

基于DBF技术实现宽带相控阵天线抗干扰功能研究

高峰, 山妮娜, 刘亚召

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安
Email: 369457437@qq.com

收稿日期: 2021年5月29日; 录用日期: 2021年6月14日; 发布日期: 2021年6月29日

摘要

宽带相控阵天线自身实现抗干扰功能是通信相控阵天线领域发展的重要方向。而抗干扰的核心是采用数字波束形成(DBF, Digital Beam Forming)技术形成零陷。同时要抗 n 干扰, 必须有至少 $n + 1$ 个自由度, 利用 $n + 1$ 个子阵空间自由度进行空域自适应抗干扰处理, 由于阵列空域自由度排布特殊性, 因此需采用频域抗干扰与空域自适应抗干扰相结合的方法实现抗 n 干扰功能。文章对相控阵天线自身抗 3 干扰方法进行研究, 通过仿真结果验证采用频域抗干扰与空域自适应抗干扰相结合的方法可实现相控阵天线自身抗 3 干扰。

关键词

相控阵, 宽带, 抗干扰, DBF

Research on Achieving Anti-Interference of Broadband Phased Array Antenna Based on DBF

Feng Gao, Nina Shan, Yazhao Liu

Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Corporation, Xi'an Shaanxi
Email: 369457437@qq.com

Received: May 29th, 2021; accepted: Jun. 14th, 2021; published: Jun. 29th, 2021

Abstract

It is the one of important directions in the field of communication phased array antennas to realize

文章引用: 高峰, 山妮娜, 刘亚召. 基于 DBF 技术实现宽带相控阵天线抗干扰功能研究[J]. 无线通信, 2021, 11(3): 102-111. DOI: 10.12677/hjwc.2021.113012

anti-jamming function through broadband phased array antennas. The core of anti-interference is to use digital beam forming (DBF) technology to form nulls. At the same time, to resist n interference, there must be at least $n + 1$ degrees of freedom, and use $n + 1$ sub-array spatial degrees of freedom for spatial adaptive anti-jamming processing. Due to the particularity of the arrangement of the array spatial freedom, a combination of frequency domain anti-jamming and spatial adaptive anti-jamming must be used to realize the anti-interference function. The anti-interference method of phased array antenna is studied in this paper, a combination of frequency domain anti-jamming and spatial adaptive anti-jamming can realize anti the 3 interference by verification of simulation results.

Keywords

Phased Array, Broadband, Anti-Interference, DBF

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

用于通信领域的相控阵天线不具备自身抗干扰功能, 在使用过程中空间会带来多个干扰, 这对后端信号的调制解调带来很大困难。若在天线系统中增加一个抗干扰系统, 这不仅增加了天线系统本身的结构尺寸, 而且在安装不合理会影响天线系统的性能指标, 故相控阵天线自身抗干扰功能亟待解决。此次研究抗 3 干扰, 采用数字波束形成(DBF, Digital Beam Forming)技术形成波束零陷来实现[1] [2] [3] [4], 将天线阵面分为 4 个子阵, 使其形成 4 个自由度, 由于阵列空域自由度排布特殊, 自适应 DBF 处理对 3 个干扰的位置有一定限制, 因此此次研究采用频域自适应滤波 + 空域自适应 DBF 的方案进行抗干扰处理, 其中频域自适应滤波处理主要从频率维对 4 路输入信号进行频域滤波处理, 通过对干扰信号在频域进行检测、滤波等处理实现自适应抗干扰功能, 其抗干扰效果与干扰的来波方向无关, 主要与干扰类型(带宽)、信号强度等因素有关。频域自适应滤波处理一方面可抑制频域强干扰, 另一方面也可有效降低后续空域自适应抗干扰的压力。

2. 频域抗干扰性能分析

2.1. 频域抗干扰处理流程

频域抗干扰是从接收信号的频率维角度, 基于有效信号与干扰的能量、带宽等先验信息, 对干扰进行检测并提取干扰频率, 从而进行干扰抑制。

本研究中, 频域抗干扰处理主要在 FPGA 和 DSP 中实现, 其中 DSP 主要完成对 FPGA 截取的部分数据进行频谱分析、干扰频点检测及频域滤波策略的制定, FPGA 则实现对接收信号进行连续的频谱分析、信道滤波及信道综合等处理。

DSP 部分频域抗干扰处理具体流程如下图 1 所示。

在 FPGA 内部频域抗干扰处理具体流程如下图 2 所示。

由图 1 和图 2 可以看出, 频域抗干扰性能主要与频谱分析性能、干扰频点检测性能以及频谱置零策略等几方面有关。下面将分别对其进行分析评估。

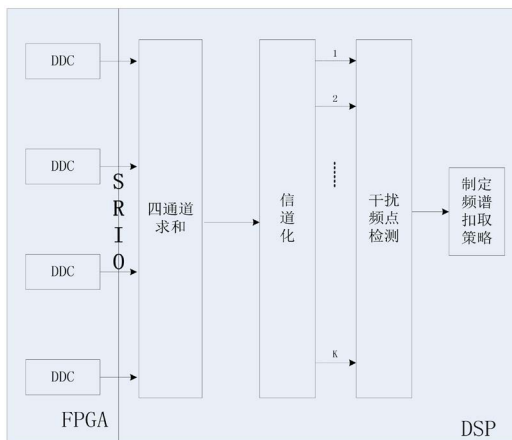


Figure 1. Frequency domain anti-jamming DSP part processing flow chart a
图 1. 频域抗干扰 DSP 部分处理流程图 a

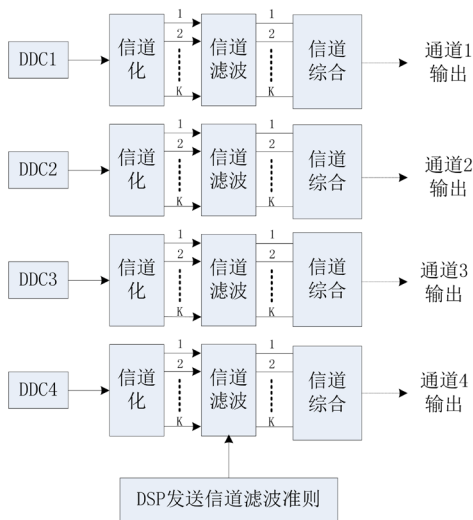


Figure 2. Frequency domain anti-jamming DSP part processing flow chart b
图 2. 频域抗干扰 DSP 部分处理流程图 b

2.2. 频谱分析性能

接收信号经前端下变频到模拟中频，模拟中频再经过数字 ADC 采样、DDC 下变频等处理后到数字基带信号，其中通道的通信信号分为 12 个用户信道，每个信道带宽 40 MHz，总带宽 480 MHz，由于同一信道间频率错开 20 MHz，因而总的数字基带信号带宽为 500 MHz，其信道划分如下图 3 所示。

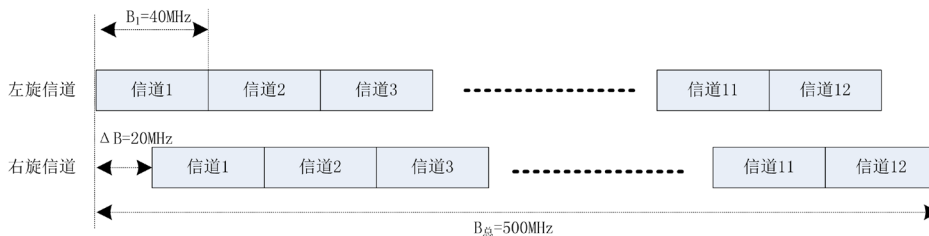


Figure 3. Channel division diagram
图 3. 信道划分示意图

性能评估：在满足单个用户信道带宽损失小于 4 MHz 的情况下，单个信道内最多可同时对抗 4 个带宽小于 0.9766 MHz 的窄带干扰，最少可抗 1 个带宽小于 4 MHz 的窄带干扰。

2.3. 干扰频点检测性能

干扰频点检测功能主要在 DSP 中实现，其主要对 FPGA 传输过来的数字基带信号进行频谱分析，然后在频率域进行能量检测，以确定干扰的频点，从而为后续制定频谱扣去策略提供依据。故在 DSP 中同样需将 500 MHz 信号带宽划分为 512 个信道，每个信道的带宽为 0.9766 MHz，以此进行干扰频点检测。

2.4. 频谱置零策略

采用固定门限在频率维进行检测，当检测到多个频点能量高于噪声电平一定比例时，拟采用能量排序选大的策略，进行频点置零处理，即在保证每个用户信道(40 MHz)带宽损失小于 4 MHz 的基础上，利用有限的频谱抑制资源对强干扰进行有效抑制。

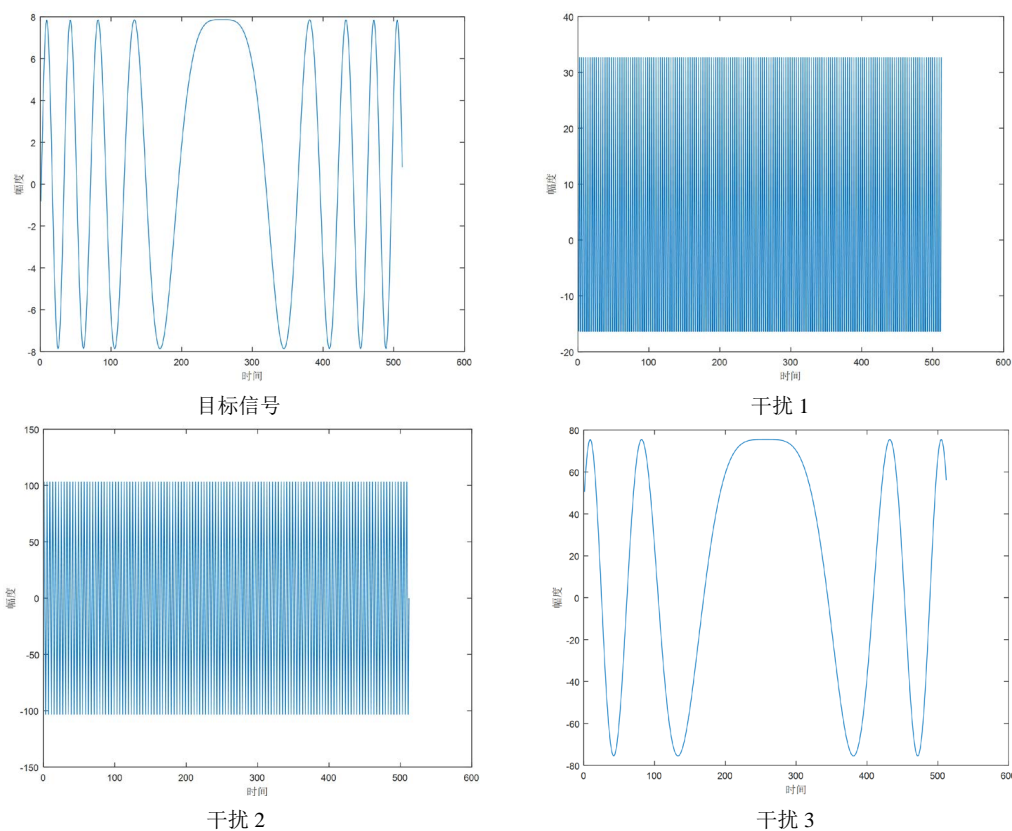
2.5. 仿真分析

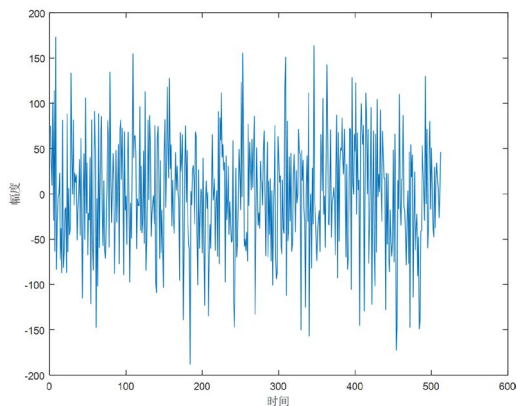
为了说明本方案频域抗干扰处理处理的有效性，下面将针对设计的几种典型干扰场景进行模拟仿真。

仿真实验：同时存在两个点频干扰、一个宽带调制干扰情况(宽带调制干扰与宽带噪声干扰等同)

假设来波信号方向方位 0° 、离轴 0° ，信号形式为线性调频信号，带宽为 40 MHz，在 500 MHz 内的频率范围为 $-20\sim 20$ MHz，信噪比为 -20 dB；子阵合成后，两个点频干扰的干噪比分别为 30 dB、40 dB，来波方向可以为任意方向，其在 500 MHz 带宽内对应的频点分别为 -200 MHz 和 150 MHz；宽带噪声的干噪比分别为 30 dB，来波方向为任意方向，带宽 20 MHz，其在 500 MHz 带宽内对应的频点分别为 $-10\sim 10$ MHz。

下面给出了信号、干扰和噪声的原始信号(图 4~6)。





干扰 4

Figure 4. The original signal of a sign, interference and noise
图 4. 信号、干扰和噪声的原始信号

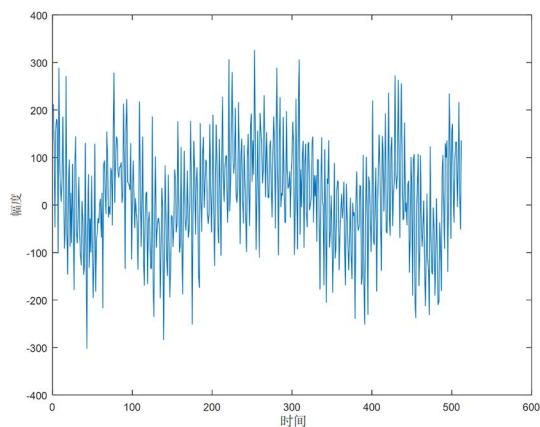


Figure 5. The raw sum of the channel, interference and noise signals before channelization
图 5. 信道化前信号、干扰和噪声的原始和信号

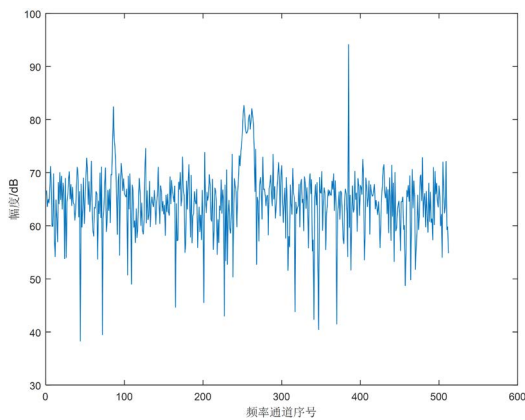


Figure 6. Channelized original sum signal frequency domain diagrams
图 6. 信道化后原始和信号频域图

由此可以按能量大小进行频域通道扣取，为保证单用户信道内所扣去的带宽小于 4 MHz，取最大的四个通道进行扣取，扣取后信号的频率信息如下图 7 所示。

下图 8 给出了频域滤波后的信号减去原始噪声信号后的残余与原始宽带调制信号的对比。

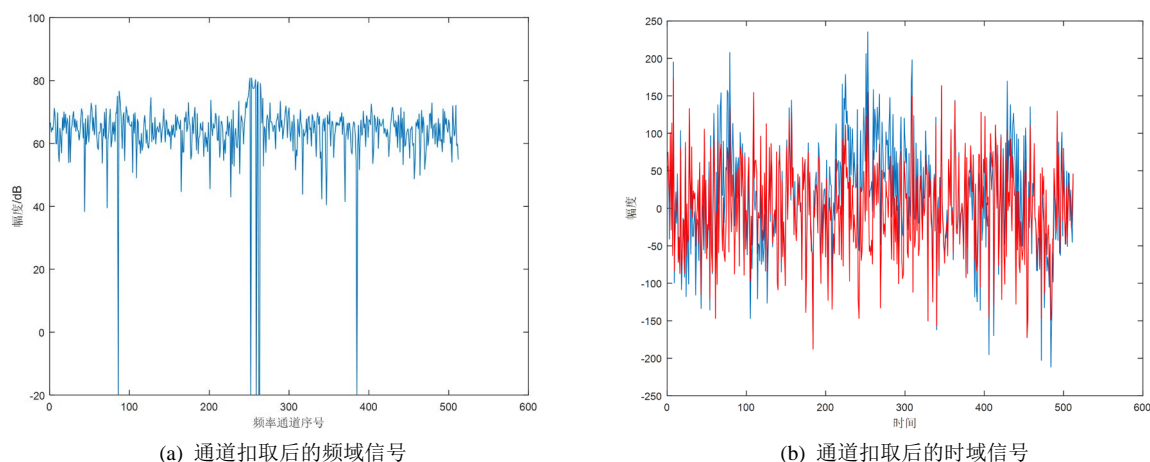


Figure 7. Time-domain and frequency-domain signals extracted from frequency domain channels
图 7. 频域通道扣取后的时域、频域信号

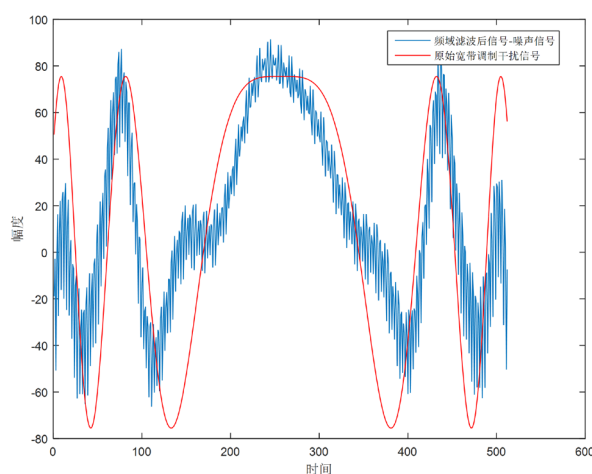


Figure 8. Contrast the frequency domain filtering residual signal with the original interference signal
图 8. 频域滤波残余信号与原始干扰信号对比

由此可以看出，频域滤波后点频干扰信号基本被滤除，但宽带调制干扰没有被滤除，其原因主要是频域滤波带宽在 40 MHz 内不会超过 4 MHz 带宽，其大部分能量均被保留下来，因而针对宽带调制干扰或宽带噪声干扰的抑制，需要先进行频域抗干扰再进行空域自适应抗干扰，这样才能有效抑制干扰。

3. 空域自适应抗干扰性能分析

3.1. 两维相控阵接收空域自适应 DBF 处理方案

空域自适应抗干扰处理思路：每个子阵通过数字采样下变频、频率滤波后，通过空域自适应 DBF 进行抗干扰处理，阵列结构如下图 9 所示。

自适应 DBF 是一个自适应空域滤波的过程，加权矢量的获取有多种最优化准则，如：信噪比(SNR)最大准则、最小均方误差准则(MMSE)、线性约束最小方差准则(LCMV)等。这三个准则在理论上是等效的，而实际应用时，可根据不同的已知条件采用不同的准则。对本次研究而言，4 个自由度采用 RLS 算法，其计算量在合理范围内，因而拟采用 RLS 算法进行自适应 DBF 处理，进行抑制干扰。

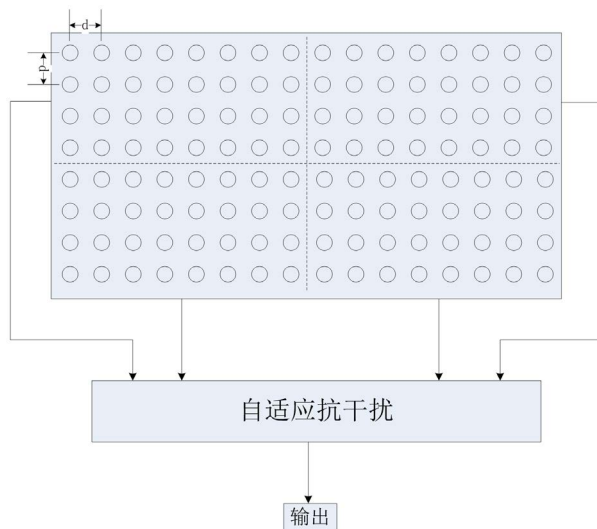


Figure 9. Array structure diagram
图 9. 阵列结构示意图

3.2. 仿真分析

仿真实验一：三干扰仿真(来波信号方向方位 0° 、离轴 0°)

干扰角度分别为(方位 90° ，离轴 20°)、(方位 100° ，离轴 40°)、(方位 170° ，离轴 60°)。下面给出了自适应处理权值的两维方向图。

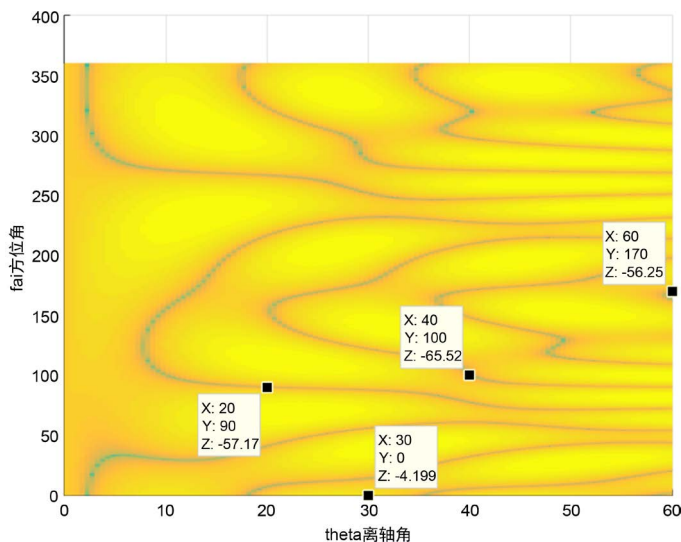


Figure 10. Adaptively process orientation diagrams of three interference
图 10. 三干扰情况下自适应处理方向图

由图 10 可以看出，(方位 90° ，离轴 20°)、(方位 100° ，离轴 40°)、(方位 170° ，离轴 60°)这三个干扰信号在 Z 轴方向均小于 -56 ，很好的将这三个干扰信号抑制掉，故采用空域自适应方法可以实现抗三干扰功能。

仿真实验二：多干扰极限情况仿真

阵列方位向同时两个干扰，干扰角度分别为(方位 0° ，离轴 30°)、(方位 0° ，离轴 50°)。下面给出了自

适应处理权值的二维方向图。

干扰角度分别为(方位 0° , 离轴 30°)、(方位 0° , 离轴 60°)。下面给出了自适应处理权值的二维方向图。

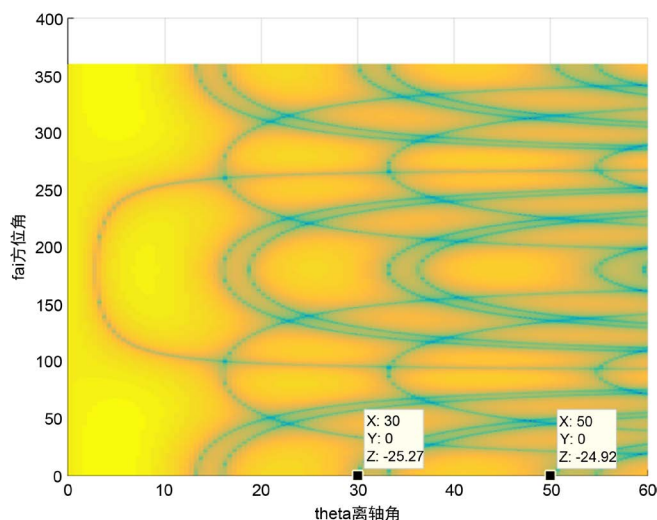


Figure 11. Adaptively process orientation diagrams (one)

图 11. 自适应处理方向图(一)

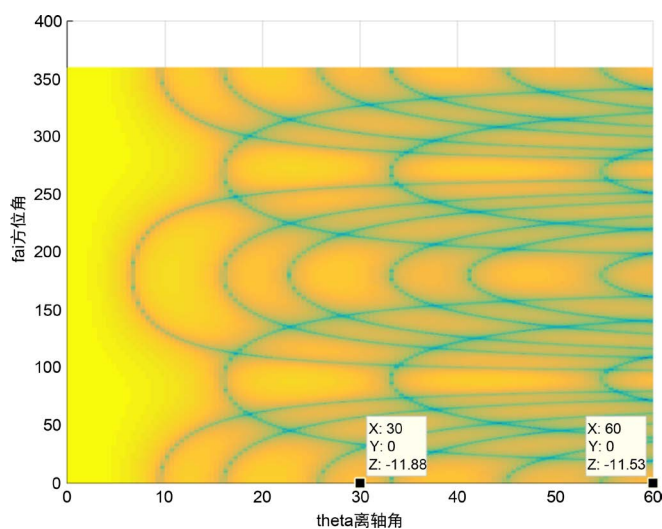


Figure 12. Adaptively process orientation diagrams (two)

图 12. 自适应处理方向图(二)

由图 11 和图 12 可以看出, 干扰角度同时分别为(方位 0° , 离轴 30°)、(方位 0° , 离轴 50°)或者同时分别为(方位 0° , 离轴 30°)、(方位 0° , 离轴 60°)是, Z 轴方向均在 $-10 \sim -20$, 干扰没有得到很好的抑制, 由此我们可以得到当方位向同时存在两个干扰时, 采用自适应处理方法是没办法抑制干扰的, 其原因是波束合成后, 方位自由度只有 2 个, 理论上同时只能自适应抑制单个干扰。

但是对于(方位 0° , 离轴 30°)、(方位 0° , 离轴 50°)这两个干扰信号有效抑制略高于(方位 0° , 离轴 30°)、(方位 0° , 离轴 60°)这两个干扰信号的抑制, 是由于 30° 与 50° 空间存在耦合, 等效于空间内仅存在单个干扰, 因而抑制效果高于(方位 0° , 离轴 30°)、(方位 0° , 离轴 60°)这两个干扰。遇到这种情况干扰需要先进行频域抗干扰再进行空域自适应抗干扰, 这样才能有效抑制干扰。

4. 频域 + 空域自适应抗干扰性能仿真

为了说明本方案频域 + 空域自适应抗干扰处理的可行性、有效性，下面将进行模拟仿真。

1) 目标信号设置

假设目标来波(方向方位 0° 、离轴 0°)，信号形式为线性调频信号，带宽为 40 MHz，在 500 MHz 内的频率范围为 $-20\sim 20$ MHz，信噪比为 -20 dB；

2) 干扰信号设置

干扰形式：2 个点频干扰；1 个宽带调制干扰；

干扰 1：干噪比 30 dB，方向为 $(0, 30^\circ)$ ，频点为 -200 MHz；

干扰 2：干噪比 30 dB，方向为 $(0, 50^\circ)$ ，频点为 50 MHz；

干扰 3：干噪比 20 dB，方向为 $(90, 30^\circ)$ ，带宽 20 MHz，频率范围为 $-10\sim 10$ MHz，信号形式为线性调频信号。

目标信号与干扰信号形式与 2.5 节仿真试验二相同，且 4 个子阵频域抗干扰后的输出信号作为空域自适应抗干扰的输入信号，因而下面主要给出了空域自适应抗干扰的结果。

下图 13 给出了频域抗干扰 + 空域自适应抗干扰处理权值的二维方向图。

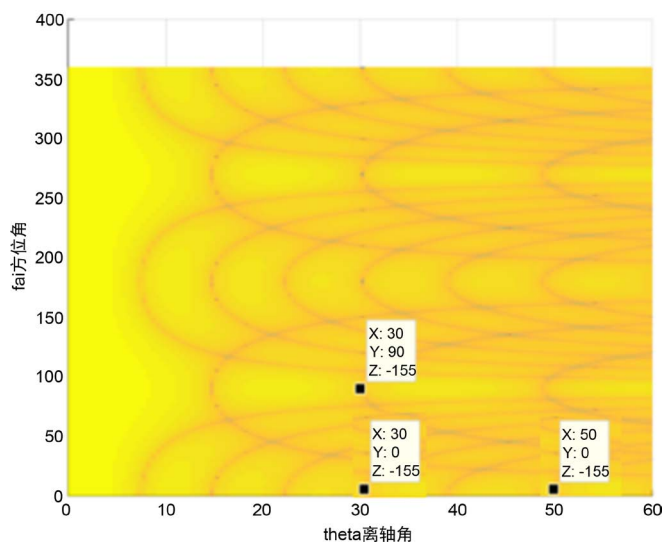


Figure 13. The processing direction diagram of frequency domain anti-jamming and spatial domain adaptive anti-jamming
图 13. 频域抗干扰 + 空域自适应抗干扰处理方向图

由仿真图可以看出，干扰信号方向分别为 $(0, 30^\circ)$ 、 $(0, 50^\circ)$ 、 $(90, 30^\circ)$ 同时对系统进行干扰，经过频域抗干扰 + 空域自适应抗干扰处理后，三个干扰信号 Z 轴放向均为 -155 ，由此可见频域抗干扰与空域自适应抗干扰联合使用会更好的抑制 3 干扰，抗干扰效果远优于单独使用频域抗干扰或空域自适应抗干扰。

5. 结论

综合上述理论分析及仿真验证可知，单独采用频域自适应的抗干扰性能与抗干扰波束方向无关，仅与干扰的数目、干扰的强度、频谱分部等参数有关。同一信道内的干扰信号总带宽大于 4 MHz 时频域自适应抗干扰仅能保证部分抑制效果，这时候需要考虑空域自适应滤波。单独采用空域自适应 DBF 处理可以对抗 3 个来自不同方向的宽带干扰，但是由于子阵空间排布的特殊性，对 2 个或 3 个干扰的来波方向

相同的有一定限制,不能很好地进行抑制,这种情况需要考虑结合频域自适应滤波。通过采用频域自适应滤波 + 空域自适应 DBF 的方案进行抗干扰处理可以很好的实现抗宽三干扰功能,并且抑制效果优于单独采用频域自适应抗干扰或单独采用空域自适应抗干扰方法。

6. 结束语

通过对单独采用频域自适应抗干扰方法、单独采用空域自适应抗干扰方法以及频域自适应抗干扰与空域自适应抗干扰相结合方法仿真验证,可得出频域自适应抗干扰与空域自适应抗干扰相结合可以实现宽带相控阵天线自身抗 3 干扰功能,并且可以有效的抗 3 干扰。该方法还需要在工程应用中进一步验证。

参考文献

- [1] 柯小梅. 宽带波束形成算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [2] 胡邸安. 宽带相控阵自适应波束形成[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [3] 胡君丽. 数字阵列接收同时多波束技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [4] 张鸿伟. 基于数字波束形成的同时多目标干扰发射技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.