量域等资源, 显著提升雷达系统的探测威力和测量精确度, 是解决雷达大威力探测与机动性等矛盾的有效手段。由于分布式孔径相参合成雷达的机动性、灵活性和扩展性等技术优势可很好地满足反导作战的跟踪与识别需求, 美国已将分布式孔径相参合成雷达技术作为美国下一代反导雷达重要发展方向<sup>[1-4]</sup>。2012 年 9 月, 美国国家科学院发表一篇报告《认清弹道导弹防御: 美国助推段导弹防御与其他备选方案比较的概念和系统评估》, 提出 GBX 雷达的概念, 由 AN/TPY-2 雷达堆叠, 通过相参合成, 提供探测威力, 增强反导识别能力<sup>[5]</sup>。分布式孔径相参合成雷达技术也引起了国内高校和研究机构的关注, 并开展了深入的研究工作<sup>[6-14]</sup>, 其中北京无线电测量研究所是国内较早开展该技术研究单位, 在理论和试验验证等方面取得了重要进展<sup>[15-18]</sup>。研制了雷达原理样机, 实现了收发全相参模式下对运动目标的稳定跟踪, 得到了接收相参合成 6 dB, 收发相参合成 9 dB 增益改善的试验结果。

本文首先介绍了分布式孔径相参合成雷达的基本理论,给出了工作原理和技术优势;然后对飞机目标相参合成试验进行了分析和讨论,分别给出了接收相参合成和收发相参合成飞机目标跟踪试验结果;最后,对卫星目标相参合成试验进行了阐述,通过对现役两部 X 波段大型实装相控阵雷达进行相参合成改造,实现了收发全相参合成模式下对高速运动卫星目标的稳定跟踪。

## 1 分布式孔径相参合成雷达基本理论

分布式孔径相参合成雷达是一种通过中心控制处理系统控制多部单元雷达实现电磁波空间能量合成的雷达系统,见图 1。各单元雷达按一定的基线准则与布阵理论进行阵列布局,由中心控制处理系统统一控制调配,波束指向相同区域,并在中心控制处理系统控制下进行收发相参合成工作,实现目标远距离搜索发现和高精度跟踪测量。

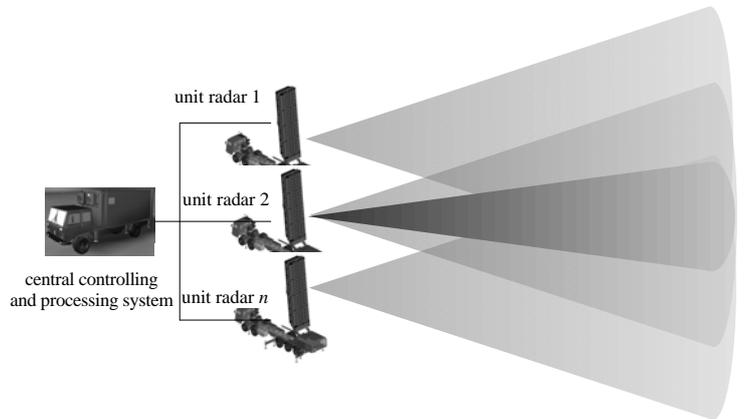


Fig.1 Diagram of distributed aperture coherence-synthetic radar

图 1 分布式孔径相参合成雷达示意图

### 1.1 工作原理

分布式孔径相参合成雷达与常规雷达不同,为了获得相参处理参数,需要区分回波,目前可区分回波的手段有时分、频分、码分等多种手段,其中基于正交编码的正交波形是最常用的方法。单元雷达发射相互正交的波形,每个单元雷达接收本雷达回波的同时,还接收其他单元雷达的回波,通过对所有接收的回波信号进行匹配滤波处理,得到每个回波对应的相位与延时,进行接收相参合成,获得  $N^2$  倍信噪比增益改善( $N$  为单元雷达数),此时称为接收相参合成阶段,其原理见图 2。

在接收相参合成的基础上,当延时和相位估计精确度满足要求时,单元雷达发射相同波形,通过控制和调整多个单元雷达发射信号的延时和相位,在空间实现发射相参,同时在接收端实现接收相参,即全相参,获得  $N^3$  倍信噪比增益改善,此时称为收发相参合成阶段,其原理见图 3。

接收相参合成阶段利用正交波形区分不同单元雷达信号,仅是一个短暂的过渡过程,进而转入稳态过程——收发相参合成阶段,达到对信号能量的最大化利用。

### 1.2 技术优势

相比常规雷达,分布式孔径相参合成雷达具有如下技术优势:

1) 探测威力大:大的功率孔径积是实现远距离、大威力探测的基础,分布式孔径相参合成雷达的一个显著特点是具有将各单元雷达发射和接收信号分别进行相参合成的能力,功率孔径积等效是单元雷达的  $N^3$  倍,有效提高了雷达的探测威力。

2) 角分辨率高:分布式孔径相参合成雷达通过阵列稀布形成虚拟孔径,等效孔径大于各个单元雷达孔径之和,合成波束变窄,提高了雷达角度分辨率。

3) 扩展性好:根据探测需求的不同,分布式孔径相参合成雷达系统能够很容易实现功能扩展和威力扩展,目标适应性强。

4) 易于实现机动性大威力探测:分布式孔径相参合成雷达是“化整为零”思想的结晶,相对于大孔径雷达,分布式孔径相参合成雷达可实现快速移动,及时变换阵地,生存能力强。同时分布式孔径相参合成雷达既要部署也可前沿部署,作战形式灵活多样,能实现试战结合与应急作战。

5) 工程实现性好:单元雷达规模小,技术成熟,工程实现性好(如工艺、成本和宽带宽扫),研制过程可实现批产化,能够有效降低成本。

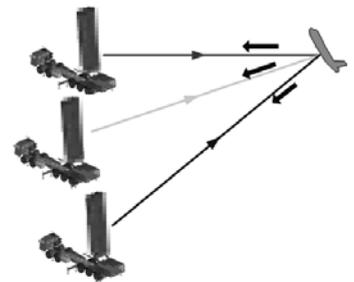


Fig.2 Principles of receive-coherence

图 2 接收相参合成阶段原理示意图

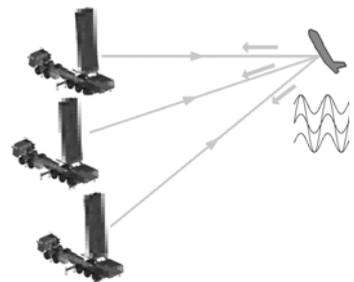


Fig.3 Principles of full-coherence

图 3 收发相参合成阶段原理示意图

## 2 飞机目标相参合成试验验证与分析

### 2.1 雷达原理样机简介

为了从不同频段和不同体制对分布式孔径相参合成雷达技术进行全面研究和验证,北京无线电测量研究所分别研制了 C 波段两单元相控阵体制、C 波段两单元单脉冲体制和 X 波段两单元相控阵体制三套分布式相参合成雷达原理样机,通过雷达原理样机,实现了收发全相参模式下对飞机目标的稳定跟踪,验证了多项关键核心技术。

C 波段两单元相控阵体制雷达原理样机由两部固态有源相控阵雷达和中心控制处理系统组成,见图 4。单部雷达对于 2 m<sup>2</sup> 目标作用距离大于 38 km,电扫范围为 ±45°。图 5 为 C 波段两单元单脉冲体制雷达原理样机,样机采用和差单脉冲体制,两维伺服机械调转,单部雷达对于 2 m<sup>2</sup> 目标作用距离大于 70 km。图 6 为 X 波段两单元相控阵体制雷达原理样机,单部雷达对于 2 m<sup>2</sup> 目标作用距离大于 65 km。



Fig.4 Prototype of C band monopulse radar  
图 4 C 波段两单元相控阵体制雷达原理样机



Fig.5 Prototype of C band phased array radar  
图 5 C 波段两单元单脉冲体制雷达原理样机

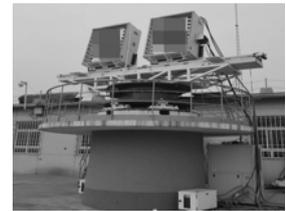


Fig.6 Prototype of X band phased array radar  
图 6 X 波段两单元相控阵体制雷达原理样机

### 2.2 接收相参合成跟踪试验

接收相参合成阶段,单元雷达之间发射相互正交的波形,单元雷达除接收自己发射的信号,也接收其他雷达发射的信号,每个单元雷达对接收到的所有信号进行匹配滤波处理,并进行相参合成处理。区别于固定目标,飞机目标与雷达之间的几何关系是时变的,这就造成了雷达之间的相位差是时变的,如图 7 所示,为相参合成参数估计相位值变化情况。相参合成对运动目标回波信噪比增益改善见图 8,接近理论值 6 dB 增益改善。

### 2.3 收发相参合成跟踪试验

收发相参合成阶段,单元雷达之间发射相同的电磁波信号,电磁波信号在目标处进行相参合成,回波信号能量增强,理论上两单元雷达发射信号相参合成回波信号幅度改善值为 6 dB,如图 9 所示,为接收相参和收发相参合成阶段回波信号幅度变化情况,发射相参回波信号幅度改善均值为 5.76 dB。

与接收相参合成阶段一样,收发相参合成阶段单元雷达之间的相位差同样是时变的,见图 10,因此发射信号相位控制值是时变的,信号处理需要根据当前回波信号获取下一拍发射信号相位值,相位估计和控制精确度直接影响到发射相参合成效果,是分布式孔径相参合成雷达一项关键技术。

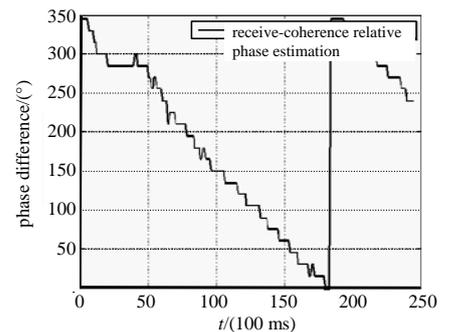


Fig.7 Parameter estimation of phase change  
图 7 参数估计相位值变化情况

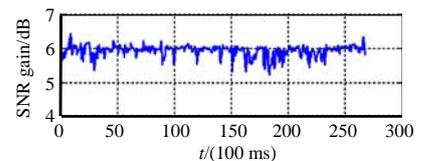


Fig.8 Receive-coherence SNR gain improvement  
图 8 接收相参合成信噪比增益改善

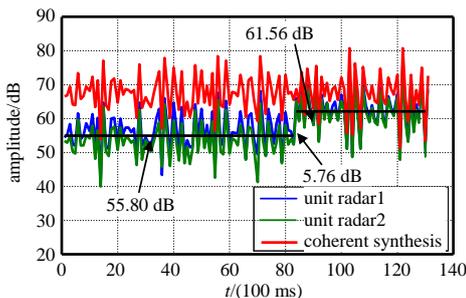


Fig.9 Receive-coherence and transmit-receive-coherence signal amplitude changes  
图 9 接收相参和收发相参阶段信号幅度变化情况

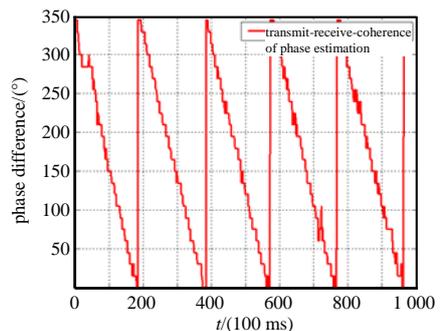


Fig.10 Transmit-receive-coherence phase difference change  
图 10 收发相参合成相位差变化情况

图 11 为收发相参合成信噪比增益改善情况,由于收发相参合成阶段单元雷达发射电磁波信号在空间进行了相参合成,无法同时获取单元雷达独立探测时的回波信号幅度,为了尽可能准确地计算收发相参合成信噪比增益改善情况,在收发相参合成探测相邻驻留周期增加了单元雷达独立目标跟踪支路,实时获取单元雷达回波信号幅度,用于信噪比增益改善计算。虽然该方法能够很大程度提升计算准确度,但由于信号幅度获取存在时间差,且目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)起伏变化,导致信噪比增益改善计算存在误差,此外,回波信号幅度与噪声独立计算也会引入误差,因此,采用统计思想来评估收发相参合成信噪比增益改善效果。通过统计,收发相参合成阶段信噪比增益改善平均值为 8.58 dB,接近理论值 9 dB 增益改善。

接收相参和收发相参合成阶段飞机跟踪航迹见图 12,航迹连续性好,无断批失跟情况,目标跟踪稳定。通过图形还可以发现,当目标飞离雷达到一定距离时,单元雷达目标丢失,而相参合成依然对目标进行稳定跟踪,充分体现了分布式孔径相参合成雷达的技术优势。

### 3 卫星目标相参合成试验验证与分析

为了进一步提升分布式孔径相参合成雷达技术成熟度等级,利用现役两部 X 波段大型实装相控阵雷达开展了分布式孔径相参合成卫星目标跟踪试验。图 13(a)为相参合成幅度改善情况,通过图形可以发现当试验系统由接收相参转收发相参时,回波信号幅度有一个明显的提升,约为接收相参回波信号幅度的两倍,即 6 dB 幅度改善,说明发射电磁波信号实现了空间能量合成。由于在对实装雷达进行相参合成改造时,没有对收发相参合成探测的相邻驻留周期增加单元雷达独立目标跟踪支路,试验系统很难准确地统计收发相参合成信噪比增益改善情况,因此,本文没有给出卫星目标相参合成跟踪信噪比增益改善试验结果,但通过图 13(a)相参合成幅度改善情况能够反映出单元雷达发射的电磁波信号实现了空间能量合成;图 13(b)为相参合成卫星目标跟踪航迹图,从试验结果可以看出,针对高速运动卫星目标,实现了收发全相参模式下的稳定跟踪,验证了高速运动目标条件下,参数估计与控制算法的有效性以及距离、角度跟踪回路闭合的可行性。

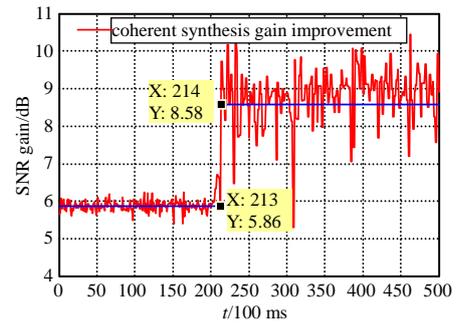


Fig.11 Transmit-receive-coherence SNR gain improvement  
图 11 收发相参合成信噪比增益改善

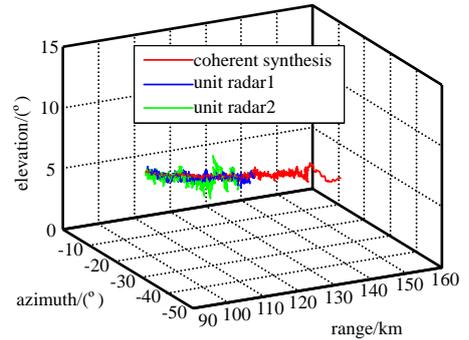
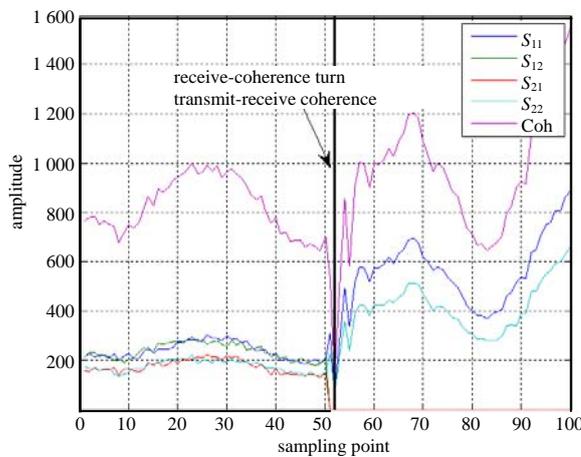
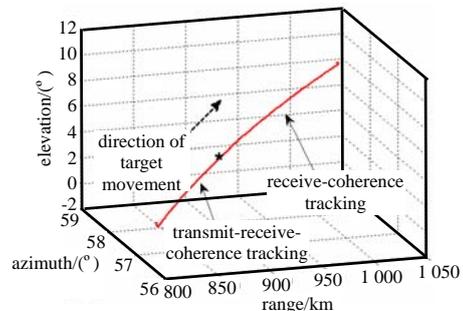


Fig.12 Tracking route of coherent synthesis plane target  
图 12 相参合成飞机目标跟踪航迹图



(a) coherent synthesis amplitude improvement



(b) tracking route of coherent synthesis satellite target

Fig.13 Satellite target coherent synthesis test results

图 13 卫星目标相参合成试验结果

## 4 结论

本文分别针对飞机和卫星等运动目标相参合成试验进行了阐述和分析,给出了相参合成运动目标跟踪试验结果,试验结果表明目标跟踪稳定,相参合成信噪比增益改善接近理论值,验证了雷达系统总体设计、参数估计、联合阵列测角和时频同步等核心关键技术,有力地推动了分布式孔径相参合成雷达技术的进步。

### 参考文献:

- [1] CUOMO K M,COUTTS S D,MCHARG J C,et al. Wideband aperture coherence processing for next generation radar[R]. USA: MIT Lincoln Laboratory, 2004.
- [2] CUOMO K M,COUTTS S D,MCHARG J C,et al. Distributed coherent aperture measurements for next generation BMD radar[C]// Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing. Waltham,USA:IEEE, 2006:390-393.
- [3] BROOKNER E. Phased-array and radar breakthroughs[C]// IEEE Radar Conference. Boston,USA:IEEE, 2007:37-42.
- [4] BROOKNER E. Phased-array and radar astounding breakthroughs—an update[C]// IEEE Radar Conference. Rome,Italy: IEEE, 2008:1-6.
- [5] National Research Council of the National Academies. Making sense of ballistic missile defense: an assessment of concepts and systems for U.S. boost-phase missile defense in comparison to other alternatives[R]. Washington,USA:The National Academies Press, 2012.
- [6] 鲁耀兵,张履谦,周荫清,等. 分布式阵列相参合成雷达技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2013,35(8):1657-1662. (LU Yaobing,ZHANG Lyuqian,ZHOU Yinqing,et al. Study on distributed aperture coherence-synthetic radar technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013,35(8):1657-1662.)
- [7] SUN P L,TANG J,HE Q,et al. Cramer-Rao bound of parameters estimation and coherence performance for next generation radar[J]. IET Radar,Sonar and Navigation, 2013,7(5):553-567.
- [8] TANG X W,TANG J,HE Q,et al. Cramer-Rao bounds and coherence performance analysis for next generation radar with pulse trains[J]. Sensors, 2013,13(4):5347-5367.
- [9] SUN P L,TANG J,TANG X W. Cramer-Rao bound and signal-to-noise ratio gain in distributed coherent aperture radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014,25(2):217-225.
- [10] YU X X,CUI G L,YANG S Q,et al. Coherent unambiguous transmit for sparse linear array with geography constraint[J]. IET Radar,Sonar and Navigation, 2017,11(2):386-393.
- [11] ZENG T, YIN P L, LIU Q H. Wideband distributed coherent aperture radar based on stepped frequency signal:theory and experimental results[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2016,10(4):672-688.
- [12] LONG T,ZHANG H G,ZENG T,et al. High accuracy unambiguous angle estimation using multi-scale combination in distributed coherent aperture radar[J]. IET Radar,Sonar and Navigation, 2017,11(7):1090-1098.
- [13] LIU X H,XU Z H,WANG L S B. Performance analysis of coherent parameters estimation algorithm for distributed coherent aperture radar [C]// 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Xiamen, China:IEEE, 2017:1-5.
- [14] YU X X,CUI G L,GAO S W,et al. Sparse array design for distributed aperture coherence-synthetic radar[C]// 2016 CIE Radar Conference. Guangzhou,China:IEEE, 2016:1-5.
- [15] 鲁耀兵,高红卫,周宝亮. 分布式孔径相参合成雷达技术[J]. 雷达学报, 2017,6(1):55-64. (LU Yaobing,GAO Hongwei,ZHOU Baoliang. Distributed aperture coherence-synthetic radar technology[J]. Journal of Radars, 2017,6(1):55-64.)
- [16] GAO H W,ZHOU B L,ZHOU D M,et al. Performance analysis and experimental study on distributed aperture coherence-synthetic radar[C]// 2016 CIE Radar Conference. Guangzhou,China:IEEE, 2016:343-347.
- [17] GAO H W,JIN Z,ZHOU B L,et al. Research on base-line selecting of distributed aperture coherence-synthetic radar[C]// IET International Radar Conference. Hangzhou,China:IET, 2015:1-4.
- [18] 周宝亮,周东明,高红卫,等. 分布式孔径相参合成雷达联合天线增益分析[J]. 雷达学报, 2017,6(4):332-339. (ZHOU Baoliang,ZHOU Dongming,GAO Hongwei. Distributed aperture coherence-synthetic radar joint antenna gain analysis[J]. Journal of Radars, 2017,6(4):332-339.)