

# 宽带波束域信道化干扰对消算法研究

马贤同, 罗景青, 孟祥豪

电子工程学院, 合肥 230037

**摘要:** 在波束形成后期处理中, 电磁环境中存在着有意干扰或无意干扰。针对干扰信号对宽带时延控制多波束形成性能影响较大的问题, 研究了宽带光控相控阵列波束形成后期处理中的宽带波束域信道化干扰对消算法, 提出了部分波束参与的干扰对消算法。仿真分析了干扰对消对波束方向图的影响, 干扰方向误差对干扰对消的影响, 以及部分波束参与的干扰对消性能。仿真结果表明, 在实际处理中可以尝试用部分波束参与的干扰对消取代全波束参与的干扰对消。

**关键词:** 宽带; 光控相控阵; 干扰对消; 性能分析

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A

## Study on the broadband beam domain channel interference cancellation algorithm

Ma Xian-tong, Luo Jing-qing, Meng xiang-hao

Electronic Engineering Institute, Hefei, 230037, China

**Abstract:** After the beamforming processing, deliberately interference or unintentional interference exists in the electromagnetic environment. Due to the interference signal has great influence to the performance of broadband time delay controlled beamforming method, we focus on the problem of interference cancellation in post beamforming processing of broadband optical controlled phased array system. The broadband beam domain channel interference cancellation algorithm is studied and the interference cancellation algorithm using part of the beam is proposed. The influence of interference cancellation to figure in the direction of the beam, the influence of interference direction error to interference cancellation, and the performance of interference cancellation algorithm using part of the beam are analyzed by simulation. The simulation results show that we can try to use part of the beam in interference cancellation to replace the whole beam interference cancellation in the actual processing.

**Key words:** wideband; optically controlled phased array; interference cancellation; performance analyzing.

### 引言

阵列信号处理在雷达、声纳等领域得到广泛应用, 宽带波束形成是阵列信号处理的一个重要发展方向<sup>[1][2]</sup>。在电子对抗<sup>[3]</sup>领域中, 对辐射源的快速侦察测向定位<sup>[4]</sup>是一个重要的内容。波束形成快速测向方法<sup>[5][6][7]</sup>是一个很有效的方法, 但当面对宽带信号时, 适应窄带信号的相位幅度加权的波束形成方法不能满足宽带的需要。为解决上述问题, 考虑到相位控制实际上等同于波程差补偿的信号空间功率合成<sup>[3][9]</sup>, 可采用时延控制<sup>[1]</sup>的方法解决波束合成问题。

在波束形成后期处理中, 环境中存在着有意干扰和无意干扰。此时, 基于时延控制的波束形成算法的测向性能将受到严重影响。本文研究了宽带光控阵列系统波束形成后期处理中的宽带波束域信道化干扰对消算法, 提出了部分波束参与的干扰对消算法, 分析干扰对消对波束方向图的影响, 以及存在误差时的干扰对消性能, 得到的若干结论便于算法在工程上更好的使用。

### 1 全波束干扰对消原理

采用幅度加权和光纤延迟线补偿时延的方法形成宽带多波束, 记第  $m$  号波束的输出为  $b_m(t), m=1, 2, \dots, M$ ,  $M$  为波束个数。

$$b_m(t) = \sum_{k=1}^K w_{mk} y_k(t - \tau_k^{(m)}) \quad (1)$$

其中,  $y_k(t)$  为  $k$  号阵元接收到的信号,  $K$  为阵元个数;  $w_{mk}$  为  $m$  号波束对  $k$  号阵元波束形成幅度加权值; 设  $m$  号波束中心指向角 (方位, 俯仰) 为  $(\varphi^{(m)}, \beta^{(m)})$ ,  $(x_k, y_k)$  为阵元  $k$  在阵列平面中的坐标, 则  $\tau_k^{(m)}$  为  $m$  号波束中心所代表的方向上的信号在  $k$  号阵元相对于参考阵元应当修正的时延, 其表达式为:

$$\tau_k^{(m)} = \frac{1}{c} [x_k \cos \beta^{(m)} \sin \varphi^{(m)} + y_k \cos \beta^{(m)} \cos \varphi^{(m)}]$$

分析易知, 各阵元的信号可以写成:

$$y_k(t) = \sum_{p=1}^P s_p(t + \tau_{kp}) + v_k(t) \quad (2)$$

式中,  $s_p(t)$  为参考点处接收到的第  $p$  个信号;  $P$  为总信号源个数 (包含干扰信号);  $v_k(t)$  为  $k$  号阵元通道噪声;  $\tau_{kp}$  为信号  $p$  所在的方向  $k$  号阵元相对于参考阵元的信号到达超前时间:

$$\tau_{kp} = \frac{1}{c} [x_k \cos \beta_p \sin \varphi_p + y_k \cos \beta_p \cos \varphi_p]$$

结合 (1) 式和 (2) 式, 各波束的输出  $b_m(t)$  为:

$$b_m(t) = \sum_{k=1}^K w_{mk} \left[ \sum_{p=1}^P s_p(t + \tau_{kp} - \tau_k^{(m)}) + n_k(t - \tau_k^{(m)}) \right] \quad (3)$$

对于各波束的输出, 通过数字信道化处理方式, 提供各个信道的复信号。假设信道比较窄, 通过信道的宽带信号可等效为窄带信号, 则可将同信道不同波束的信号联合起来, 完成波束域信道化的干扰对消处理。设波束  $m$  对于中心频率为  $f_0$  的信道输出为  $b_m(f_0, t)$ :

$$b_m(f_0, t) = \sum_{p=1}^P \gamma(f_0, m, p) s_p(f_0, t) + n_m(f_0, t)$$

写成矩阵形式:

$$\mathbf{b}(f_0, t) = \mathbf{\Gamma}(f_0) \mathbf{s}(f_0, t) + \mathbf{n}(f_0, t) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{\Gamma}(f_0)$  为波束域的阵列流形矩阵:

$$\mathbf{\Gamma}(f_0) = \mathbf{G}(f_0) \mathbf{A}(f_0) \quad (5)$$

当频率确定时, 它只与信号的方向和阵列的结构、波束形成的算法有关。其中,

$$\mathbf{G}(f_0) = \begin{bmatrix} w_{11} \Lambda_{1,1} & w_{12} \Lambda_{2,1} & \cdots & w_{1K} \Lambda_{K,1} \\ w_{21} \Lambda_{1,2} & w_{22} \Lambda_{2,2} & \cdots & w_{2K} \Lambda_{K,2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_{M1} \Lambda_{1,M} & w_{M2} \Lambda_{2,M} & \cdots & w_{MK} \Lambda_{K,M} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}(f_0) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_0 \tau_{11}} & e^{j2\pi f_0 \tau_{12}} & \cdots & e^{j2\pi f_0 \tau_{1P}} \\ e^{j2\pi f_0 \tau_{21}} & e^{j2\pi f_0 \tau_{22}} & \cdots & e^{j2\pi f_0 \tau_{2P}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j2\pi f_0 \tau_{K1}} & e^{j2\pi f_0 \tau_{K2}} & \cdots & e^{j2\pi f_0 \tau_{KP}} \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_{K,M} = \exp\{-j2\pi f_0 \tau_K^{(M)}\}$$

式 (4) 中的  $\mathbf{s}(f_0, t)$ , 既有信号, 也有干扰。波束域干扰对消的思路是对 (4) 式左边乘一个  $M \times M$  维与  $f_0$  和  $\varphi$  有关的对消变换矩阵  $\mathbf{T}$ , 使得变换后的  $M$  个波束中不再含有干扰信号, 得到新的波束矢量为:

$$\mathbf{b}_{new}(f_0, t) = \mathbf{T}(f_0, \varphi) \mathbf{b}(f_0, t) \quad (6)$$

其中,  $\varphi$  为干扰信号方向。

假定只有一个干扰信号, 其方向为  $\varphi_j$ 。则变换矩阵  $\mathbf{T}$  应满足:

$$\begin{cases} \mathbf{T}(f_0, \varphi_j) \mathbf{G}(f_0) \mathbf{a}(f_0, \varphi) = \mathbf{0}, \varphi = \varphi_j \\ \mathbf{T}(f_0, \varphi_j) \mathbf{G}(f_0) \mathbf{a}(f_0, \varphi) \neq \mathbf{0}, \varphi \neq \varphi_j \end{cases} \quad (7)$$

根据信号子空间理论, 上面的变换矩阵可选为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(f_0, \varphi_j) &= \mathbf{I} - \mathbf{b}_j [\mathbf{b}_j^H \mathbf{b}_j]^{-1} \mathbf{b}_j^H \\ \mathbf{b}_j &= \mathbf{b}_j(f_0, \varphi_j) = \mathbf{G}(f_0) \mathbf{a}(f_0, \varphi_j) \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{b}_j$  为干扰信号在各波束内的复增益。

要指出的是, 变换矩阵  $\mathbf{T}$  在干扰方向产生零点的同时, 对信号也有一定的影响, 尤其是干扰与信号空间间隔较小时, 影响比较大。定义加权后各方向信号的归一化波束增益为:

$$\kappa(\varphi) = \frac{\mathbf{b}^H(\varphi) \mathbf{T}^H \mathbf{T} \mathbf{b}(\varphi)}{\mathbf{b}^H(\varphi) \mathbf{b}(\varphi)} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{b}(\varphi) = \mathbf{G}(f_0) \mathbf{a}(f_0, \varphi)$  为对消前各波束在频率为  $f_0$  时的方向图。显然在强干扰方向,  $\kappa(\varphi)$  的理论值为零。但  $\kappa(\varphi)$  并不能保证除了干扰方向外其余方向响应均为 1, 所以当信号方向使得  $\kappa(\varphi)$  的值很小 (接近于零) 时, 变换矩阵对信号也起到了较大的抑制作用。

当干扰信号不止一个时, 可用级联处理的方法, 即总的对消变换矩阵为多个对消矩阵的乘积。例如存在两个干扰信号, 方向分别在  $\varphi_{j1}, \varphi_{j2}$ , 则总的干扰对消矩阵为:

$$\mathbf{T}(f_0, \varphi_{j1}, \varphi_{j2}) = \mathbf{T}(f_0, \varphi_{j1}) \mathbf{T}(f_0, \varphi_{j2}) \quad (10)$$

## 2 部分波束参与的干扰对消

实际处理时, 为了节约资源, 可以只采用部分波束进行到达方向估计和干扰相消。当只有一个信号时, 理论上只要有最强的三个波束的信号强度即可精确估计出信号的波达方向。考虑到干扰对消, 一般采用 4 个以上波束的信号。设波束  $m$  对于中心频率为  $f_0$  的信道输出为  $b_m(f_0, t)$ , 但参与处理的部分波束为  $m = m_1, \dots, m_Q$ ,  $Q$  为参与处理的波束个数。此时, 式 (4) 可修正为:

$$\mathbf{b}_{sub}(f_0, t) = \mathbf{\Gamma}_{sub}(f_0) \mathbf{s}(f_0, t) + \mathbf{n}_{sub}(f_0, t) \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{sub}(f_0, t) &= [b_{m_1}(f_0, t) \quad b_{m_2}(f_0, t) \quad \cdots \quad b_{m_Q}(f_0, t)]^T \\ \mathbf{\Gamma}_{sub}(f_0) &= \mathbf{G}_{sub}(f_0) \mathbf{A}(f_0) \\ \mathbf{G}_{sub}(f_0) &= \begin{bmatrix} w_{m_1 1} \Lambda_{1,1} & w_{m_1 2} \Lambda_{2,1} & \cdots & w_{m_1 K} \Lambda_{K,1} \\ w_{m_2 1} \Lambda_{1,2} & w_{m_2 2} \Lambda_{2,2} & \cdots & w_{m_2 K} \Lambda_{K,2} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_{m_Q 1} \Lambda_{1,3} & w_{m_Q 2} \Lambda_{2,M} & \cdots & w_{m_Q K} \Lambda_{K,M} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

干扰对消处理为:

$$\mathbf{b}_{sub,new}(f_0, t) = \mathbf{T}_{sub}(f_0, \varphi_J) \mathbf{b}_{sub}(f_0, t) \quad (12)$$

其中，干扰对消变换矩阵为：

$$\mathbf{T}_{sub}(f_0, \varphi_J) = \mathbf{I} - \mathbf{b}_{subJ} [\mathbf{b}_{subJ}^H \mathbf{b}_{subJ}]^{-1} \mathbf{b}_{subJ}^H$$

$$\mathbf{b}_{subJ} = \mathbf{b}_{subJ}(f_0, \varphi_J) = \mathbf{G}_{sub}(f_0) \mathbf{a}(f_0, \varphi_J)$$

其中  $\mathbf{b}_{subJ}$  为干扰信号在部分波束的各波束内的复增益。

假定系统工作频段为 2.0~6.0GHz，天线阵为 16 元均匀线阵，阵元间距  $d$  为 25mm。假设可以形成 16 个波束，由于不同指向的波束有不同的波束宽度，其中 1~8 号波束的波位如表 1 所示，9~16 号波束的波位角为正值，与 1~8 号波束成对称关系，第 9 号波束的波位角为 2.7 度，第 16 号波束的波位角为 45.0 度。

### 3 仿真实验

表 1 各波束的波位角 (度)

波位号	1	2	3	4	5	6	7	8
波位角	-45.0	-37.8	-31.2	-25.1	-19.3	-13.6	-8.1	-2.7

#### 3.1 干扰对消引起的波束变化

假定干扰方向为  $15^\circ$ ，位于 11 号波束内。干扰信号的中心频率为 4.0GHz，对干扰信号的方向估计和频率估计没有误差。

以波束 5 和波束 10 为例，研究干扰对消对远区和近区波束的影响。图 1 和图 2 分别绘出了波束 5 和波束 10 原波束和干扰对消后的波束方向图。

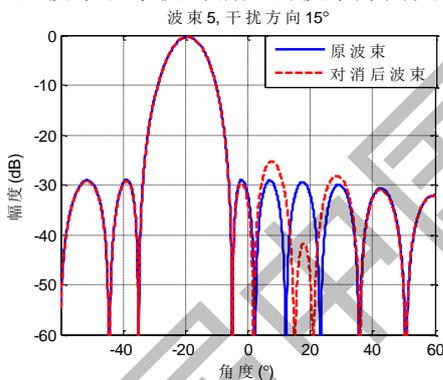


图 1 干扰对消对远区波束的影响

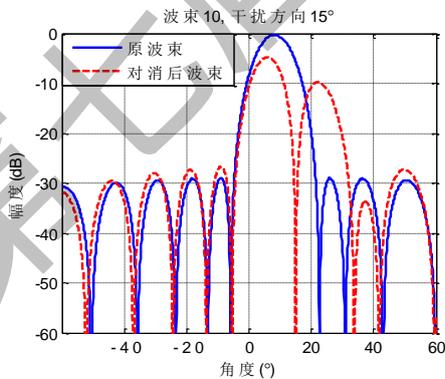


图 2 干扰对消对近区波束的影响

比较图 1 和图 2 可知，干扰信号都得到了压制，且干扰对消对离干扰信号方向较远的波束影响较小，而对邻近的波束影响较大。具体的影响视干扰信号方向与波束指向的相对关系而定，若干扰处在波束的零点附近，影响很小；如果干扰靠近波束的主瓣或副瓣中心，影响会较大。

#### 3.2 干扰方向误差的影响

从 4.1 节的研究可以看出，干扰对消在干扰方向产生了很深的零陷，能够有效地抑制干扰。但上述仿真是在干扰方向估计不存在误差的理想情况下进行的，而当干扰方向估计存在误差时，对干扰相消的性能将会产生不良的影响。

干扰方向误差对干扰相消的影响对不同的波束影响是不一样的。假设干扰方向为  $15^\circ$ ，干扰角度估计误差对波束 13 和波束 2 的影响如表 2 和表 3 所示。对于波束 13，当干扰信号正好在  $15^\circ$  时，干扰对消幅度大于 60dB（与主瓣最大值比），如果存在 0.2 度误差，干扰对消只有 40.5dB，如果存在 0.5 度的误差，干扰对消只有 31.6dB，与不进行对消的副瓣电平相当。对于波束 2，即使存在 0.5 度的误差，干扰相消也在 54dB 以上，说明干扰方向误差对邻近的波束影响更大。

表 2 干扰方向误差对波束 13 干扰对消的影响

角度误差 (度)	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.5
干扰相消比 (dB)	-31.6	-36.5	-47.4	-47.3	-36.2	-31.0

表3 干扰方向误差对波束2的干扰对消影响

角度误差 (度)	-1.0	-0.6	-0.4	0.3	0.5	1.0
干扰相消比 (dB)	-50.0	-53.4	-58.1	-60.0	-54.5	-47.0

### 3.3 部分波束参与的干扰对消仿真

假定干扰信号在 15° 方向，以波束 10 为例，选择波束 8、9、10、11 和 12 共五个波束参与干扰对消，得到的波束方向图如图 3 所示。从图中可以看出：在 15° 干扰方向，全波束参与的干扰对消（全对消）后在该方向的增益约为 -55.0dB，部分波束参与的干扰对消（部分对消）后在该方向的增益约为 -50.0dB，增益损失了约 5dB，两者干扰对消使波束 10 在波位中心处的增益损失大致相当。但部分对消节约了系统资源，速度更快。综合考虑，在实际处理时，可以用部分对消取代全对消。

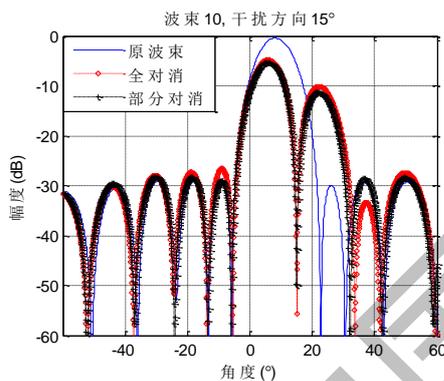


图3 部分波束参与的干扰对消

考虑一个信号一个干扰的情况，信号为线性调频信号，脉宽  $\tau = 5 \times 10^{-6}$  s，重复周期  $T_r = 500 \times 10^{-6}$  s，带宽  $B = 20$  MHz，中心频率  $f = 4075$  MHz，幅度  $A$  由信噪比决定，信噪比  $SNR = 0$  dB，到达时间  $t_0 = 1 \times 10^{-6}$  s，信号的方向为  $\phi_1 = 2.7$  度，即在 9 号波束的波位中心。干扰为噪声调频信号

$$J(t) = A \cos[\omega_0 t + 2\pi K_{FM} \int_0^t \xi(u) du + \varphi]$$

设调制噪声电压  $\xi(t)$  是高斯噪声，其幅度概率密度分布为高斯函数，干噪比  $JNR = 30$  dB。  $K_{FM} = 1.3 \times 10^9$ ，干扰带宽为  $B = 20$  MHz，干扰方向为 15°。干扰对消采

用部分对消的方式，所选波束为 8-12，进行 100 次 Monte-Carlo 实验。波束  $m$  接收到的信号强度为：

$$F_m = \sqrt{\sum_t |b_m(t)|^2}$$

参与干扰对消的波束中接收到的最强信号强度为  $F_{max}$ ，定义各波束的归一化信号强度为  $F_m / F_{max}$ 。图 4 为干扰对消前后各波束接收到的归一化信号强度。从图中可以看出，干扰对消前位于波束 9 的信号被压制，而干扰对消后，弱信号被释放，干扰信号得到了压制，但由于干扰方向较邻近信号方向，在第 11 号波束也出现一定强度的虚假信号。

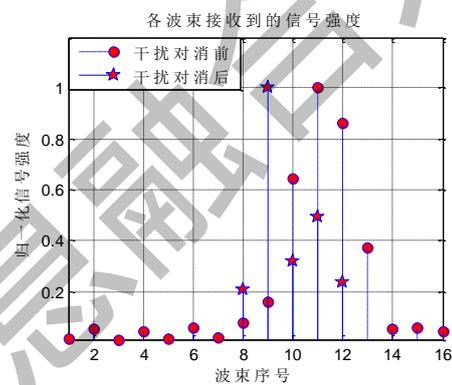


图4 干扰对消前后各波束接收到的归一化信号强度

## 4 结论

针对干扰信号对宽带时延控制多波束形成的性能影响较大的问题，本文研究在宽带光控阵列系统波束形成后的处理中解决友邻系统强干扰源和外部干扰对消问题，对宽带波束域信道化干扰对消算法进行了研究，仿真分析了干扰对消引起的波束变化，干扰方向误差对干扰对消的影响。并提出了部分波束参与的干扰对消算法，得出在实际处理时，可以用部分对消取代全对消的结论。得出的若干结论，对实际工程应用具有重要的指导意义。

### 参考文献

- [1] M. C. Hossain, L. C. Godara, M R Islam, Efficient robust broad-band beamforming algorithms using variable loading[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2012, 10(3):1697-1703.
- [2] 宋海岩,朴胜春,秦进平. 矢量最优稳健波束形成性能分析[J]. *电子学报*, 2012, 40(7):1351-1357.
- [3] Y. I. Hayashi, N. Homma, T. Watanabe, et al. Introduction to the Special Section on Electromagnetic Information Security[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 539-546.

- [4] J. J. Xiu, Y. He, G. H. Wang, et al. Constellation of multi-sensors in bearing-only location system [J]. *IEE Proc-Radar Sonar Navig*, 2005, 152(3): 215-218.
- [5] 侯颖妮,黄建国,冯国安. 基于多波束系统的波束域方位估计方法研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(3):80-82.
- [6] 曹晓健,宋耀良. 基于MOEMS光开关的光纤实时延迟线设计与实现方法研究[D].南京理工大学, 2013:1-13.
- [7] Y. Zhao, W. Liu, L. Richard . Adaptive wideband beamforming with frequency invariance constraints[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(4):1175-1184.
- [8] 韦文,李宁,汤俊,等. 基于分数时延的宽带自适应波束形成[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(7):988-992.
- [9] 范占春,李会勇,何子述. 基于分数时延的宽带数字阵列波束形成[J]. *雷达科学与技术*, 2008, 6(6):450-453.
- [10] 苏成晓,罗景青. 宽带光控阵多波束超分辨测向算法[J].

*信号处理*, 2013 ,29(5):640-646.

#### 作者简介:

马贤同 (1987-), 男, 博士研究生, 研究方向为空间信息处理理论与技术;  
通信地址:安徽省合肥市黄山路460号505室, 邮编:230037,  
联系电话: 15922410968;  
E-mail: mxzhy@foxmail.com,

罗景青 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子对抗、信号与信息处理、空间信息处理;

孟祥豪 (1987-), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 研究方向为雷达与雷达对抗理论新技术。

第七届中国信息融合大会