

平面阵线性约束自适应单脉冲测角算法¹

刘宏伟 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 平面阵单脉冲测角具有方位、俯仰二维方向信息耦合的特点, 需要利用二维单脉冲信息联合进行角度估计。本文基于最大似然单脉冲测角算法, 采用线性约束自适应波束形成方法, 将二维角度联合估计简化为一维角度估计, 具有较好的可实现性。计算机仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词 单脉冲测角, 自适应波束形成, 平面阵

中图分类号 TN820, TN911.23

1 引言

在存在干扰情况下, 采用自适应阵列信号处理可以有效抑制干扰, 然而, 对干扰的抑制会使自适应阵列方向图受到扰动, 带来单脉冲测角误差。目前已有的自适应单脉冲测角方法大致可以分为三大类。一类是和、差波束同时置零技术^[1,2], 这是一种开环处理方法, 要求干扰方向已知, 其自适应能力较差; 另一类是基于自适应方向图保形技术^[3,4], 即采用线性约束等方法来进行自适应方向图保形, 使得在抑制干扰的同时使单脉冲测角特性尽可能保持不变; 第三类是基于最大似然方法的单脉冲测角技术, 最早由 Davies^[5] 等人针对等距线阵模型提出, Nickel^[6] 在此基础上提出了一种平面阵的自适应单脉冲测角算法, 但该方法要求差波束为和波束的导数, 在大多数应用中得不到满足。针对这一缺点, 文献 [7] 提出了一种任意和、差波束情况下的自适应单脉冲测角算法, 具有更广泛的适用性。文献 [6, 7] 中的二维方向参数是相关的, 实际上是二维联合一阶线性逼近算法, 在某些对测角精度要求较高的应用条件下, 一阶逼近不能满足精度要求。此时如果基于文献 [7] 的方法采用高阶逼近算法, 则需要估计的参数太多, 不易实现; 如果基于波束保形技术采用常规单脉冲测角特性来进行测角, 由于二维方向信息的耦合, 则需要采用鉴角曲面来进行, 同样不易实现。本文采用线性约束波束形成技术, 在进行波束保形的同时, 将二维方向信息进行分离, 然后采用通常的单脉冲特性曲线来进行测角, 具有较高的精度, 且易于工程实现。本文第 2 节简介了文献 [7] 的算法及信号模型; 第 3 节提出了线性约束二维分离自适应单脉冲测角算法; 最后给出了相应的计算机仿真结果。

2 问题描述

对于 N 元平面阵, 空间有一窄带信号及 P 个干扰, 则第 i 个阵元输出信号的复包络为

$$z_i(t) = s(t) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (x_i u_0 + y_i v_0) \right\} + \sum_{p=1}^P i_p(t) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (x_i u_p + y_i v_p) \right\} + n_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 (x_i, y_i) 为第 i 个阵元的空间位置坐标, (u_i, v_i) , $i = 0, 1, \dots, P$ 为相应信号源的二维方向参数, λ 为波长。 $s(t)$, $n_i(t)$ 及 $i_p(t)$, $p = 1, 2, \dots, P$ 分别为信号、噪声及第 p 个干扰的复包络。

¹ 1999-04-20 收到, 1999-10-27 定稿

阵列和、差波束的输出分别为

$$o_{\Sigma}(t) = W_{\Sigma}^H Z(t) \quad (2)$$

$$o_{\alpha}(t) = W_{\alpha}^H Z(t), \quad \alpha = u, v \quad (3)$$

其中 $Z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_N(t)]^T$, W_{Σ} 及 $W_{\alpha} (\alpha = u, v)$ 分别为和、差波束对应的 $N \times 1$ 维阵列权矢量。

对于对称平面阵, 在仅有信号情况下, 通常和、差波束输出信号的相位差为 90° , 即和、差波束输出之比为虚数, 则定义单脉冲测角的角误差信号为

$$\delta_{\alpha}(t) = \text{Im} \left\{ \frac{o_{\alpha}(t)}{o_{\Sigma}(t)} \right\}, \quad \alpha = u, v \quad (4)$$

自适应波束形成技术可以有效抑制干扰, 但同时会影响到单脉冲测角精度。此外, 由 (1)–(4) 式可以看出, 平面阵的角误差信号是二维方向参数的函数, 即存在着二维角度信息的耦合。Nickel 在最大似然测角算法^[6]的基础上提出了一种适合于任意和、差波束的自适应单脉冲测角算法^[7], 由二维角误差信号联合来估计目标方向参数:

$$\begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_u - \mu_u \\ \delta_v - \mu_v \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $\hat{u}, \hat{v}$ 是目标方向参数的估计值, u_0, v_0 为和波束指向方向参数, μ_u, μ_v 为差波束的零点校正系数, 系数矩阵 C 是由角误差信号的二阶导数求得的一组值。

由上可以看出, Nickel 方法是一种二维方向信息联合一阶逼近算法, 它的主波束指向附近有较高的精度, 而在远离主波束指向处则误差较大。为获得较高的自适应测角精度, 对线阵, 较常用的方法是先进行自适应波束成形, 然后采用鉴角曲线来测角, 该法简单易行, 而且是一种高阶逼近方法。然而对于平面阵, 由于存在着二维方向信息的耦合, 则需要采用鉴角曲面来进行测角, 这在工程实现中具有较大的困难。本文将研究简单、有效的平面阵单脉冲测角算法。

3 线性约束自适应单脉冲测角算法

众所周知, 通过线性约束可以达到控制自适应方向图的形状的目的。对平面阵自适应测角问题, 同样可以通过线性约束来进行波束成形及分离二维方向信息。常规的线性约束最小方差 (LCMV) 自适应波束形成算法由下式表示

$$\left. \begin{array}{l} \min_W W^H R W \\ \text{s.t. } W^H C = G \end{array} \right\} \quad (6)$$

其中 $R = E[Z(t)^H Z(t)]$ 为采样数据协方差矩阵, C 为约束条件矩阵, G 为常数矢量。上式的解为

$$W = R^{-1} C [C^H R^{-1} C]^{-1} G^H \quad (7)$$

对于本文讨论的问题, 我们采用以下约束条件来形成差波束:

(1) 零点约束, 使自适应差波束在波束指向上为零点, 即

$$W_{\alpha}^H S(u_0, v_0) = 0, \quad \alpha = u, v \quad (8)$$

其中 $S(u, v)$ 是波束指向方向为 (u, v) 的 $N \times 1$ 维阵列导向矢量。

(2) 一阶导数约束: 约束自适应单脉冲角误差信号在波束指向方向上的导数, 即通常所说的鉴角斜率为一常数。

$$\left. \frac{\partial}{\partial \alpha} \frac{W_{\alpha}^H S(u, v)}{W_{\Sigma}^H(u, v)} \right|_{u_0, v_0} = k_{\alpha}, \quad \alpha = u, v \quad (9a)$$

其中 k_{α} 是一常数。该式可化为

$$W_{\alpha}^H \left[\frac{W_{\Sigma}^H S(u, v) \frac{\partial S(u, v)}{\partial \alpha} - S(u, v) W_{\Sigma}^H \frac{\partial S(u, v)}{\partial \alpha}}{(W_{\Sigma}^H S(u, v))^2} \right] \bigg|_{u_0, v_0} = k_{\alpha}, \quad \alpha = u, v \quad (9b)$$

(3) 二维方向信息去相关约束: 约束二维自适应单脉冲角误差信号在主波束内近似一阶互不相关。即

$$\left. \frac{\partial}{\partial \beta} \frac{W_{\alpha}^H S(u, v)}{W_{\Sigma}^H S(u, v)} \right|_{\alpha \in (\alpha_0 - B/2, \alpha_0 + B/2), \beta = \beta_0} = 0, \quad \alpha, \beta = u, v, \quad \alpha \neq \beta \quad (10a)$$

其中 B 为和波束宽度。该式可化为

$$W_{\alpha}^H \left[\frac{W_{\Sigma}^H S(u, v) \frac{\partial S(u, v)}{\partial \beta} - S(u, v) W_{\Sigma}^H \frac{\partial S(u, v)}{\partial \beta}}{(W_{\Sigma}^H S(u, v))^2} \right] \bigg|_{\alpha \in (\alpha_0 - B/2, \alpha_0 + B/2), \beta = \beta_0} = 0, \quad \alpha, \beta = u, v, \alpha \neq \beta \quad (10b)$$

约束条件 (1) 和 (2) 常见于线阵的自适应单脉冲测角算法, 条件 (3) 是针对平面阵二维方向信息耦合的特点的, 可以在主波束内选择几个点进行约束。将以上约束条件代入 (6) 式, 即可解得线性约束自适应单脉冲测角的差波束权系数。经过以上线性约束后, 二维角误差信号在主波束内可近似认为分别互不相关, 即可将二维测角简化为一维测角。如果简单地使 (10) 式的约束条件仅对波束指向单点进行约束, 则将以上约束条件代入 (5) 式, 可得到下式:

$$\left. \begin{aligned} \hat{u} &= u_0 + k_u^{-1} \delta_u \\ \hat{v} &= v_0 + k_v^{-1} \delta_v \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

可以看出, 通过二维方向信息去相关约束, 可以将二维方向信息联合自适应测角简化为一维测角算法。上式仍然为一阶逼近算法, 对于测角精度要求较高的情况, 可以在二维方向信息去相关后, 采用通常的单脉冲鉴角曲线或高阶逼近算法来进行测角, 此时, 由于已经将二维联合测角简化为一维测角, 实现复杂度已经大大下降。

4 仿真结果

阵列模型为 538 个阵元的平面圆阵, 按半波间距矩形栅格放置, 阵面分为 16 个子阵。空间存在一个干扰, 干扰噪声比为 30dB, 信号噪声比为 0dB。用于计算自适应权系数的快拍数为 64。当无干扰存在时, 不加二维角度信息去相关约束 (只有约束条件 (1), (2)) 时的自适应单脉冲特性曲线如图 1 左图所示, 加约束条件 (3) 后俯仰维的自适应单脉冲特性曲线如图 1 右图所示。其中采用约束条件 (3) 时选取了主波束内 5 点进行约束, 分别为 (u_0, v_0) ,

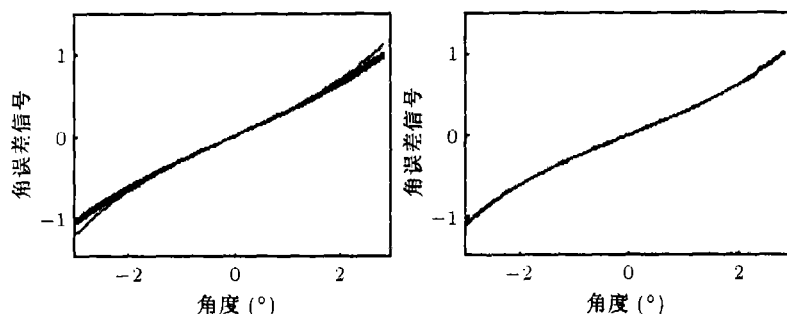


图1 俯仰维单脉冲鉴角特性曲线

左图: 加去相关约束之前 右图: 加去相关约束之后

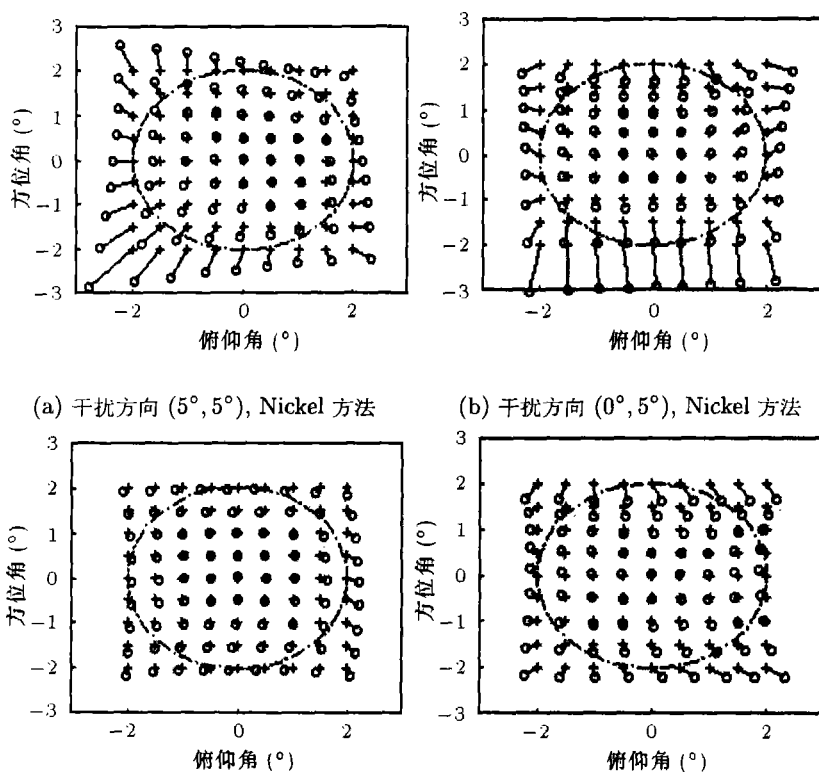
(c) 干扰方向 $(5^\circ, 5^\circ)$, 本文方法(d) 干扰方向 $(0^\circ, 5^\circ)$, 本文方法

图2 自适应单脉冲测角仿真结果

$(u_0 \pm B/6, v_0)$ 和 $(u_0 \pm B/3, v_0)$ 。图中不同的曲线对应的方位角分别为 0° , $\pm(2/3)^\circ$ 及 $\pm(4/3)^\circ$, 方位维的曲线类似。可以看出, 在加约束条件 (3) 之前, 俯仰维的单脉冲鉴角特性曲线与方位角有关, 即二维方向信息存在着耦合, 在加了约束条件 (3) 后, 则二维方向信息的耦合明显减弱。图 2(a), 2(b) 为干扰方向分别为 $(5^\circ, 5^\circ)$ 和 $(0^\circ, 5^\circ)$ 时采用 Nickel 方法^[7] 所得到的单脉冲测角结果, 图 2(c), 2(d) 为干扰方向分别为 $(5^\circ, 5^\circ)$ 和 $(0^\circ, 5^\circ)$ 时采用本文方法所得到的单脉冲测角结果。图中符号 ‘+’ 表示实际目标位置, 与之通过直线相连的符号 ‘o’ 表示估计得到的目标位置, 两者之间的直线越长, 即表示目标方向估计误差越

大。虚线表示主波束 3dB 宽度的区域。为了减少噪声的影响, 角误差信号由 5 个样本平均得到。可以看出, 由于 Nickel 方法是一阶逼近方法, 仅在主波束指向附近有较高的精度, 在远离主波束指向位置的测角精度较低, 而本文方法较其性能有明显提高。

5 结 论

本文针对平面阵二维方向信息存在着耦合的特点及一阶线性逼近测角算法精度较低的缺点, 提出了一种线性约束二维方向信息去相关的自适应单脉冲测角算法, 该法将二维联合角度估计问题简化为一维角度估计问题, 有利于工程实现, 计算机仿真结果验证了其有效性。需要说明的是, 本文提出的方法由于增加了约束条件, 会使系统自由度减少, 这是不可避免的, 因为几乎所有的自适应阵列信号处理稳健性的提高都是以牺牲系统自由度为代价的, 在一定实际应用条件下, 这是可以接受的。

参 考 文 献

- [1] M. D. Zoltowski, Synthesis of sum and difference patterns possessing common nulls for monopulse bearing estimation with line array, IEEE Trans. on AP, 1992, AP-40(1), 25-37.
- [2] R. L. Haupt, Simultaneous nulling in sum and difference patterns of a monopulse antenna, IEEE Trans. on AP, 1985, AP-33(5), 505-509.
- [3] S. P. Applebaum, D J. Chapman, Adaptive arrays with main beam constrain, IEEE Trans. on AP, 1976, AP-(9), 650-662.
- [4] F. R. Castella, Adaptive antenna nulling for a phased array radar, Proc. ICR, Brighton, 1992, 320-323.
- [5] R. C. Davies, L. E. Brennan, I. S. Redd, Angle estimation with adaptive arrays in external noise field, IEEE Trans. on AES, 1976, AES-12(2), 179-186.
- [6] U. L. Nickel, Monopulse estimation with adaptive arrays, IEE Proc.-F, 1993, 140(5), 303-308.
- [7] U. L. Nickel, Monopulse estimation with subarray-adaptive arrays and arbitrary sum and difference beams, IEE Proc.-F, 1996, 143(4), 232-238.

LINEARLY CONSTRAINED ADAPTIVE MONOPULSE ESTIMATION ALGORITHM FOR PLANAR ARRAY

Liu Hongwei Zhang Shouhong

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

Abstract The monopulse estimation for planar array has the property of angle coupling in element and azimuth. 2-dimension monopulse information should be used together to estimate target angle. A linearly constrained adaptive monopulse estimation algorithm for planar array is proposed in this paper, which simplifies the 2-D combined angle estimation algorithm to 1-D angle estimation algorithm. The efficiency of this algorithm is confirmed by computer simulation.

Key words Monopulse estimation, Adaptive beamforming, Planar array

刘宏伟: 男, 1971 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理及非平稳信号处理等。
张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、自适应信号处理及信号检测等。