

用于星载赋形天线的基于频域 多相干目标测向算法

孙海浪，陶海红，张娟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 1503室，西安 710071)

摘要：提出了一种用于星载赋形天线抗多个相干干扰的基于频域单快拍的测向算法，该方法首先采用频域多目标测向算法实现多干扰源的方向估计；基于估计出的干扰源到达方向，对相干信号采用陷零投影矩阵对强目标陷零，以达到对强干扰进行抑制从而测出弱干扰，较好地保证了相干强弱信号测向的准确性，从而有效地对同时强弱相干干扰进行抑制。仿真结果和性能分析验证了该方法的可行性。

关键词：频域多目标测向；相干信源；陷零矩阵

中图分类号：TN911.7

文献标识码：A

文章编号：1000-1328(2010)03-0830-08

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2010.03.034

0 引言

在卫星通信中，用赋形天线在空域进行波束合成为抑制强干扰是保障卫星正常通信的一项必不可少的关键技术。其中一个重要的解决方法就是在尽可能短的时间里估计出多个干扰方向然后进行调零^[1]。基于空间谐波模型的高分辨方法诸如 MUSIC^[2]，ESPRIT^[3]和空时二维自适应处理^[4]等，在高信噪比(SNR)，足够大的快拍数以及非相干信源的条件下，可以很好的解决这个问题。然而，当这些条件不满足时，这些方法的性能急剧下降。最大似然(ML)^[5]方法理论上可以解决上面遇到的问题，但是需要进行多变量非线性最大值的全局搜索，如果用穷举法，尤其当是多维而且多峰搜索时，运算量将令人难以接受^[6]。这个问题是 ML 方法进行干扰方向估计的瓶颈问题。目前已经提出了许多最大化似然函数的方法，包括交替投影、期望最大化、牛顿迭代算法等等。然而这些方法的收敛速度依赖于初始值的选取。大多数全局收敛迭代算法在初始值靠近全局最优点的区域内，有非常快的收敛性能。然而，如果初始值选取不当，收敛速度下降并且很容易落入局部极值点，从而导致收敛精度下降。对于卫星通信系统而言，相干干扰信号是常见的，采用估计干扰方向再陷零的抗干扰技术，

那么对相干干扰的测向就很关键。常用的 MUSIC 测向方法对相干源无效，平滑 MUSIC 算法对阵列一致性要求很高，星载赋形天线无法满足这一条件，因此本文采用频域多目标测向算法^[7]实现对多相干干扰源的 DOA 估计，该算法无需预先估计干扰源数目，即使在较低的干扰比条件下也能达到与 MUSIC 算法相同的测向精度。

本文首先介绍了星载多干扰模式赋形天线的阵列模型；其次提出了一种频域多目标测向算法；然后给出了基于频域多目标测向算法的测向结果，采用置零算法对强干扰调零，从而测出弱干扰方向；接着采用旁瓣相消算法对干扰陷零，给出仿真实验和性能分析；最后得出结论。

1 问题模型

本文所述的星载赋形天线采用主天线与辅助天线相结合的方案：第一副天线通过反射面赋形，即对主波束加赋形权后实现对关心区域的覆盖，用一副辅助天线通过多馈源赋形实现对敏感地区的波束覆盖，采用 10 个单波束，布阵图及阵列模型如图 1 左、右所示。

假设有 K 个远场干扰 $s_k(t)$ ($k = 1, 2, \dots, K$)，每个信号的来向为 (θ_k, φ_k) ，其中 θ_k 为方位

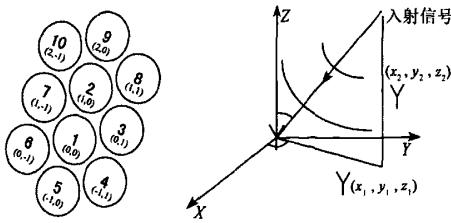


图 1 10 个辅助波束的排列方式及阵列模型

Fig.1 Distribution of the beam and array model

角, φ_k 为俯仰角, f_k 为该干扰的频率。在理想情况下, 即阵列的每个阵元为各向同性, 不考虑通道不一致性和互耦的影响时, 阵列输出矩阵表达式为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta, \varphi, f) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{A}(\theta, \varphi, f) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1K} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MK} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T \quad (5)$$

$n(t) \sim G(0, \sigma^2 I_M)$, G 为高斯分布。由于通信用户的功率比干扰功率低, 而与噪声功率差不多, 故将其近似为噪声(如 CDMA 用户, 是扩频信号, 与干扰无相干性, 不考虑通信用户干扰)。 $\mathbf{A}(\theta, \varphi, f)$ 是 $M \times K$ 维的导向矩阵, 其中 a_{nk} 是第 n 个阵元接收到的第 k 个干扰的导向矢量。假设第一个阵元为参考阵元, 第 m ($m = 1, 2, \dots, M$, 其中 $M = 10$) 个阵元的位置坐标为 (x_m, y_m, z_m) , 则:

$$a_{nk} = e^{-j2\pi f_k(x_n \cos\theta_k \sin\varphi_k + y_n \sin\theta_k \sin\varphi_k)/c} \quad (6)$$

其中 c 为光速, w_k 为干扰信号的载波频率。

2 基于频域多目标测向算法实现相干干扰源 DOA 估计

估计

基于频域多目标测向算法实现相干干扰源 DOA 估计的步骤如下:

步骤一: 基于频域多目标测向算法实现干扰源的 DOA 估计

频域多目标测向算法具体实施过程中, 首先对回波数据进行时频变换, 即对各天线阵元通道的接收数据分别做 N 点 FFT, 因为对于点频和脉冲信号,

该变换使信号相干积累, 而噪声非相干叠加, 信噪比提高 N 倍, 以便于对弱干扰精确测向; 其次, 测频并获取频域样本, 任选一个通道, 对该通道 FFT 后的结果搜索谱峰(多个谱峰分别对应多个目标), 并记录谱峰值和相应的频点坐标 f_k , 其它通道根据频点坐标取出相应位置的频域复数值构成相应的数据矢量 $y(n_k)$, 称为频域峰值快拍矢量, 可进一步写为:

$$\mathbf{y}(n_k) = \mathbf{As}(n_k) + \mathbf{w}(n_k) \quad (7)$$

其中 $s(n_k) = [s_1(n_k), s_2(n_k), \dots, s_K(n_k)]^T$ 为 K 个干扰在频域 n_k 的输出矢量, $\mathbf{w}(n_k) = [w_1(n_k), w_2(n_k), \dots, w_M(n_k)]^T$ 为噪声在频域 n_k 的输出; 基于频域峰值快拍矢量 $\mathbf{y}(n_k)$, 采用

$$\mathbf{P}_{a(\theta_k, \varphi_k, f_k)} = \frac{\mathbf{y}^H(n_k) \mathbf{P}_{a(\theta_k, \varphi_k, f_k)} \mathbf{y}(n_k)}{\mathbf{y}^H(n_k) \mathbf{P}_{a(\theta_k, \varphi_k, f_k)}^H \mathbf{y}(n_k)} \quad (8)$$

实现 K 个干扰信号的频率与到达角联合估计^[8], 其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{a(\theta_k, \varphi_k, f_k)} &= \mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k, f_k) \mathbf{a}^H(\theta_k, \varphi_k, f_k) / \\ &\quad (\mathbf{a}^H(\theta_k, \varphi_k, f_k)) \\ \mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k, f_k) \mathbf{P}_{a(\theta_k, \varphi_k, f_k)}^H &= \mathbf{I} - \mathbf{P}_{a(\theta_k, \varphi_k, f_k)} \end{aligned}$$

步骤二: 当同时有强弱信号时, 采用陷零投影矩阵对强目标陷零。

当强弱信号相差 40 dB 左右, 步骤一的方案只能测出强目标。这时采用陷零投影矩阵对强目标陷零。

陷零投影算法如下:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Q}^\perp \times \mathbf{x}(t) \quad (9)$$

其中 \mathbf{Q}^\perp 为由强目标导向矢量构成的方向矩阵 \mathbf{A} 的正交投影矩阵, 记为 $\mathbf{Q}^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H$ 。

步骤三: 对陷零后的数据 $\mathbf{y}(t)$ 再用步骤一进行测向。

步骤四: 测出强弱干扰后, 采用带波束保形的波束置零算法和旁瓣相消算法抑制干扰。

3 基于实测数据的仿真实验及性能分析

仿真实验 1: 二相干强弱信号源, 频率为 $F_0 = 10$ M, 采样频率 $F_s = 20$ M, SNR = [30 10] dB, angle_inter1 = [3 4], angle_inter2 = [4 6], 仿真实验采用实测导向矢量。

任选一通道的测频结果见图 2, 测向结果见图 3, 从图 3 可得只测得强干扰的方向, 对强干扰陷

零后再进行测向的结果图见图4,可以看出弱干扰的方向也检测出来,具体见表1。

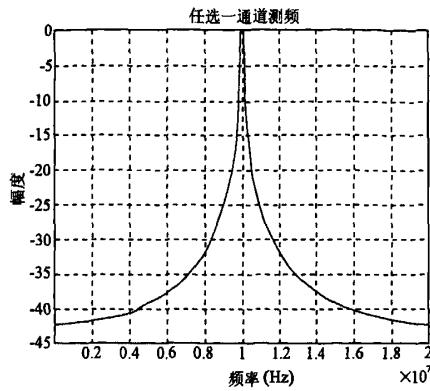


图2 两个干扰源测频结果(只测得强干扰)

Fig.2 Result of two interferences(get strong interference)

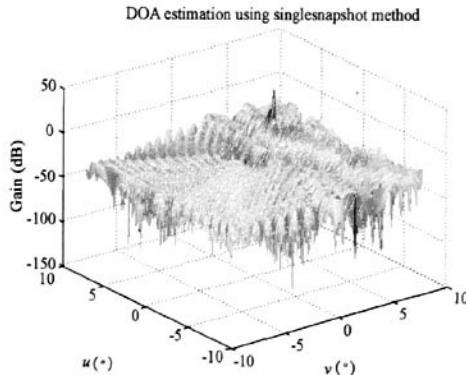


图3 两个干扰源测向结果(只测得强干扰)

Fig.3 DOA estimation of two interferences
(get strong interference)

表1 干扰源实际来向及测向结果(度)

Table 1 Comparison between the real direction and measurement of the interferences (°)

干扰源	DOA 实际值	测向结果	
1(10 dB)	3	4	2.958 4.002
2(20dB)	4	6	4.002 6.003

主波束的方向图及等高线图见图5、6;调零前的方向图及等高线图分别见图7、8;调零后的方向图及等高线图分别见图9、10;旁瓣相消后的方向图及等高线图分别见11、12;

由仿真实验1可以看出,当两个干扰源中存在相干强弱信号时,采用对强目标陷零的算法可以有效的对弱相干信号进行测向,然后采用旁瓣相消技术对测出的干扰陷零便可以抗干扰。

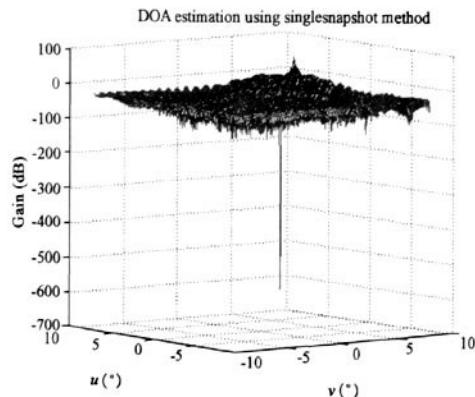


图4 对强干扰陷零后测向结果(测得弱干扰)

Fig.4 DOA estimation after nulling the strong interference
(get weak interference)

main Beam pattern before Nulling

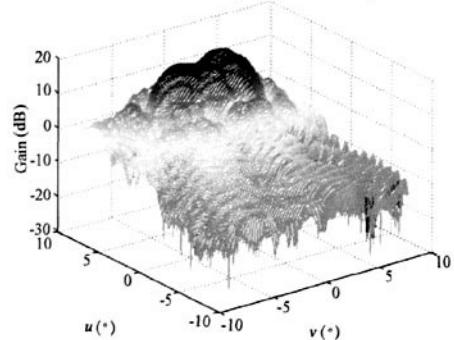


图5 对强干扰陷零前主波束方向图

Fig.5 Main beam pattern before nulling the strong interference

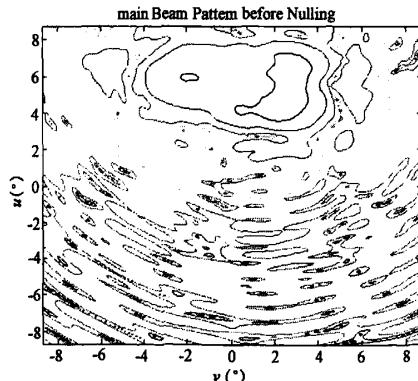


图6 对强干扰陷零前主波束等高线图

Fig.6 Contour map of fig.5

仿真实验2:五个干扰源,两个同频(强弱),有三个强干扰,采样频率 $F_s = 20 \text{ M}$, $F_0 = [6 \quad 6 \quad 8 \quad 10 \quad 12] \text{ M}$; SNR = [15 5 15 25 15] dB, angle_in-

$\text{ter1} = [2 \quad 3]$, $\text{angle_inter2} = [3 \quad 5]$, $\text{angle_inter3} = [0 \quad 7]$, $\text{angle_inter4} = [-6 \quad 0]$, $\text{angle_inter5} = [-14]$, 仿真实验采用实测导向矢量。

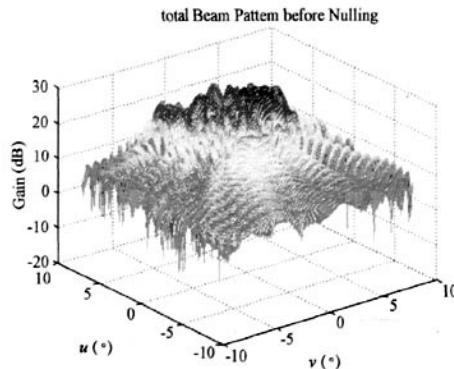


图 7 对强干扰陷零前波束方向图

Fig. 7 Beam pattern before nulling the strong interference

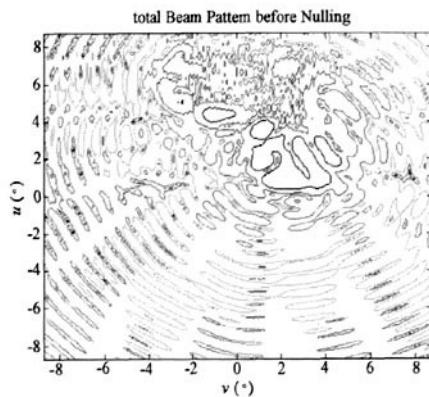


图 8 对强干扰陷零前波束等高线图

Fig. 8 Contour map of fig. 7

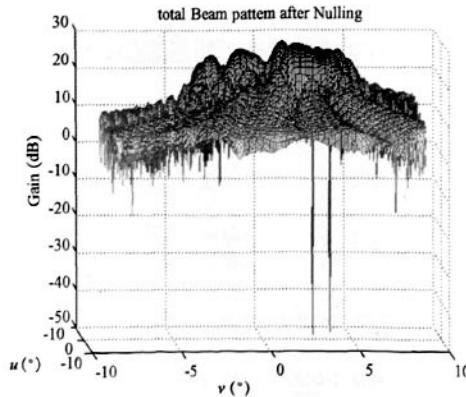


图 9 对强干扰陷零后弱干扰方向图

Fig. 9 Beam pattern after nulling the strong interference

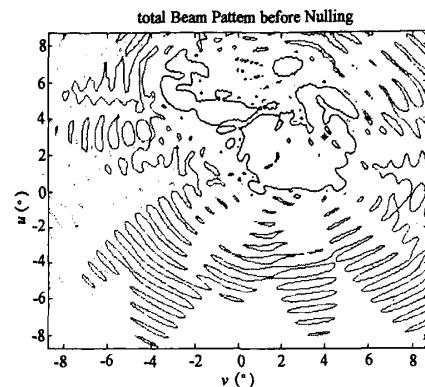


图 10 对强干扰陷零后弱干扰等高线图

Fig. 10 Contour map of fig. 9

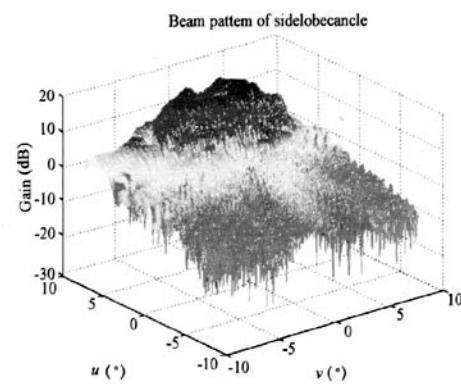


图 11 2个干扰调零后的三维方向图(旁瓣相消)

Fig. 11 Three-dimensional pattern of two interference (sidelobe cancelling)

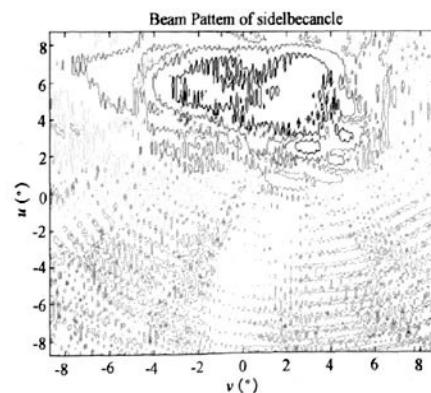


图 12 2个干扰调零后的等高线图(旁瓣相消)

Fig. 12 Contour map of fig. 11

任选一通道的测频结果见图 13, 测向结果见图 14, 从图 14 可得只测得强干扰的方向, 对强干扰陷零后再进行测向的结果图见图 15、16、17、18, 可以看

出弱干扰的方向也检测出来,具体见表 2。

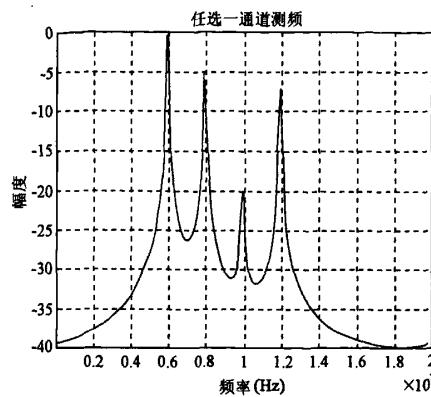


图 13 五个干扰源测频结果(只测得强干扰)

Fig.13 Result of five interferences(get strong interference)

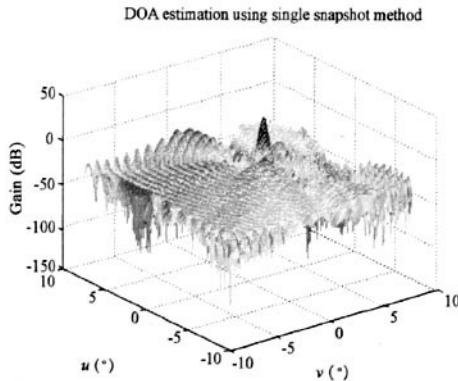


图 14 五个干扰源测向结果(只测得强干扰)

Fig.14 DOA estimation of two interferences
(get strong interference)

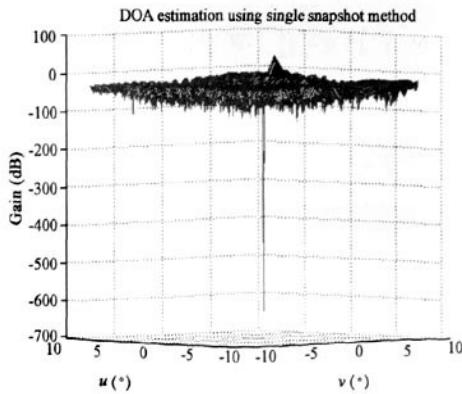


图 15 对强干扰陷零后测向结果(测得弱干扰 2)

Fig.15 DOA estimation after nulling the strong
interference(weak 2)

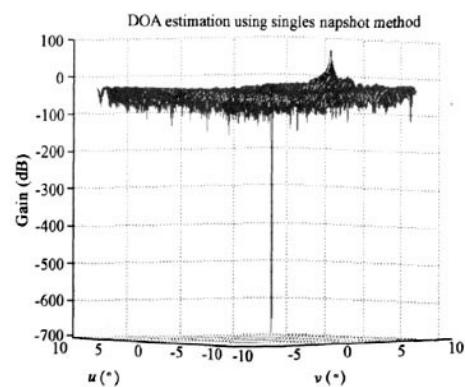


图 16 对强干扰陷零后测向结果(测得弱干扰 3)

Fig.16 DOA estimation after nulling the strong
interference(weak3)

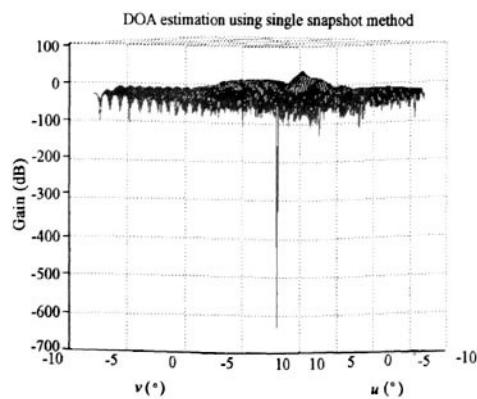


图 17 对强干扰陷零后测向结果(测得弱干扰 4)

Fig.17 DOA estimation after nulling the strong
interference(weak 4)

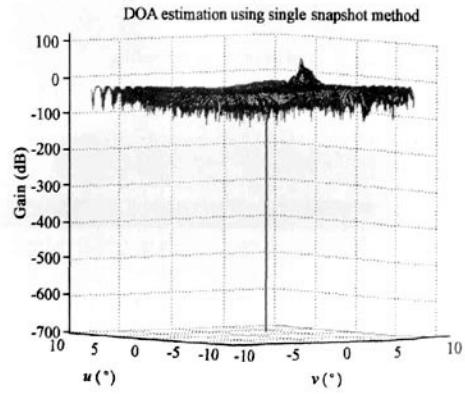


图 18 对强干扰陷零后测向结果(测得弱干扰 5)

Fig.18 DOA estimation after nulling the strong
interference(weak5)

表2 干扰源实际来向及测向结果(°)

Table 2 Comparison between the real direction and measurement of the interferences (°)

干扰编号	D.O.A 实际值	测量值
1	3	4
2	4	6
3	0	7
4	-3	6
5	0	4

主波束的方向图和等高线分别见图19、20,调零前的方向图和等高线分别见图21、22,调零后的方向图和登高线图分别见图23、24;旁瓣相消后的方向图及等高线图分别见25、26:

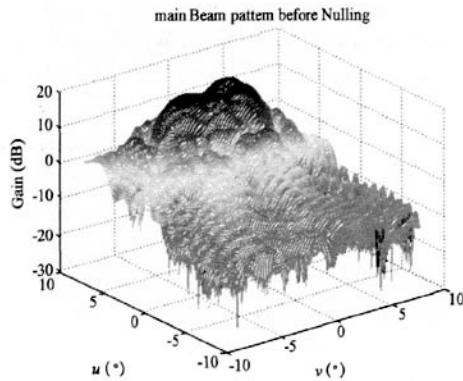


图19 对强干扰陷零前主波束方向图

Fig.19 Main beam pattern before nulling the strong interference

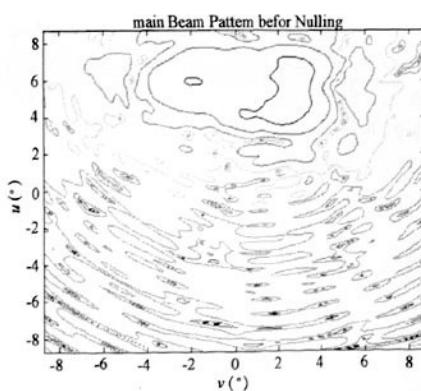


图20 对强干扰陷零前主波束等高线图

Fig.20 Contour map of fig.19

由仿真实验2可以看出,当多干扰源中存在相干强弱信号,即使存在两个以上的强干扰时,采用对强目标陷零的算法可以有效的对强弱相干信号进行测向。

total Beam pattern before Nulling

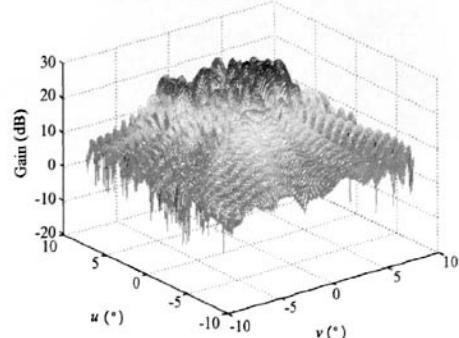


图21 对强干扰陷零前弱干扰方向图

Fig.21 Beam pattern after nulling the strong interference

total Beam Pattern before Nulling

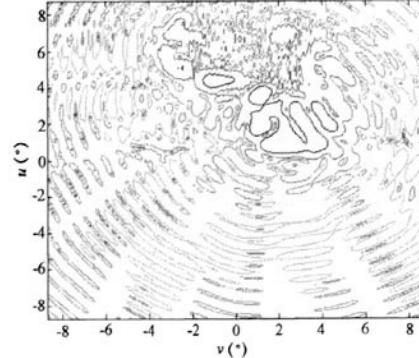


图22 对强干扰陷零前弱干扰等高线图

Fig.22 Contour map of fig.21

total Beam pattern after Nulling

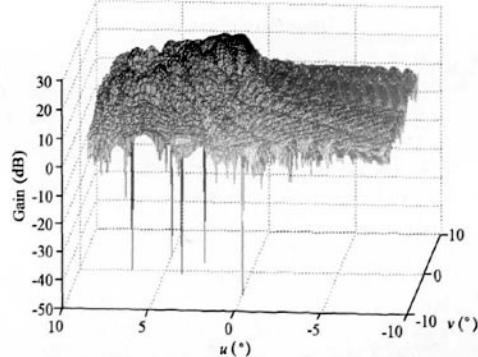


图23 对强干扰陷零后弱干扰方向图

Fig.23 Beam pattern after nulling the strong interference

为了论证文中提出的方法,仿真中假设干扰信号是相干的,如果干扰不相干,不管是强强干扰,还是弱弱干扰,那么采用步骤一都可以测出方向,这里不再赘述。

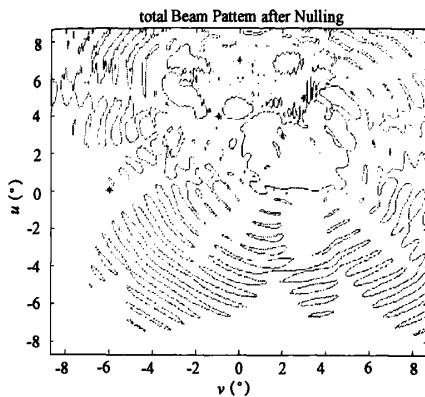


图 24 对强干扰陷零后弱干扰等高线图

Fig.24 Contour map of fig.23

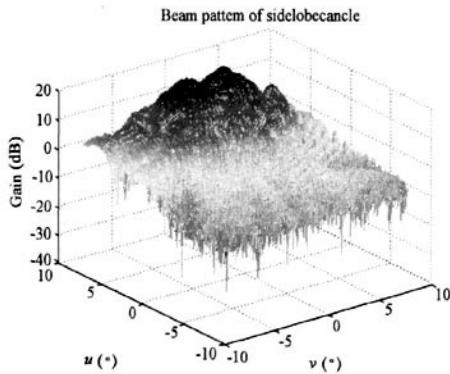


图 25 5 个干扰调零后的三维方向图(旁瓣相消)

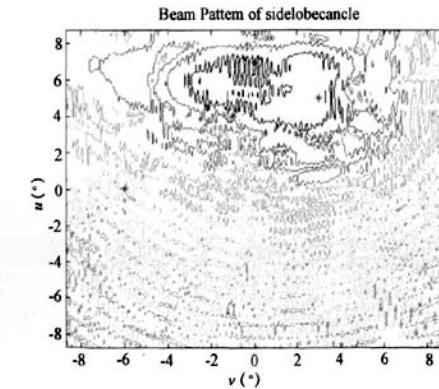
Fig.25 Three-dimensional pattern of five interference
(sidelobe cancelling)

图 26 5 个干扰调零后的等高线图(旁瓣相消)

Fig.26 Contour map of fig.25

4 结论

本文给出了一种用于星载赋形天线的基于频域

多相干目标测向算法。采用频域多目标测向算法测出强干扰方向再采用置零算法对强干扰调零,然后测出弱干扰的方向,从而实现干扰源的 DOA 估计,保证测向精度的同时大大降低了计算量;接着采用带波束保形的波束置零算法和旁瓣相消算法,达到对主波束进行保形并对多个强、弱干扰进行实时处理的效果,较好地兼顾了星载多干扰模式赋形天线调零时调零深度与主波束保形效果这一对矛盾。基于实测数据的仿真结果和性能分析验证了该算法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] Tao Haihong, Yu Jiang, Wang Hongyang, et al. A novel space-borne antenna anti-jamming technique based on immunity genetic algorithm-maximum likelihood[J]. Science in China Series F information Sciences, 2005, 48(3): 397 – 408.
- [2] Xu X L, Buckley K M. Bias analysis of the MUSIC location estimator [J]. IEEE Trans. on SP, 1992, 40(10): 2559 – 2569.
- [3] Roy R, Kailath T. ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. IEEE Trans. On ASSP, 1989, 37 (6): 984 – 995.
- [4] 贾永康, 保铮. 时-空二维信号模型下的波达方向估计方法及其性能分析[J]. 电子学报, 1997, 25(9): 69 – 73. [JIA Yong-kang, BAO Zheng. The cramer-rao bound of DOA estimation for signals with temporal-spatial 2-dimension model[J]. E-journal, 1997, 25(9): 69 – 73.]
- [5] Stoica P, Nehorai A. MUSIC, Maximum likelihood, and Cramer-Rao bound[C]// Proc. ICASSP, 1998: 2296 – 2299.
- [6] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans Antennas, Propagation, 1986, 34(3): 276 – 380.
- [7] Bill M. Radich, Kevin M. Buckley. Single-snapshot DOA estimation and source number detection[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(4): 109 – 111.
- [8] 刘德树, 罗景青, 张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1997: 179 – 186. [LIU De-shu, LUO Jing-qing, ZHANG Jian-yun. Spatial spectrum estimation and its application[J]. Hefei: China Science and Technology University Press, 1997: 179 – 186.]

作者简介: 孙海浪(1983-),女,学士,硕士研究生,测控技术与仪器专业,主要从事阵列信号处理、智能方法在信号处理中的应用等方面的研究。

通信地址: 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 1505(710071)

电话: 13572167461

E-mail: sunhailang_1984@126.com

A Novel of Space-borne Antenna Multi-jamming Direction Finding Algorithm

SUN Hai-lang, TAO Hai-hong, ZHANG Juan

(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In his paper we propose a novel multi-jamming direction finding method of space-borne antenna. Firstly, we present single-snapshot DOA estimation algorithm in frequency to estimate the DOA of multiple targets, and then use the nulling projection matrix to make the stronger signal not so strong in order that we can estimate the weaker signal according to the prior accurately estimated DOA. The presented algorithm solves the problems of DoA estimation exactly. Simulation results and performance analysis demonstrate that the algorithm is effective and feasible.

Key words: Multiple targets directions finding algorithm in frequency; Coherent signal; Nulling matrix

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>