

# 单元交叉极化对自适应阵列性能的影响<sup>1</sup>

倪晋麟 郑学誉 何东元

(南京电子技术研究所天线与微波国防重点实验室 南京 210013)

**摘要** 该文分析了在存在双极化干扰机条件下的自适应阵列的性能。由于接收天线单元交叉极化方向图不一致性的存在,通过改变两正交极化干扰分量之间的相位,可以导致阵列单元之间的幅相不一致发生变化。这种变化是无法用简单的校正固定幅相误差的方法来加以校正的,从而导致自适应阵列的性能下降。

**关键词** 交叉极化, 自适应阵列, 幅相不一致性

**中图分类号** TN820

## 1 引言

30 余年来,自适应阵列处理<sup>[1]</sup>由于能够自适应外界干扰环境,在保持有用信号的前提下,抑制干扰,从而在雷达,通信及声纳等领域中得到广泛的应用。在众多的研究成果中,许多都基于各路接收机之间不存在误差,但在实际系统中,很难做到。许多文献分析了不同的系统误差对自适应阵列性能的影响<sup>[2,3]</sup>,但随着现代电子学的发展,雷达探测系统所面临的电磁环境日趋恶劣,电子干扰的手段也会日趋多样化。除了时频、空间等形式以外,极化域的干扰也是一种重要的手段,如美军的 EA-6B 就可以同时采用两种正交极化干扰。由于实际阵列天线的单元不是理想的,存在一定的正交极化耦合度,也就是说,在发射或接收主极化电磁信号时,还会发射或接收交叉极化电磁信号分量,这种不理想特性在敌方的干扰机具有可调节的双极化天线时,对于雷达性能的影响显得尤为突出。文献 [4] 可能是最早讨论这一问题的文献,此外文献 [5] 也在假设由于交叉极化引入的误差为固定的前提下,对交叉极化对自适应阵列性能的影响进行了仿真,结论为阵列的自由度要降低一半。

本文在干扰机具有两正交极化干扰分量,并且两分量之间的相位差可调的条件下,分析了由于接收阵列天线单元交叉极化方向图不一致性的存在,通过改变两正交极化干扰分量的初相,可以导致阵列单元之间的等效幅相不一致发生变化,而这种变化是无法用简单的校正固定幅相误差的方法来加以校正的,从而导致自适应阵列的性能下降。

## 2 自适应阵列输出 SINR 及交叉极化

自适应阵列的结构如图 1 所示,其输出为

$$Y = W^T X \quad (1)$$

$W = [w_1, \dots, w_N]^T$  为自适应加权矢量,它是按某种最佳准则获得的,可以证明<sup>[4]</sup>:

$$W = kR^{-1}a_0^* \quad (2)$$

式中

$$a_0 = [1, \exp(j(2\pi d/\lambda) \sin \theta_0), \dots, \exp(j(2\pi d/\lambda)(N-1) \sin \theta_0)]^T \quad (3)$$

<sup>1</sup> 2000-03-23 收到, 2000-07-20 定稿

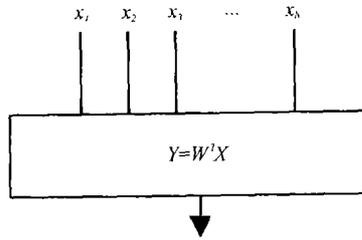


图 1 自适应阵列原理图

为期望信号矢量。由于  $k$  不影响 SINR，故在以后的讨论中假设为 1。在文献 [5] 中，将由于交叉极化引起的各路之间的幅相不一致性表为

$$(1 + \delta_i)e^{j\phi_i}, \quad i = 1, \dots, N \tag{4}$$

并认为这种幅相不一致性是固定的，这种假设实际上是有局限性的。虽然交叉极化方向图是固定的，但如果干扰机能同时产生两个正交极化分量，通过调节两分量之间的相位和幅度，则可以使得由于交叉极化引起的各单元之间的幅相不一致性发生变化，从而导致自适应阵列的性能出现下降，下面将给予分析。

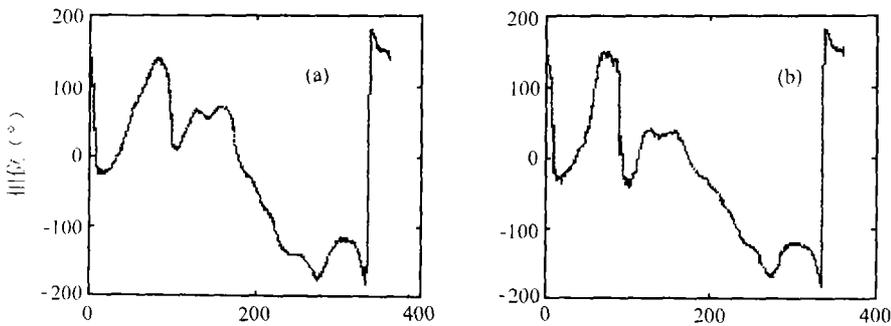
电磁波的极化，表明电场强度矢量的取向和幅度随时间而变化的特性。任何单一频率的电磁波均是椭圆极化波，当将电场矢量分解为沿两个相互正交的极化状态（称极化基）的分量时，可以用琼斯 (Jones) 矢量来表述某种极化状态，常用的正交基为水平与垂直极化，亦可以用斯托克斯矢量及庞加莱极化球来表示电磁波的极化状态。

天线的极化状态定义为它所辐射或接收的电磁波的极化状态，以其高度矢量  $h = [h_x \ h_y]^T$  来加以表征，当高度矢量为  $h$  的天线接收琼斯矢量为  $E$  的电磁波时，所收到的信号为

$$y = E^T h \tag{5}$$

实际上，天线的高度矢量与方位角及俯仰角有关，即是我们常讲的主极化与交叉极化方向图，为了讨论的简便起见，在下面的讨论中不考虑俯仰角。下图给出了实测的两个 L 波段天线单元的交叉极化方向图（幅度和相位）。

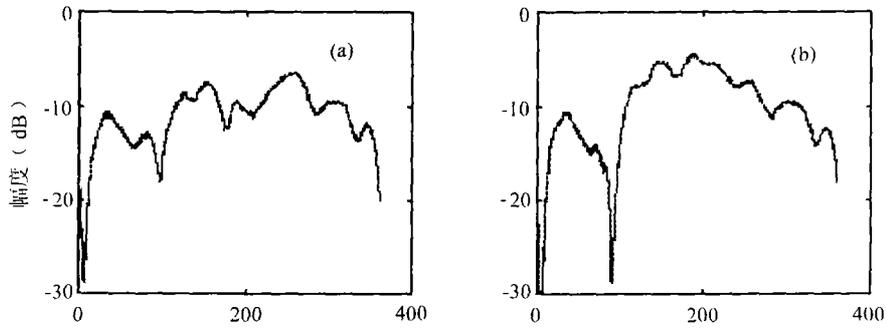
从图 2 以及图 3 中我们可以看出，不同单元交叉极化方向图之间存在幅度与相位不一致性。



(a) 单元 1 相位方向图

(b) 单元 2 相位方向图

图 2 二元实测交叉极化相位方向图



(a) 单元 1 幅度方向图

(b) 单元 2 幅度方向图

图 3 两单元实测交叉极化幅度方向图

### 3 交叉极化及其对自适应阵列性能的影响

记主极化与交叉极化方向图为  $M(\theta)$  及  $C(\theta)$ , 其中  $M(\theta)$  及  $C(\theta)$  包含幅度和相位, 则天线单元所接收到的信号可表示为

$$X = [y_1(t) \ y_2(t)e^{j\phi}] \begin{bmatrix} M(\theta) \\ C(\theta) \end{bmatrix} = [y_1(t)M(\theta) + y_2(t)C(\theta)e^{j\phi}] \quad (6)$$

其中  $\phi$  为两正交极化分量之间的相位差,  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  分别表示两正交极化信号, 如果假设两种极化分量相同, 信号功率为  $P$ ,  $C(\theta)/M(\theta) = \rho(\theta) = \rho e^{j\eta}$ , 则

$$X = \sqrt{P}M(\theta)(1 + \rho e^{j\eta}e^{j\phi}) \quad (7)$$

交叉极化方向图相对于主极化方向图而言, 主极化的两个正交极化值是不相同的。根据我们的实验结果与文献 [6], 对于振子天线, E 面的交叉极化值  $\rho \leq -20\text{dB}$ , H 面的交叉极化值  $\rho \leq -15\text{dB}$ 。对于不同的天线单元, 交叉极化方向图的不一致性可以表示为

$$y = \sqrt{P}M(\theta)[1 + \rho_0 e^{j\eta_0}(1 + \delta)e^{j\gamma}e^{j\phi}] \quad (8)$$

其中  $\rho_0$  和  $e^{j\eta_0}$  分别为平均交叉极化方向图的幅度和相位,  $\delta$  和  $\gamma$  为各单元交叉极化方向图的幅相不一致性, 单元的主极化方向图  $M(\theta)$  的 3dB 宽度较大。为了便于分析, 不妨假定为  $M(\theta) = \cos(\theta)$ , 因此

$$y = \sqrt{P}\cos(\theta)[1 + \rho_0(1 + \delta)e^{j\gamma}e^{j\phi}] \quad (9)$$

在文献 [5] 中, 作者假设由于交叉极化引入的单元幅相不一致性为固定, 这实际上是在  $\phi$ ,  $M(\theta)$  及  $C(\theta)$  皆为固定的前提下。但干扰方可以通过改变  $\phi$ , 使得在对于单元  $M(\theta)$  及  $C(\theta)$  存在固定不一致性的前提下, 单元的等效幅度和相位随  $\phi$  的变化而变化。

对于  $\rho_0 = -20\text{dB}$ ,  $\sigma_\delta = -3\text{dB}$ ,  $\sigma_\gamma = 15^\circ$ , 假设存在两相同的正交极化干扰分量, 图 3 给出了两单元的幅相不一致性随  $\phi$  的变化曲线, 从图中我们可以看到, 两单元之间的幅相不一致性随两极化分量之间的相位差的变化而变化, 并不是一固定值。

可以证明,如采用双极化干扰,并使二干扰间的相位在  $[0, 2\pi]$  之间均匀发生变化,用与文献 [7] 类似的方法,则可推得某单元的幅度和相位不一致性的均方值(相对于两正交极化之间的相位差)分别为

$$\rho_0(1 + \delta)/\sqrt{2} \quad (9)$$

$\delta$  为单元交叉极化方向图的幅度与平均交叉极化方向图幅度之间的差异,相位差异对幅相不一致性的影响没有影响,但会使各单元之间的幅相不一致性不相关。

对于不同的单元而言,易证上述均方根值的起伏为

$$\rho_0\sigma_\delta/\sqrt{2} \quad (10)$$

根据文献 [8],对在自适应过程中幅相不一致性保持不变的情况,幅相不一致性对干扰对消几乎没有影响。但对于由于两极化分量之间的相位变化,在阵列自适应过程中单元之间的等效幅相不一致性发生变化,即 (10) 式所表征的起伏无法对消。此时的对消残差为

$$P \cos^2(\theta)\rho_0^2\sigma_\delta^2/(2N) \quad (11)$$

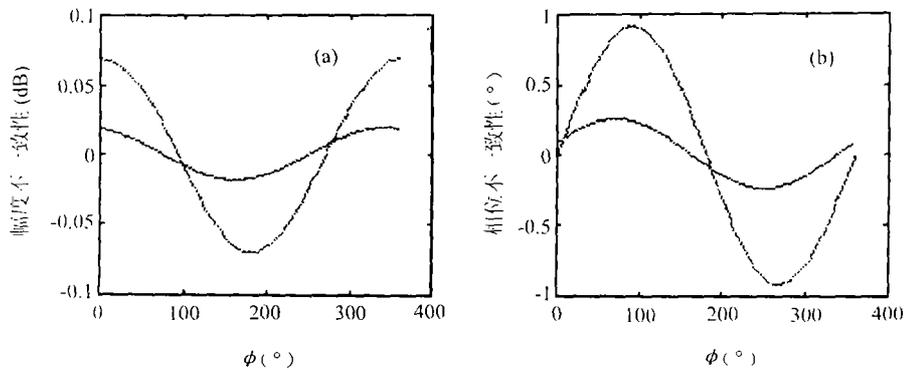


图 4 两单元等效幅相不一致性随  $\phi$  的变化曲线

(a) 两单元之间的幅度不一致性; (b) 两单元之间的相位不一致性

$$\rho_0 = -20\text{dB}, \sigma_\delta = -3\text{dB}, \sigma_\gamma = -15^\circ$$

与通道频响不一致性对自适应阵列性能的影响类似。随着电子对抗技术的发展,比信号强 80dB 以上的干扰机也会存在,如假设  $P = 60\text{dB}$ ,  $\rho_0^0 = -20\text{dB}$ ,  $\sigma_\delta^2 = -6\text{dB}$ ,  $N = 10$ , 则对消残差大于 20dB。从实测天线单元交叉极化方向图(幅度和相位)(图 2,3), 我们可以看出交叉极化方向图的起伏较大,即  $\sigma_\delta^2$  的值往往远大于 -6dB, 此时对消残差还要大。

在实际中,  $\phi$  的变化为有限值,但人们一般要用  $2N$  ( $N$  为阵元个数) 次快拍来估计相关阵,  $\phi$  值有可能变化  $2N$  次,等效于最大自由度降低为  $1/(2N)$ , 这也从另一个角度说明无法完全对消干扰源,文献 [5] 讨论的情况对应于自由度降低为  $1/2$  的情况。

## 4 结 论

在工程实际中,最小交叉极化要想做到低于  $\rho_{\max} = -40\text{dB}$  十分困难,因此,从上述的分析中,我们可以得到如下结论:如果各单元之间存在交叉极化不一致性,只要干扰信号具有可

调相位差的两正交极化干扰分量, 则可以使基于自适应阵列的抗干扰措施的作用下降, 严重时甚至会完全失效。为了得到较好的自适应阵列处理的性能, 除了对通道频响特性、I/Q 不一致性有一定的要求以外, 对于交叉极化特性也应有所要求, 而这一点往往会被忽视。

### 参 考 文 献

- [1] R. A. Monzingo, T. W. Miller, Introduction of Adaptive Array, New York, John Wiley, 1980, Chapter 1, Chapter 3.
- [2] L. C. Godara, Error analysis on the optimal antenna array processors, IEEE Trans. on AES, 1986, AES-22(2), 395-409.
- [3] 王永良, 吴仁彪, 通道不一致性、互耦对最优阵列处理器的影响, 系统工程与电子技术, 1993, 15(2), 49-55.
- [4] A. K. Brown, Effects of element cross polarization in adaptive array, IEE-F, Conf. Proc. AP., 1981, No.195, Part 1, 144-148.
- [5] J. G. Worms, About the influence of polarization agile jammers to adaptive antenna array, IEEE Proc. of Radar 95, U.S.A., 1995, 619-623.
- [6] C. J. Railton, G. S. Hilton, The analysis of medium-sized arrays of complex element using a combination of FDTD and reaction matching, IEEE Trans. on AP, 1999, AP-47(2), 708-714.
- [7] 黄培康主编, 雷达特征信号分析, 北京, 宇航出版社, 1993, 249-255.
- [8] 倪晋麟, 苏为民, 储晓彬, 幅相不一致性对自适应阵列性能的影响, 应用科学学报, 2000, 18(3), 41-44.

## THE EFFECTS OF ELEMENT CROSS-POLARIZATION ON ADAPTIVE ARRAY PERFORMANCE

Ni Jinlin    Zheng Xueyu    He Dongyuan

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract** In this paper, the adaptive antenna array performance is given when the dual polarized jamming signals are considered. If the phases of two polarized elements are changed during the adaptive weight calculation, the amplitude and phase errors between the antenna elements will be also changed due to the inconsistency of the element cross-polarization. This kind of error can not be corrected and the signal to noise plus interference ratio will be reduced.

**Key words** Cross polarization, Adaptive antenna array, Amplitude and phase inconsistency

倪晋麟: 男, 1960年生, 研究员, 主要研究方向为自适应阵列和雷达系统.  
郑学誉: 男, 1938年生, 研究员, 主要研究方向为相控阵天线.  
何东元: 男, 1973年生, 助理工程师, 主要研究方向为相控阵天线.