

# 基于多波位波束搜索的大型相控阵阵列信号处理技术

李思佳<sup>1</sup>, 刘胜利<sup>2</sup>, 张金荣<sup>2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 朱颖<sup>1</sup>, 郑建君<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

**摘要:** 数字波束合成技术是通信对抗领域里一项至关重要的技术, 通过在数字域对信号幅度和相位进行控制, 可以形成多个独立可控的波束, 形成波束指向精度高、灵活可变, 且理论上不受波束形成数量的限制。本文针对大型相控阵需求, 利用波束合成原理, 并结合大规模阵列信号同步技术与相控阵幅相校准技术, 实现一种可同时产生 180 个偏馈波束的多波位波束搜索系统。该系统可以利用波束群的实时扫描功能, 实现大范围的波束搜索, 更快定位目标角度。该系统已在工程上进行应用, 并成功执行大型测控任务, 取得圆满成功。

**关键词:** 数字波束合成; 相控阵; 阵列信号处理; 多波位

**中图分类号:** TN911; TN958.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2024)01-0018-06

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20230905002

**引用格式:** 李思佳, 刘胜利, 张金荣, 等. 基于多波位波束搜索的大型相控阵阵列信号处理技术[J]. 遥测遥控, 2024, 45(1): 18-23.

## Technology of Array Signal Processing for Large Phased Arrays Based on Muti-beam Position Search

LI Sijia<sup>1</sup>, LIU Shengli<sup>2</sup>, ZHANG Jinrong<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, ZHU Ying<sup>1</sup>, ZHENG Jianjun<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Digital beam forming technology is a key in the field of communication countermeasures. By controlling the signal amplitude and phase in the digital domain, multiple independent and controllable beams can be formed, with high precision and flexibility in beam pointing, and theoretically not limited by the number of beam forming. The article focuses on the requirements of large phased arrays, utilizes the principle of digital beam forming, and combines large-scale arrays signal synchronization technology and phased arrays amplitude-phase calibration technique, implements a multi-wave position beam search system that can simultaneously generate 180 biased beams. It can utilize the real-time scanning function of the beam group to achieve large-scale beam search and faster target angle positioning. The system has been applied in engineering and successfully executed a large-scale measurement and control task, achieves complete success.

**Keywords:** Digital beam forming; Phased array; Array signal processing; Multi wave position

**Citation:** LI Sijia, LIU Shengli, ZHANG Jinrong, et al. Technology of Array Signal Processing for Large Phased Arrays Based on Muti-beam Position Search[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 18-23.

## 0 引言

针对我国测控系统的发展要求, 如何实现低信噪比下高动态目标的捕获和跟踪, 成为了目前测控领域面临的一个重要课题, 也是地面测控系统面对的一个新的挑战。相控阵天线由于具有灵活可变的波束指向, 可实现无惯性快速扫描等显

著优点, 近几年在测控领域得到广泛关注。对于相控阵天线, 可以通过补偿幅度和相位, 改变天线波束最大值指向, 实现天线波束的相控扫描<sup>[1-3]</sup>。

文献[4]提出了基于数字波束形成的侦查技术, 对数字波束形成侦查关键技术的应用进行了分析, 但缺乏相关实际工程应用研究<sup>[4]</sup>。文献[5]提出了一种基于数字波束形成雷达体制的最小软件化综合

处理机设计。可以利用系统同步以及系统校准等手段,采用多级流水架构,实现阵列信号合成和处理。文献[6]提出了一种基于多波束馈源阵列的目标角捕获方案,利用Ka频段波束天线,实现了对高速飞行目标的角度捕获,可以解决窄波束天线的角度引导和捕获问题。

数字波束形成能够自适应地形成空域抗干扰、形成多个独立可控的波束<sup>[7-9]</sup>。但是由于大型相控阵系统内天线单元较多,在得到高增益合成信号的同时,合成波束宽度很窄,导致扫描范围较小。针对这一问题,本文基于波束合成技术,实现一种可用于大型相控阵的数字波束炸裂系统,利用数字信号处理(DSP)和现场可编程逻辑器件(Field Programmable Gate Array, FPGA)灵活的可编程性,采用相控阵天线的同时多波束能力形成一个波束群,并通过切换不同波位,串行实现若干个指向不同中心角度的波束群,扩大波束扫描范围,在低信噪比条件下,完成对单个高动态目标的快速捕获和稳定跟踪。目前依托该系统研制的阵列信号处理设备,可实现主波束的合成和180个偏馈波束的炸裂,通过波位切换和偏馈波束的实时处理,可扩大波束的扫描范围,极大地减小目标搜索时间。

## 1 数字波束合成原理

以一维线阵为例,按照阵列天线的原理,假设天线波束指向的最大值角度为 $\theta_b$ ,目标所在方向为 $\theta$ ,则在空间传播中,相邻天线单元接收信号的空间相位差和阵内相位差分别为<sup>[10,11]</sup>:

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \\ \Delta\phi_B &= \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_B\end{aligned}\quad (1)$$

对第 $i$ 天线单元,在任意采样时间得到的接收信号可以表示为:

$$\begin{cases} I_i = a_{i0} \cos[\Delta\phi_0 + i\Delta\phi] \\ Q_i = a_{i0} \sin[\Delta\phi_0 + i\Delta\phi] \end{cases}\quad (2)$$

式中, $\Delta\phi_0$ 是回波信号与本振信号之间的相位差,各个天线单元的相位差相同。 $a_{i0}$ 为各天线单元接收信号的幅值。如果各个天线单元的信号增益是一样的,并且每个传输通道带来的增益影响也相同,那么 $a_{i0}$ 为常数;如果各个天线单元信号的增益不同,需要实现幅度加权,那么, $a_{i0}$ 便不是

常数。

假定要形成多个不同指向的波束。设第 $k$ 个波束的波束指向为 $\theta_{Bk}$ ,则阵内相位补偿值应为 $\Delta\phi_{Bk}$

$$\Delta\phi_{Bk} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_{Bk}\quad (3)$$

可以得到第 $k$ 个波束的输出信号为

$$y_k(n) = \mathbf{w}_k^H \mathbf{X}(n) = \sum_{m=1}^M x_m(n) e^{-j(m-1)\beta_k}\quad (4)$$

进行相位补偿后, $i$ 路信号的输出应为:

$$\begin{cases} I'_i = a_{i0} \cos[\Delta\phi_0 + i\Delta\phi - i\Delta\phi_{Bk}] \\ Q'_i = a_{i0} \sin[\Delta\phi_0 + i\Delta\phi - i\Delta\phi_{Bk}] \end{cases}\quad (5)$$

进一步可得

$$\begin{cases} I'_i = I_i \cos(i\Delta\phi_{Bk}) + Q_i \sin(i\Delta\phi_{Bk}) \\ Q'_i = -I_i \sin(i\Delta\phi_{Bk}) + Q_i \cos(i\Delta\phi_{Bk}) \end{cases}\quad (6)$$

写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ Q'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(i\Delta\phi_{Bk}) & \sin(i\Delta\phi_{Bk}) \\ -\sin(i\Delta\phi_{Bk}) & \cos(i\Delta\phi_{Bk}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \end{bmatrix}\quad (7)$$

如果要在DBF(数字波束形成)处理中实现降低天线副瓣所需的幅度加权,令 $i$ 单元的幅度加权系数为 $a_{ii}$ ,则 $I'_i$ 和 $Q'_i$ 应为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ Q'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ii} \cos(i\Delta\phi_{Bk}) & a_{ii} \sin(i\Delta\phi_{Bk}) \\ -a_{ii} \sin(i\Delta\phi_{Bk}) & a_{ii} \cos(i\Delta\phi_{Bk}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \end{bmatrix}\quad (8)$$

第 $k$ 个波束的天线方向图函数 $|F_k(\theta)|$ 为:

$$|F_k(\theta)| = (I_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2)^{\frac{1}{2}}\quad (9)$$

其中, $I_\Sigma = \sum_{i=0}^{N-1} I'_i$ ,  $Q_\Sigma = \sum_{i=0}^{N-1} Q'_i$ 。

如上所述,改变配相值(阵内相位差) $\Delta\phi_{Bk}$ ,即可改变 $k$ 波束的指向。如果同时进行多个 $\Delta\phi_{Bk}(k=1,2,\dots)$ 的补偿,那么可得到多个接收波束。改变幅度加权系数 $a_i$ (可由数字波束算法在原有加权基础上再进行加权),即可控制波束的副瓣电平。

推广至平面阵,平面相控阵天线方向图函数可表示为

$$\begin{aligned} F(\theta, \varphi) &= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} a_{ik} \\ &\quad \exp\{j[i(dr_1 \cos\theta \sin\varphi - \alpha) + k(dr_2 \sin\theta - \beta)]\} \end{aligned}\quad (10)$$

由上式可以看出,对于平面阵,改变相邻天线单元之间的相位差,即阵内相位差 $\beta$ 与 $\alpha$ ,即可实现天线波束的相控扫描。

## 2 关键技术

为了实现高动态目标的快速捕获, 本文实现了一种基于波束炸裂的多波位波束搜索技术, 首先在中心波束周围炸裂出若干个波束组成波束群, 然后通过切换中心波束的角度, 产生不同波位, 进而产生覆盖范围不同的若干波束群。通过控制波位切换的时间, 可以实现波束群的实时扫描, 由此实现大范围的波束搜索功能, 更快定位目标角度。针对大型相控阵天线, 完成上述大规模的信号合成和炸裂, 需要严格的同步技术以及精确的幅相校准技术。

### 2.1 大规模阵列信号同步技术

#### 2.1.1 高精度同步采样技术

在大型相控阵天线中, AD、DA 数量很大, 成百上千路 AD、DA 之间无法稳定同步, 每次上电后都需要重新校准<sup>[13]</sup>。针对这一问题, 本文采用两级同步方法, 具体原理图如图 1 所示, 第一级同步方案使用的时钟相对较低, 可以允许系统布线时放宽对于同步信号分发的指标要求和难度, 可以提升大规模相控阵系统的同步可靠性, 通过 TDC 监测, 可以实时了解整阵同步健康状况, 可以进一步提升 ADC/DAC 采样率, 提高整阵性能。可保证每次上电, 每一个 ADC/DAC 的同步位置固定, 无须每次上电校准, 保证数字波束合成正确, 提高合成效率, 从而优化有源面阵的指标。

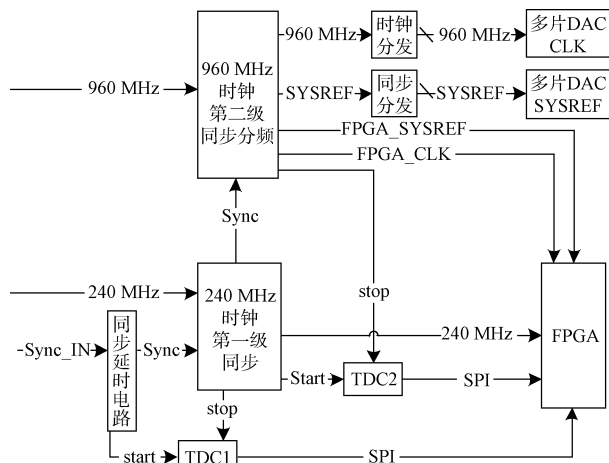


图 1 两级同步装置组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-stage synchronization device composition

#### 2.1.2 多板多片高速同步技术

数字波束合成技术实现的难点是各通道信号进行合成时必须严格同步。各块阵列信号处理板和各数模转换终端在工作时必须同步产生或接收信号, 如果任何一个终端采样的信号与其他终端采样信号不同步, 就会造成通道间的幅度或相位不一致, 导致波束合成不正确, 降低空间合成效率, 从而影响合成信号的幅度。同时, 各阵列信号处理板炸裂形成的若干个波束也必须严格同步, 保证同时传到后续的成像基带, 完成信号的捕获。因此为了更充分发挥数字波束合成与炸裂技术的优势, 整个系统必须具备一个稳定可靠的同步方法以保证各通道、各板卡之间的同步。

对于大型数字相控阵, 由于终端数量多, 因此需要接入大量的同步信号。在使用传统等长屏蔽同轴电缆传输同步信号时, 由于其抗强电磁干扰能力弱, 容易造成触发信号不同步, 因此采用时频光传输的方式。同步信号由外部同步信号源产生, 经时频光发射机转换成时频光信号并分发至各终端的时频光接收模块, 时频光接收模块恢复同步信号, 接入每个阵列信号处理板, 如图 2 所示。

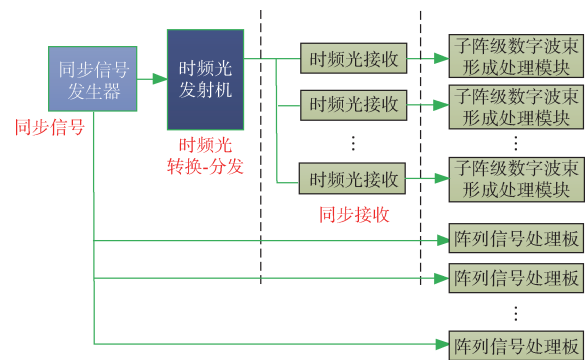


图 2 同步分发拓扑图

Fig. 2 Synchronous distribution topology diagram

### 2.2 大规模相控阵幅相校准技术

在相控阵天线系统中, 需要对各个阵元的相位和幅度进行严格的控制, 以确保天线波束的指向正确<sup>[14-17]</sup>。为了克服数字波束形成系统中各接收通道由于器件、线缆的生产、装配公差, 以及系统工作环境等因素引起的接收通道间幅度、相位不一致, 导致系统合成效率低的问题, 本文利用大规模相控阵幅相校准技术, 通过测量、修正各接收通道间的幅度、相位偏差, 确保了接收通道间幅度、相位的一致性, 使系统达到较高的信号

合成效率。而且此种快速校准工程不依赖于外部条件,可实现随时随地快速校准<sup>[18-20]</sup>。

具体校准流程如下图3所示。由同步信号发生器产生同步信号,分发给中心DBF处理机及*N*个处理终端。阵列主控板产生的中频校准信号,经接收校准变频器后产生射频校准信号,再由接收校准网络分发给终端上每个R组件模块耦合器接口。经下变频后变为中频信号,在同步信号的驱动下,将ADC采样信号顺序传输至主控板。主控板利用各通道的采样信号,采用FFT运算计算出各通道接收校准信号的幅度、相位。将上述幅度、相位偏差传输给相应的处理终端,由处理终端利用此信息对接收信号幅度、相位进行补偿修正,从而实现系统中全部接收通道的快速校准。

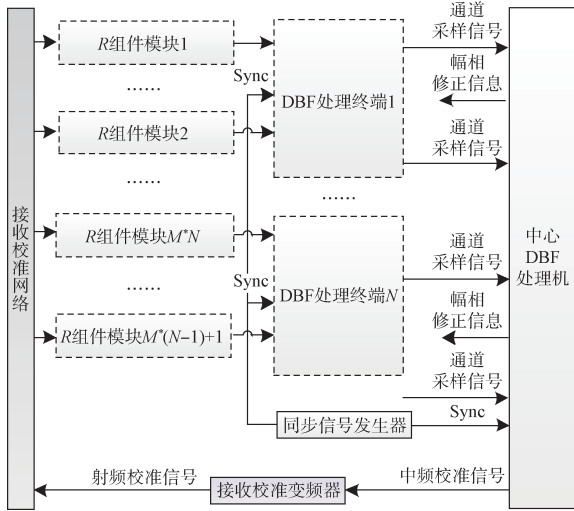


图3 快速校准流程图

Fig. 3 Rapid calibration process graph

### 2.3 基于波束炸裂的多波位波束搜索技术

由波束合成原理可知,通过补偿每个天线通道的相位值 $\Delta\phi_{Bk}(k=1,2,\dots)$ ,可以实现合成波束的指向控制,而 $\Delta\phi_{Bk}(k=1,2,\dots)$ 与球坐标角度 $\varphi$ 、 $\theta$ 相关。因此为了实现波束群扫描,首先需要确定主波束周围的炸裂角度,即球坐标 $\varphi$ 、 $\theta$ ,以便在主波束周围形成波束群。

对单个波束群建模<sup>[6,7]</sup>,假定每个波束群内包含*N*个波束,并假定当前波束群中心位于 $\theta=0^\circ$ 、 $\varphi=0^\circ$ ,记第*i*个波束相对于当前波束群中心的坐标为 $(\theta_{i\_Local}, \varphi_{i\_Local})$ , $i=1,2,\dots,N$ 。

当前波束群中心在全局扫描空域内的坐标记作 $(\theta_c, \varphi_c)$ ,则当前波束群中每个波束的坐标

$(\theta_{i,2}, \varphi_{i,2})$ 为:

$$\theta_{i,2} = \theta_{i\_Local}, \varphi_{i,2} = \varphi_{i\_Local} - \varphi_c \quad (11)$$

进一步计算第*i*个波束的坐标 $(\theta_{i,2}, \varphi_{i,2})$ 对应的直角坐标 $(U_{i,2}, V_{i,2}, Z_{i,2})$ 为:

$$\begin{cases} U_{i,2} = \sin(\theta_{i,2}) \times \cos(\varphi_{i,2}) \\ V_{i,2} = \sin(\theta_{i,2}) \times \sin(\varphi_{i,2}) \\ Z_{i,2} = \cos(\theta_{i,2}) \end{cases} \quad (12)$$

则波束群内第*i*个波束在全局坐标系下的直角坐标 $(U_{i\_Global}, V_{i\_Global}, Z_{i\_Global})$ 为:

$$[U_{i\_Global} \ V_{i\_Global} \ Z_{i\_Global}]^T = J_{\_mtx}^{-1} \times [U_{i,2} \ V_{i,2} \ Z_{i,2}]^T \quad (13)$$

其中 $J_{\_mtx}$ 为旋转矩阵:

$$J_{\_mtx} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) \times \cos(\varphi_c) & \cos(\theta_c) \times \sin(\varphi_c) & -\sin(\theta_c) \\ -\sin(\varphi_c) & \cos(\varphi_c) & 0 \\ \cos(\theta_c) \times \cos(\varphi_c) & \cos(\theta_c) \times \sin(\varphi_c) & \cos(\varphi_c) \end{bmatrix} \quad (14)$$

由第*i*个波束在全局坐标系下的直角坐标 $(U_{i\_Global}, V_{i\_Global}, Z_{i\_Global})$ 可得到其球坐标 $\theta$ 、 $\varphi$ 为

$$\begin{aligned} \theta &= \arccos\left(\frac{Z_{i\_Global}}{\sqrt{U_{i\_Global}^2 + V_{i\_Global}^2 + Z_{i\_Global}^2}}\right) \\ \phi &= \arctan\left(\frac{V_{i\_Global}}{U_{i\_Global}}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

综上所述,可以以任一角度的波束为中心,在其周围炸裂出相对中心波束角度固定的*i*个波束,其中每个波束的球坐标角度为 $\theta$ 、 $\varphi$ 。因此,可以通过设置若干个相对中心波束的不同角度,得到对应指向的波束,组成一个波束群。图4是以(0,0)为波束中心,在其主波束周围炸裂出偏馈波束组成的波束群示意图。

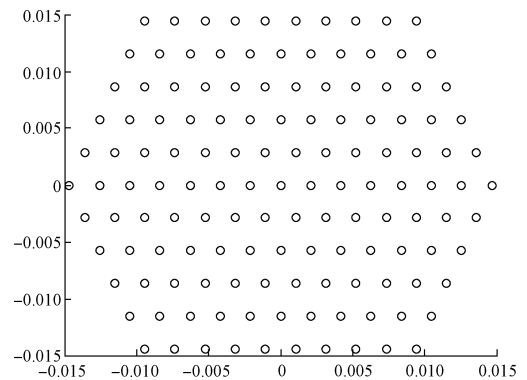


图4 炸裂波束群示意图

Fig. 4 Diagram of burst beam group

进一步, 如果实时切换中心波束的角度, 产生不同的波位, 每个波位周围均利用波束炸裂算法形成波束群, 那么利用基于波束炸裂的多波位波束搜索技术, 就可以实现大范围的波束搜索, 缩短搜索目标的时间。

### 3 实现效果

基于以上关键技术, 本文实现了一种基于波束炸裂的多波位波束搜索技术, 实现高动态目标的快速捕获, 在主波束周围炸裂出 180 个无缝拼接的偏馈波束, 构成“蜂窝状波束群”, 将单个覆盖范围为  $0.21^\circ \times 0.14^\circ$  的波束, 炸裂为覆盖范围为  $2.1^\circ \times 1.8^\circ$  的波束群。图 5 是由主波束炸裂出的 180 个波束中的第一排 10 个波束扫描得到的方向图。由图 5 可以看出, 炸裂出的 10 个偏馈波束具有不同指向信息。

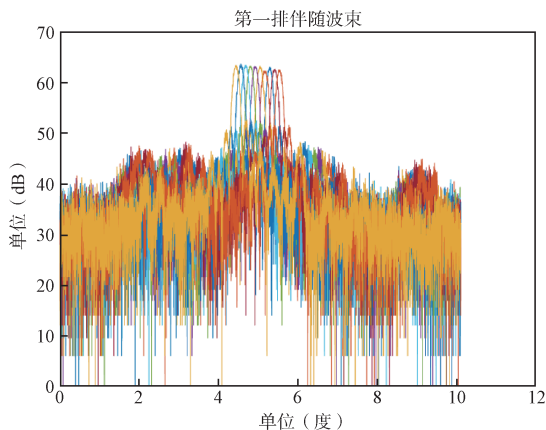


图 5 第一排偏馈波束方向图

Fig. 5 First row of off-feed beam direction diagram

完成波束炸裂后, 得到覆盖范围更大的波束群。通过设置不同波位, 改变合成主波束角度, 产生指向不同角度的波束群, 进一步扩大波束扫描范围。

图 6 所示为多个波位通过波束炸裂算法得到的炸裂波束示意图。经过波束炸裂算法, 可以将若

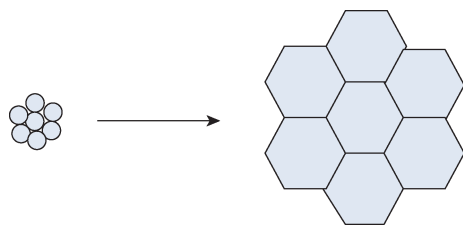


图 6 多波位炸裂波束示意图

Fig.6 Diagram of multi wave position beam

干个覆盖范围很小的波束炸裂为 180 个偏馈波束组成的波束群, 再结合多波位搜索方式, 实现大范围波束扫描功能, 表 1 所示为搜索相同范围, 原单波位波束搜索时间与使用多波位炸裂算法形成波束群后搜索时间对比表。表中数据为工程实测值, 为从开始搜索目标到确定目标并将结果送给成像基带的时间。由表 1 可以看出, 使用基于波束炸裂的多波位波束搜索技术, 可以极大地减小目标搜索时间。

表 1 原技术与改进技术搜索时间对比表

Table 1 Comparison of search time between original technology and improved technology

波束搜索范围	单波位波束搜索时间	多波位炸裂波束搜索时间
$\pm 3^\circ$	609 ms	20 ms
$\pm 5^\circ$	945 ms	37 ms
$\pm 8^\circ$	1 307 ms	61 ms

### 4 结束语

本文对相控阵数字波束合成技术进行了系统的理论分析, 结合研究要求, 基于波束合成技术, 实现一种可用于大型相控阵数字波束炸裂系统, 并介绍了关键技术和实现效果, 目前该技术已在工程上进行应用。结果表明: 本文所实现的波束合成及炸裂技术可以同时在主波束周围产生 180 个偏馈波束, 为后续成像基带的快速搜索和测控基带的快速捕获提供保障, 具有很高的工程应用价值。

#### 参考文献

[1] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[2] 姜冠楠, 徐晓东, 赵紫稷. 一种基于多子阵的数字波束形成技术及 FPGA 实现[J]. 雷达与对抗, 2021, 41(2): 23-28.  
JIANG Guannan, XU Xiaodong, ZHAO Ziji. A multiple subarray-based DBF technology and FPGA implementation[J]. RADAR&ECM, 2021, 41(2): 23-28.

[3] 肖恒, 詹银芳. 一种宽带数字多波束发射技术的实现方法[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(6): 26-29.  
XIAO Heng, ZHAN Yinfang. A realization method of broadband digital multi-beam transmission technology[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020, 43(6): 26-29.

- [4] 刘治甬, 徐海洋. 基于数字波束形成侦查技术研究[J]. 现代信息科技, 2020, 4(15): 70-75.
- [5] 冯武, 罗欣, 孔繁. 一种基于DBF雷达体制的最小软件化综合处理机设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(6): 576-581.  
FENG Wu, LUO Xin, KONG Fan. A minimal software integrated processor design based on DBF radar system[J]. Journal of CAEIT., 2021, 16(6): 576-581.
- [6] 刘增茂. 基于多波束馈源阵列的目标角捕获方法[J]. 计算机与网络, 2021, 12: 61-64.  
LIU Zengmao. Target angle capture scheme based on multibeam feed source array[J]. Computer&Network, 2021, 12: 61-64.
- [7] 朱小奇, 赵波, 陈剑, 等. 基于子阵级非周期的有限扫描阵列研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(5): 6-12.  
ZHU Xiaoqi, ZHAO Bo, CHEH Jian, et al. Study on a periodic limited scan array consisting of sub-arrays[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(5): 6-12.
- [8] 杨高雄, 宫新保. 基于平面天线阵列的数字波束形成技术研究[J]. 信息技术, 2018(5): 121-124.  
YANG Gaoxiong, GONG Xinbao. Research on DBF Technology based on Planar Antenna Array[J]. Information Technology, 2018(5): 121-124.
- [9] GAN W S, YANG J, TAN K S, et al. A digital beam-steerer for difference frequency in a parametric array[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2006, 1018-1024.
- [10] STEYSKAL H, ROSE J F. Digital beamforming for radar systems[J]. Microwave Journal, 1989, 32(1): 121-136.
- [11] 陈文俊, 王建, 聂在平. 数字阵列天线接收通道宽带信号校准与波束形成技术研究[J]. 电子学报, 2013, 41(3): 582-586.  
CHEN Wenjun, WANG Jian, NIE Zaiping. Study on the calibration of receiving channels and the beaming technology for wideband digital array antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 582-586.
- [12] 谭艳春. 相控阵雷达阵列信号的空域自适应处理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [13] 张锐, 关扬. 数字相控阵雷达同步技术研究及实现[J]. 现代导航, 2021(5): 358-362.  
ZHANG Rui, GUAN Yang. Research and implementation of digital phased array radar synchronization technology[J]. Modern Navigation, 2021(5): 358-362.
- [14] 杨李杰. 数字相控阵列的校正方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [15] 蒋鑫, 刘永刚, 陈伟. 一种基于内外校准结合的相控阵收发校准方法[J]. 电子技术, 2020(15): 106-107.
- [16] 华光, 董亚洲, 洪伟. 多波束阵列天线系统信道校准方法[J]. 东南大学学报, 2009, 39(4): 651-655.  
HUA Guang, DONG Yazhou, HONG Wei. Channel calibration method for multi-beam array antenna system [J]. Journal of Southeast University, 2009, 39(4): 651-655.
- [17] 丁坚, 薛坚. 基于通道合成的数字阵列通道校准方法[J]. 现代雷达, 2015, 37(8): 77-80.  
DING Jian, XUE Jian. Channel calibration method based on channel synthetic in digital array radar[J]. Modern Radar, 2015, 37(8): 77-80.
- [18] 林新党, 石春燕. 相控阵雷达接收通道校准方法仿真[J]. 雷达与对抗, 2009, 34(1): 23-25.  
LIN Xindang, SHI Chunyan. Simulation on the method of receiving channel calibration for the phased array radar[J]. Radar&ECM, 2009, 34(1): 23-25.
- [19] 操礼长, 谢学东, 邓忠杰. 基于射频数字化的多通道信号处理方法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 70-74.  
CAO Lichang, XIE Xuedong, DENG Zhongjie. Multi-channel signal processing method based on RF digitalization[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 70-74.
- [20] 董锦, 相飞, 雷亚龙, 等. 一种子阵级数字合成波束的远场简易校正方法[J]. 电子科技, 2018, 31(12): 43-46, 51.  
DONG Jin, XIANG Fei, LEI Yalong, et al. A simple calibration method based on far field for subarray digital receive beam forming[J]. Electronic Sci. &Tech, 2018, 31(12): 43-46, 51.

#### [作者简介]

- 李思佳 1993年生, 硕士, 工程师。  
刘胜利 1973年生, 硕士, 助理研究员。  
张金荣 1984年生, 硕士, 助理研究员。  
张磊 1987年生, 硕士, 高级工程师。  
朱颖 1983年生, 硕士, 高级工程师。  
郑建君 1987年生, 硕士, 高级工程师。

(本文编辑: 潘三英)