



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115015846 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 30

(21) 申请号 202210588222.4

(22) 申请日 2022.05.27

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115015846 A

(43) 申请公布日 2022.09.06

(73) 专利权人 西安电子科技大学
地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

(72) 发明人 谢荣 李宏娇 刘峥 冉磊

(74) 专利代理机构 西安嘉思特知识产权代理事
务所(普通合伙) 61230
专利代理师 勾慧敏

(51) Int. Cl.
G01S 7/36 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 105223554 A, 2016.01.06

CN 109946664 A, 2019.06.28

审查员 鹿倩

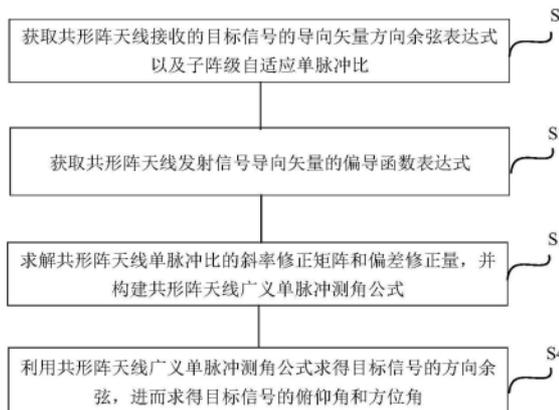
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法,包括:获取共形阵天线接收的目标信号的导向矢量方向余弦表达式以及子阵级自适应单脉冲比;获取共形阵天线发射信号导向矢量的偏导函数表达式;求解共形阵天线单脉冲比的斜率修正矩阵和偏差修正量,并构建共形阵天线广义单脉冲测角公式;利用共形阵天线广义单脉冲测角公式求得目标信号的方向余弦,进而求得目标信号的俯仰角和方位角。本发明的测角方法不依赖于根据自适应和差波束方向图得到的单脉冲比曲线的斜率,测角误差最小;不会额外损失系统自由度,随着旁瓣干扰个数的增加,能保持较好的测角性能。



1. 一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法,其特征在于,包括:

S1: 获取共形阵天线接收的目标信号的导向矢量方向余弦表达式以及子阵级自适应单脉冲比;

S2: 获取共形阵天线发射信号导向矢量的偏导函数表达式;

S3: 求解共形阵天线单脉冲比的斜率修正矩阵和偏差修正量,并构建共形阵天线广义单脉冲测角公式;

S4: 利用共形阵天线广义单脉冲测角公式求得目标信号的方向余弦,进而求得目标信号的俯仰角和方位角;

具体地,所述S1包括:

S1.1: 获得共形阵天线接收到的目标信号的导向矢量方向余弦表达式;

S1.2: 将所述共形阵天线进行降维处理,获取共形阵天线的子阵级自适应和波束输出功率、子阵级自适应俯仰差波束输出功率和子阵级自适应方位差波束输出功率;

S1.3: 利用各输出功率获得共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比和子阵级方位维自适应单脉冲比;

所述S1.1包括:

获得共形阵天线接收到的目标信号的导向矢量方向余弦表达式:

$$\mathbf{a}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_1 v} & \dots & f_N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_N v} \end{bmatrix}$$

其中, $r_i = [x_i y_i z_i]$ 表示第 i 个天线阵元的坐标, $i = 1, 2, \dots, N$, N 表示天线阵元的总数, $f_1 f_2 \dots f_N$ 表示各个天线阵元对应的方向图, $\mathbf{v} = [\cos\theta \sin\varphi \quad \cos\theta \cos\varphi \quad \sin\theta]$ 表示目标信号的方向余弦, θ 表示目标信号的俯仰角, φ 表示目标信号的方位角, λ 表示目标信号波长;

将 $\mathbf{v} = [\cos\theta \sin\varphi \quad \cos\theta \cos\varphi \quad \sin\theta]$ 记为 $\mathbf{v} = [u u' v]$, 得到目标信号导向矢量的方向余弦表达式的展开式 $\mathbf{a}(u, u', v)$:

$$\mathbf{a}(u, u', v) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_1 u + y_1 u' + z_1 v} & \dots & f_N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_N u + y_N u' + z_N v} \end{bmatrix};$$

所述S2包括:

根据求导法则获得共形阵天线导向矢量的偏导函数表达式:

$$\mathbf{a}_{u,t} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{y} \cos\theta_t \sin\varphi_t}{\cos\theta_t \cos\varphi_t} \right) \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)$$

$$\mathbf{a}_{v,t} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{z} - \frac{\mathbf{y} \sin\theta_t}{\cos\theta_t \cos\varphi_t} \right) \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)$$

其中, $\mathbf{a}_{u,t}$ 表示共形阵天线导向矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{v})$ 关于 u 的偏导函数在 \mathbf{v}_t 处的表达式, $\mathbf{a}_{v,t}$ 表示共形阵天线导向矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{v})$ 关于 v 的偏导函数在 \mathbf{v}_t 处的表达式,

$\mathbf{v}_t = [\cos \theta_t \sin \varphi_t \quad \cos \theta_t \cos \varphi_t \quad \sin \theta_t]$, θ_t, φ_t 分别表示共形阵天线发射信号的俯仰角和方位角;

所述共形阵天线广义单脉冲测角公式为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_t \\ \mathbf{v}_t \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \text{real}\{R_u\} - \mu_u \\ \text{real}\{R_v\} - \mu_v \end{pmatrix}$$

其中, \mathbf{u}_t 和 \mathbf{v}_t 表示雷达共形阵天线发射信号的波束方向, $\mathbf{u}_t = \cos \theta_t \sin \varphi_t$, $\mathbf{v}_t = \sin \theta_t$, $\text{real}\{\cdot\}$ 表示取实部运算, $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1}$ 表示单脉冲比的斜率修正矩阵, $\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_u \\ \mu_v \end{pmatrix}$ 表示偏差修正量, R_u 表示共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比, R_v 表示共形阵天线的子阵级方位维自适应单脉冲比;

求解共形阵天线单脉冲比的斜率修正矩阵和偏差修正量, 包括:

根据子阵级自适应和波束权矢量 $\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}$ 、子阵级自适应俯仰差波束权矢量 $\mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}$ 和子阵级自适应方位差波束权矢量 $\mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}$, 获得斜率修正矩阵和偏差修正量:

$$\begin{cases} \mu_u = \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)}{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ \mu_v = \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)}{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{uu} = \frac{\text{real} \left\{ \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}^H \mathbf{a}_{u,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} + \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{u,t}^H \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} \right\}}{\left| \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \right|^2} - 2\mu_u \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}_{u,t}}{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{uv} = \frac{\text{real} \left\{ \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}^H \mathbf{a}_{v,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} + \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{v,t}^H \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} \right\}}{\left| \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \right|^2} - 2\mu_u \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}_{v,t}}{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{vu} = \frac{\text{real} \left\{ \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}^H \mathbf{a}_{u,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} + \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{u,t}^H \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} \right\}}{\left| \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \right|^2} - 2\mu_v \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}_{u,t}}{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{vv} = \frac{\text{real} \left\{ \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}^H \mathbf{a}_{v,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} + \mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{v,t}^H \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma} \right\}}{\left| \mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \right|^2} - 2\mu_v \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}_{v,t}}{\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \end{cases} .$$

2. 根据权利要求1所述的基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法, 其特征在于, 所述S1.2包括:

将所述共形阵天线划分成多个子阵列, 并且分别获得子阵级自适应和波束权矢量 $\mathbf{w}_{\text{sub-}\Sigma}$ 、子阵级自适应俯仰差波束权矢量 $\mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\theta}$ 和子阵级自适应方位差波束权矢量 $\mathbf{w}_{\text{sub-}\Delta_\varphi}$;

利用 $w_{sub_Σ}$, $w_{sub_Δθ}$ 和 $w_{sub_Δφ}$, 分别获得子阵级自适应和波束输出功率、子阵级自适应俯仰差波束输出功率和子阵级自适应方位差波束输出功率:

$$P_{sub_Σ} = w_{sub_Σ} x$$

$$P_{sub_Δθ} = w_{sub_Δθ} x$$

$$P_{sub_Δφ} = w_{sub_Δφ} x$$

其中, x 表示共形阵天线接收到的来波信号。

3. 根据权利要求2所述的基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法, 其特征在于, 所述S1.3包括:

利用子阵级自适应和波束输出功率 $P_{sub_Σ}$ 和子阵级自适应俯仰差波束输出功率 $w_{sub_Δθ}$ 获得共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比:

$$R_u = \frac{P_{sub_Δθ}}{P_{sub_Σ}};$$

利用子阵级自适应和波束输出功率 $P_{sub_Σ}$ 和子阵级自适应方位差波束输出功率 $P_{sub_Δφ}$ 获得共形阵天线的子阵级方位维自适应单脉冲比:

$$R_v = \frac{P_{sub_Δφ}}{P_{sub_Σ}}。$$

一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法

技术领域

[0001] 本发明属于雷达信号处理技术领域,具体涉及一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法。

背景技术

[0002] 随着相控阵雷达技术的进步,共形阵天线成为现代雷达发展的一个重要方向。将共形阵天线安装于雷达导引头,不仅具有良好的空气动力学性能,而且能有效减小雷达散射截面积,从而使雷达具有低可探测性。研究共形阵天线自适应单脉冲测角技术,能够实现雷达对目标的角度跟踪。

[0003] 在实际情况下,共形阵天线阵元数目庞大,阵元级自适应处理需要的通道数目较多,系统结构复杂,因此为了降低成本,简化系统结构,减少算法的计算量,降低系统的复杂度,满足系统实时性的要求,需要对共形阵天线进行子阵划分处理。目前关于线阵或面阵的测角问题已有大量的研究,已有的自适应单脉冲测角方法大致可以分为三大类:第一类是和、差波束同时置零技术,该技术要求已知干扰方向,自适应能力较差;第二类是基于自适应方向图保形技术,即采用线性约束等方法来进行自适应方向图保形,使单脉冲鉴角特性尽可能不失真;第三类是基于最大似然方法的单脉冲测角技术,由Davies等人基于等距线阵模型提出,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。Nickel在此基础上提出了一种任意和、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。

[0004] 针对共形阵天线测角算法的研究,公开发表的文献较少。当共形阵天线采用传统自适应单脉冲测角时,虽然能在抑制干扰信号的同时实现对目标的角度测量,但是其测角性能依赖于和差波束方向图,在干扰数较多或干扰位于主波束附近时,自适应波束形成的零陷会造成和差波束主波束畸变,导致传统自适应单脉冲测角误差变大;赵英俊等人在2013年提出共形阵天线约束自适应单脉冲测角方法,该方法通过对主波束施加约束条件实现主波束保形,有利于保证和差单脉冲测角性能,但施加的额外约束条件会消耗系统的空域自由度。

发明内容

[0005] 为了解决现有技术中存在的上述问题,本发明提供了一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法,该方法既不依赖于根据自适应和差波束方向图得到的单脉冲比曲线的斜率,也不损失空域自由度,在求解共形阵天线导向矢量时,将共形阵天线遮挡效应以及各阵元天线方向图差异考虑在内,这里的共形阵天线既可以是均匀共形阵天线,也可以是进行布阵优化后得到的稀疏共形阵天线或者稀布共形阵天线。本发明要解决的技术问题通过以下技术方案实现:

[0006] 本发明提供了一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法,包括:

[0007] S1:获取共形阵天线接收的目标信号的导向矢量方向余弦表达式以及子阵级自适

应单脉冲比；

[0008] S2:获取共形阵天线发射信号导向矢量的偏导函数表达式；

[0009] S3:求解共形阵天线单脉冲比的斜率修正矩阵和偏差修正量,并构建共形阵天线广义单脉冲测角公式；

[0010] S4:利用共形阵天线广义单脉冲测角公式求得目标信号的方向余弦,进而求得目标信号的俯仰角和方位角。

[0011] 在本发明的一个实施例中,所述S1包括:

[0012] S1.1:获得共形阵天线接收到的目标信号的导向矢量方向余弦表达式；

[0013] S1.2:将所述共形阵天线进行降维处理,获取共形阵天线的子阵级自适应和波束输出功率、子阵级自适应俯仰差波束输出功率和子阵级自适应方位差波束输出功率；

[0014] S1.3:利用各输出功率获得共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比和子阵级方位维自适应单脉冲比。

[0015] 在本发明的一个实施例中,所述S1.1包括:

[0016] 获得共形阵天线接收到的目标信号的导向矢量方向余弦表达式:

$$[0017] \quad \mathbf{a}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_{1v}} & \dots & f_N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_{Nv}} \end{bmatrix}$$

[0018] 其中, $r_i = [x_i \ y_i \ z_i]$ 表示第*i*个天线阵元的坐标, $i = 1, 2, \dots, N$, N 表示天线阵元的总数, $f_1 \ f_2 \ \dots \ f_N$ 表示各个天线阵元对应的方向图,

$\mathbf{v} = [\cos\theta \sin\varphi \ \cos\theta \cos\varphi \ \sin\theta]$ 表示目标信号的方向余弦, θ 表示目标信号的俯仰角, φ 表示目标信号的方位角, λ 表示目标信号波长;

[0019] 将 $\mathbf{v} = [\cos\theta \sin\varphi \ \cos\theta \cos\varphi \ \sin\theta]$ 记为 $\mathbf{v} = [u \ u' \ v]$,得到目标信号导向矢量的方向余弦表达式的展开式 $\mathbf{a}(u, u', v)$:

$$[0020] \quad \mathbf{a}(u, u', v) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_1 u + y_1 u' + z_1 v} & \dots & f_N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_N u + y_N u' + z_N v} \end{bmatrix}。$$

[0021] 在本发明的一个实施例中,所述S1.2包括:

[0022] 将所述共形阵天线划分成多个子阵列,并且分别获得子阵级自适应和波束权矢量 $\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}$ 、子阵级自适应俯仰差波束权矢量 $\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}$ 和子阵级自适应方位差波束权矢量 $\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}$;

[0023] 利用 $\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}$, $\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}$ 和 $\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}$,分别获得子阵级自适应和波束输出功率、子阵级自适应俯仰差波束输出功率和子阵级自适应方位差波束输出功率:

$$[0024] \quad P_{sub_ \Sigma} = \mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{x}$$

$$[0025] \quad \mathbf{P}_{sub_ \Delta\theta} = \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{x}$$

$$[0026] \quad \mathbf{P}_{sub_ \Delta\varphi} = \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{x}$$

[0027] 其中, \mathbf{x} 表示共形阵天线接收到的来波信号。

[0028] 在本发明的一个实施例中,所述S1.3包括:

[0029] 利用子阵级自适应和波束输出功率 $P_{sub_Σ}$ 和子阵级自适应俯仰差波束输出功率 $\mathbf{w}_{sub_Δθ}$ 获得共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比:

$$[0030] \quad R_u = \frac{P_{sub_Δθ}}{P_{sub_Σ}};$$

[0031] 利用子阵级自适应和波束输出功率 $P_{sub_Σ}$ 和子阵级自适应方位差波束输出功率 $P_{sub_Δφ}$ 获得共形阵天线的子阵级方位维自适应单脉冲比:

$$[0032] \quad R_v = \frac{P_{sub_Δφ}}{P_{sub_Σ}}。$$

[0033] 在本发明的一个实施例中,所述S2包括:

[0034] 根据求导法则获得共形阵天线导向矢量的偏导函数表达式:

$$[0035] \quad \mathbf{a}_{u,t} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{y} \cos \theta_t \sin \varphi_t}{\cos \theta_t \cos \varphi_t} \right) \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)$$

$$[0036] \quad \mathbf{a}_{v,t} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{z} - \frac{\mathbf{y} \sin \theta_t}{\cos \theta_t \cos \varphi_t} \right) \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)$$

[0037] 其中, $\mathbf{a}_{u,t}$ 表示共形阵天线导向矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{v})$ 关于 \mathbf{u} 的偏导函数在 \mathbf{v}_t 处的表达式, $\mathbf{a}_{v,t}$ 表示共形阵天线导向矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{v})$ 关于 \mathbf{v} 的偏导函数在 \mathbf{v}_t 处的表达式, $\mathbf{v}_t = [\cos \theta_t \sin \varphi_t \quad \cos \theta_t \cos \varphi_t \quad \sin \theta_t]$, θ_t, φ_t 分别表示共形阵天线发射信号的俯仰角和方位角。

[0038] 在本发明的一个实施例中,所述共形阵天线广义单脉冲测角公式为:

$$[0039] \quad \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_t \\ \mathbf{v}_t \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \text{real}\{R_u\} - \mu_u \\ \text{real}\{R_v\} - \mu_v \end{pmatrix}$$

[0040] 其中, \mathbf{u}_t 和 \mathbf{v}_t 表示雷达共形阵天线发射信号的波束方向, $\mathbf{u}_t = \cos \theta_t \sin \varphi_t, \mathbf{v}_t = \sin$

$\theta_t, \text{real}\{\cdot\}$ 表示取实部运算, $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1}$ 表示单脉冲比的斜率修正矩阵, $\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_u \\ \mu_v \end{pmatrix}$

表示偏差修正量。

[0041] 在本发明的一个实施例中,求解共形阵天线单脉冲比的斜率修正矩阵和偏差修正量,包括:

[0042] 根据子阵级自适应和波束权矢量 $\mathbf{w}_{sub_Σ}$ 、子阵级自适应俯仰差波束权矢量 $\mathbf{w}_{sub_Δθ}$ 和子阵级自适应方位差波束权矢量 $\mathbf{w}_{sub_Δφ}$,获得斜率修正矩阵和偏差修正量:

$$\begin{aligned}
[0043] \quad & \begin{cases} \mu_u = \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ \mu_v = \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \end{cases} \\
[0044] \quad & \begin{cases} c_{uu} = \frac{\text{real} \{ \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}_{u,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{u,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} \}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)|^2} - 2\mu_u \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{u,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{uv} = \frac{\text{real} \{ \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}_{v,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{v,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} \}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)|^2} - 2\mu_u \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{v,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{vu} = \frac{\text{real} \{ \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}_{u,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{u,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} \}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)|^2} - 2\mu_v \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{u,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \\ c_{vv} = \frac{\text{real} \{ \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}_{v,t} \mathbf{a}^H(\mathbf{v}_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) \mathbf{a}_{v,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} \}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)|^2} - 2\mu_v \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{v,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)} \right\} \end{cases} \circ
\end{aligned}$$

[0045] 与现有技术相比,本发明的有益效果在于:

[0046] 1、当共形阵天线在外界环境中存在靠近主波束的干扰时,相比于现有的子阵级传统自适应单脉冲测角方法和子阵级约束自适应单脉冲测角方法,本发明基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法在实现干扰抑制的同时,具有更好的测角性能。因为子阵级传统自适应单脉冲为了抑制干扰,在干扰位置处形成零陷,但是由于干扰距离主瓣较近,俯仰维差波束方向图失真,此时鉴角曲线严重失真,子阵级传统自适应单脉冲俯仰维测角误差急剧升高;而子阵级约束自适应单脉冲通过对主波束施加约束条件,使得差波束方向图保形,能抵消一部分零陷造成的损失。本发明的测角方法不依赖于根据自适应和差波束方向图得到的单脉冲比曲线的斜率,测角误差最小。

[0047] 2、当旁瓣干扰个数较多时,相比于子阵级约束自适应单脉冲测角方法,本发明在实现干扰抑制的同时,测角误差更小。由于子阵级约束自适应单脉冲对主波束施加约束条件,实现主波束保形,额外的约束条件导致系统空域自由度损失。当干扰个数超过施加约束条件后所剩余的空域自由度时,子阵级约束自适应单脉冲鉴角曲线失真,导致该方法测角误差增大。而本发明的测角方法不会额外损失系统自由度,随着旁瓣干扰个数的增加,能保持较好的测角性能。

[0048] 3、本发明的共形阵天线子阵级广义自适应单脉冲测角法,与共形阵天线阵元级自适应处理相比,能够简化系统结构,减少算法的计算量,降低系统的复杂度,同时满足系统实时性的要求。

[0049] 以下将结合附图及实施例对本发明做进一步详细说明。

附图说明

[0050] 图1是本发明实施例提供的一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法的

流程图;

[0051] 图2是本发明实施例提供的一种直角坐标系下的圆锥共形阵模型;

[0052] 图3(a)是存在一个旁瓣干扰和一个靠近主波束的干扰时,三种测角方法的俯仰维测角误差曲线;

[0053] 图3(b)是存在一个旁瓣干扰和一个靠近主波束的干扰时,三种测角方法的方位维测角误差曲线;

[0054] 图4(a)是随着旁瓣干扰个数增加,三种测角方法的俯仰维测角误差曲线;

[0055] 图4(b)是随着旁瓣干扰个数增加,三种测角方法的方位维测角误差曲线。

具体实施方式

[0056] 为了进一步阐述本发明为达成预定发明目的所采取的技术手段及功效,以下结合附图及具体实施方式,对依据本发明提出的一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法进行详细说明。

[0057] 有关本发明的前述及其他技术内容、特点及功效,在以下配合附图的具体实施方式详细说明中即可清楚地呈现。通过具体实施方式的说明,可对本发明为达成预定目的所采取的技术手段及功效进行更加深入且具体地了解,然而所附附图仅是提供参考与说明之用,并非用来对本发明的技术方案加以限制。

[0058] 应当说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0059] 请参见图1,图1是本发明实施例提供的一种基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法的流程图,该方法包括以下步骤:

[0060] S1:获取共形阵天线接收的目标信号的导向矢量方向余弦表达式以及子阵级自适应单脉冲比。

[0061] 共形阵天线由于自身结构的特殊性,当来波信号偏离视轴时,部分阵元被弹体自身遮挡导致无法接收到来波信号,此时这些阵元处于非工作状态,体现出共形阵天线带来的遮挡效应。由于每一个阵元位于不同的空间位置,而非同一平面内,各个阵元的工作环境有差异,各个阵元的法线方向都与共形载体(共形阵天线所附着的载体)的表面相垂直,从而使得各个阵元天线方向图主波束指向有差异。当外界信号入射到共形阵天线时,各阵元的辐射增益对于整个共形阵天线的贡献不相等,因此,各天线阵元的天线方向图存在差异。在求解共形阵天线接收的来波信号的导向矢量时,需要将遮挡效应以及各阵元天线方向图差异考虑在内,得到的目标信号的导向矢量为 $\mathbf{a}(\nu)$,结合自适应波束形成准则和算法,可求得自适应权矢量。

[0062] 在本实施例中,步骤S1包括:

[0063] S1.1:获得共形阵天线接收到的目标信号的导向矢量方向余弦表达式。

[0064] 假设共形阵天线接收到的来波信号为 \mathbf{x} ,可以表示为:

$$[0065] \quad \mathbf{x}(t) = \mathbf{s}(t)\mathbf{a}(\theta, \varphi) + \mathbf{N}$$

[0066] 其中, t 表示快拍数, $\mathbf{s}(t)$ 为目标信号的信号幅度, \mathbf{N} 表示噪声信号, 各阵元的噪声信号不相关, 且均为高斯白噪声, $\mathbf{N} \sim \mathbf{N}(0, \delta^2 \mathbf{I})$, $\mathbf{N}(0, \delta^2 \mathbf{I})$ 为正态分布函数表达式, \mathbf{I} 表示单位矩阵, δ^2 表示白噪声数据的方差, $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$ 表示待计算的目标信号的导向矢量, θ 表示待计算的目标信号的俯仰角, φ 表示待计算的来波信号的方位角。

[0067] 在本实施例中, 将共形阵天线遮挡效应以及各阵元天线方向图差异考虑在内, 得到目标信号的导向矢量方向余弦表达式为:

$$[0068] \quad \mathbf{a}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_{1v}} & \dots & f_N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} r_{Nv}} \end{bmatrix}$$

[0069] 其中, 对于第 i 个天线阵元, 阵元 i 的坐标为 $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]$, $i=1, 2, \dots, N$, N 表示天线阵元的总数, $\mathbf{v} = [\cos\theta \sin\varphi \ \cos\theta \cos\varphi \ \sin\theta]$, 简记为 $\mathbf{v} = [u \ u' \ v]$, 其中, v 表示目标信号的方向余弦, $f_1 \ f_2 \ \dots \ f_N$ 表示各个天线阵元对应的方向图, λ 表示目标信号波长, θ 表示目标信号的俯仰角, φ 表示目标信号的方位角。

[0070] 接着可以得到目标信号导向矢量的方向余弦表达式的展开式 $\mathbf{a}(u, u', v)$:

$$[0071] \quad \mathbf{a}(u, u', v) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_1 u + y_1 u' + z_1 v} & \dots & f_N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} x_N u + y_N u' + z_N v} \end{bmatrix}$$

[0072] S1.2: 将所述共形阵天线进行降维处理, 获取共形阵天线的子阵级自适应和波束输出功率、子阵级自适应俯仰差波束输出功率和子阵级自适应方位差波束输出功率。

[0073] 假设接收到的来波信号为 \mathbf{x} , 结合自适应波束形成准则和算法, 可求得自适应权矢量 \mathbf{w}_{opt} , 在实际情况下, 共形阵天线阵元数目庞大, 阵元级自适应处理需要的通道数目较多, 系统结构复杂, 因此为了降低成本, 本实施例将共形阵阵元划分成多个子阵列, 进行降维处理。假设求得的共形阵天线的子阵级自适应和波束权矢量、子阵级自适应俯仰差波束权矢量和子阵级自适应方位差波束权矢量分别为 $\mathbf{w}_{\text{sub}_\Sigma}$, $\mathbf{w}_{\text{sub}_\Delta_\theta}$ 和 $\mathbf{w}_{\text{sub}_\Delta_\varphi}$, 则子阵级自适应和波束输出功率、子阵级自适应俯仰差波束输出功率和子阵级自适应方位差波束输出功率分别为:

$$[0074] \quad P_{\text{sub}_\Sigma} = \mathbf{w}_{\text{sub}_\Sigma}^H \mathbf{x}$$

$$[0075] \quad \mathbf{P}_{\text{sub}_\Delta_\theta} = \mathbf{w}_{\text{sub}_\Delta_\theta}^H \mathbf{x}$$

$$[0076] \quad \mathbf{P}_{\text{sub}_\Delta_\varphi} = \mathbf{w}_{\text{sub}_\Delta_\varphi}^H \mathbf{x}$$

[0077] S1.3: 利用各输出功率获得共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比和子阵级方位维自适应单脉冲比。

[0078] 在自适应单脉冲测角时, 需要利用自适应单脉冲比 (所述单脉冲比即差波束输出与和波束输出的比值), 因此, 利用步骤S1.2获得的各输出功率分别计算子阵级俯仰维自适应单脉冲比 R_u 和子阵级方位维自适应单脉冲比 R_v 。

[0079] 具体地, 利用子阵级自适应和波束输出功率 P_{sub_Σ} 和子阵级自适应俯仰差波束输

输出功率 $\mathbf{W}_{sub_Δθ}$ 获得共形阵天线的子阵级俯仰维自适应单脉冲比:

$$[0080] \quad R_u = \frac{P_{sub_Δθ}}{P_{sub_Σ}};$$

[0081] 利用子阵级自适应和波束输出功率 $P_{sub_Σ}$ 和子阵级自适应方位差波束输出功率 $P_{sub_Δφ}$ 获得共形阵天线的子阵级方位维自适应单脉冲比:

$$[0082] \quad R_v = \frac{P_{sub_Δφ}}{P_{sub_Σ}}。$$

[0083] S2:获取共形阵天线发射信号导向矢量偏导函数表达式。

[0084] 假如将共形阵天线水平放置在大地球坐标系下,以常用的圆锥共形阵或者圆柱共形阵为例,其与轴线垂直的截面为圆,具有对称性。如图2所示,由于共形阵天线水平放置时,其对称轴线与Y轴平行,此时任意一层圆环上各阵元的Y坐标都是相同的。假设已知雷达共形阵天线发射信号方向为 (θ_t, φ_t) ,此时方向余弦用 \mathbf{v}_t 表示,

$$\mathbf{v}_t = [\cos \theta_t \sin \varphi_t \quad \cos \theta_t \cos \varphi_t \quad \sin \theta_t], \text{简记为 } \mathbf{v}_t = [u_t \quad u'_t \quad v_t]。$$

[0085] 上述给出共形阵天线接收到的目标信号的导向矢量方向余弦表达式为

$$\mathbf{a}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_1 v} & \dots & f_N e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_N v} \end{bmatrix}, \text{由于各种信号导向矢量的表达式均一样,因此可以得到共形阵天线发射信号导向矢量方向余弦表达式:}$$

$$[0086] \quad \mathbf{a}(\mathbf{v}_t) = \begin{bmatrix} f_1 e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_1 v_t} & \dots & f_N e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_N v_t} \end{bmatrix}$$

[0087] 假设已知共形阵天线的阵元坐标为 $\mathbf{r} = [x \ y \ z]$,x表示横坐标,y表示纵坐标,z表示竖坐标,根据求导法则可以求得共形阵天线导向矢量的偏导函数表达式,分别为:

$$[0088] \quad \mathbf{a}_{u,t} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{x} - \frac{\mathbf{y} \cos \theta_t \sin \varphi_t}{\cos \theta_t \cos \varphi_t} \right) \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)$$

$$[0089] \quad \mathbf{a}_{v,t} = j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{z} - \frac{\mathbf{y} \sin \theta_t}{\cos \theta_t \cos \varphi_t} \right) \mathbf{a}(\mathbf{v}_t)$$

[0090] 其中, $\mathbf{a}_{u,t}$ 表示共形阵天线导向矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{v})$ 关于u的偏导函数在 \mathbf{v}_t 处的表达式, $\mathbf{a}_{v,t}$ 表示共形阵天线导向矢量 $\mathbf{a}(\mathbf{v})$ 关于v的偏导函数在 \mathbf{v}_t 处的表达式, $\mathbf{v}_t = [\cos \theta_t \sin \varphi_t \quad \cos \theta_t \cos \varphi_t \quad \sin \theta_t]$, θ_t, φ_t 分别表示共形阵天线发射信号的俯仰角和方位角。

[0091] S3:求解共形阵天线单脉冲比的斜率修正矩阵和偏差修正量,并构建共形阵天线广义单脉冲测角公式。

[0092] 在许多雷达系统中,实际应用时并不能获得每一个阵元的接收信号,例如差波束可能是通过子阵级波束形成得到的;当阵面为非均匀阵例如稀疏阵,和波束无法采用均匀

加权;由于干扰信号的存在,来波信号x中的噪声分量不一定是白噪声。

[0093] 鉴于上述因素,本实施例可得共形阵天线广义单脉冲测角公式:

$$[0094] \quad \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_t \\ v_t \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \text{real}\{R_u\} - \mu_u \\ \text{real}\{R_v\} - \mu_v \end{pmatrix}$$

[0095] 其中, u_t 和 v_t 表示雷达共形阵天线发射信号的波束方向, $u_t = \cos\theta_t \sin\varphi_t$, $v_t = \sin$

θ_t , $\text{real}\{\cdot\}$ 表示取实部运算, $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1}$ 表示单脉冲比的斜率修正矩阵,

$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_u \\ \mu_v \end{pmatrix}$ 表示偏差修正量。 R_u 和 R_v 分别表示俯仰向和方位向的单脉冲比。

[0096] S3.2:求解共形阵天线斜率修正矩阵和偏差修正量,对自适应单脉冲比进行线性补偿。

[0097] 在实际情况下,共形阵天线阵元数目庞大,阵元级自适应处理需要的通道数目较多,系统结构复杂,因此为了降低成本,本发明实施例的测角方法降维到子阵级进行处理,进一步求解斜率修正矩阵和偏差修正量可得:

$$[0098] \quad \begin{cases} \mu_u = \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}(v_t)}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)} \right\} \\ \mu_v = \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}(v_t)}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)} \right\} \end{cases}$$

$$[0099] \quad \begin{cases} c_{uu} = \frac{\text{real}\{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}_{u,t} \mathbf{a}^H(v_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}(v_t) \mathbf{a}_{u,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma}\}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)|^2} - 2\mu_u \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{u,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)} \right\} \\ c_{uv} = \frac{\text{real}\{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}_{v,t} \mathbf{a}^H(v_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}^H \mathbf{a}(v_t) \mathbf{a}_{v,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma}\}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)|^2} - 2\mu_u \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{v,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)} \right\} \\ c_{vu} = \frac{\text{real}\{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}_{u,t} \mathbf{a}^H(v_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}(v_t) \mathbf{a}_{u,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma}\}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)|^2} - 2\mu_v \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{u,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)} \right\} \\ c_{vv} = \frac{\text{real}\{\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}_{v,t} \mathbf{a}^H(v_t) \mathbf{w}_{sub_ \Sigma} + \mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}^H \mathbf{a}(v_t) \mathbf{a}_{v,t}^H \mathbf{w}_{sub_ \Sigma}\}}{|\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)|^2} - 2\mu_v \text{real} \left\{ \frac{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}_{v,t}}{\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}^H \mathbf{a}(v_t)} \right\} \end{cases}$$

[0100] 其中, $\mathbf{w}_{sub_ \Sigma}$ 表示共形阵天线子阵级自适应和波束权矢量, $\mathbf{w}_{sub_ \Delta\theta}$ 和 $\mathbf{w}_{sub_ \Delta\varphi}$ 分别表示共形阵天线子阵级自适应俯仰差波束权矢量和方位差波束权矢量,在步骤S1已经求得; $\mathbf{a}_{u,t}$ 和 $\mathbf{a}_{v,t}$ 表示雷达发射信号导向矢量的偏导函数表达式在步骤S2已经求解得到。

[0101] S4:利用共形阵天线广义单脉冲测角公式求得目标信号的方向余弦,进而求得目标信号的俯仰角和方位角。

[0102] 具体地,将求得的斜率修正矩阵 $\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{uv} \\ c_{vu} & c_{vv} \end{pmatrix}^{-1}$ 和偏差修正量 $\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_u \\ \mu_v \end{pmatrix}$ 的值代入至广义单脉冲测角公式,即可求得目标信号的方向余弦u和v,进而解出目标信号的角度 (θ, φ) 。

[0103] 进一步地,本发明实施例的基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法的效果通过以下仿真试验进一步说明:

[0104] (1) 仿真条件

[0105] 在本实施例的仿真实验中,以圆锥共形阵天线为例,坐标系建立如图2所示,定义俯仰角为来波信号在XOY面上的投影与信号本身的夹角, φ 表示来波信号的方位角,定义来波信号在XOY面上的投影与Y轴正向的夹角为方位角,其与圆锥轴线垂直的截面为圆,具有对称性,将共形阵天线划分为12个子阵通道,子阵级约束自适应单脉冲测角法采用九点约束法。对比分析子阵级传统自适应单脉冲测角法(简称传统单脉冲)、子阵级约束自适应单脉冲测角法(简称约束单脉冲)以及本发明提出的共形阵天线子阵级广义自适应单脉冲测角法(简称广义单脉冲)这三种方法的测角性能。

[0106] (2) 仿真内容

[0107] 仿真实验一:当存在一个旁瓣干扰和一个靠近主波束的干扰时,对比三种测角方法的测角误差。假设目标信号来自于 $(0^\circ, 0^\circ)$, 存在一距离主波束较近的干扰 $(3^\circ, 0^\circ)$ 和一个旁瓣干扰 $(15^\circ, -30^\circ)$, 干噪比为60dB,在不同的信噪比下做蒙特卡洛实验,图3(a)和图3(b)分别为三种不同测角方法的俯仰维测角误差曲线和方位维测角误差曲线。

[0108] 仿真实验二:改变旁瓣干扰个数,对比三种测角方法的误差曲线变化趋势。

[0109] 假设波束指向 $(0^\circ, 0^\circ)$, 固定信噪比为20dB,干噪比均设置为60dB,改变旁瓣干扰的个数作蒙特卡洛实验,图4(a)和图4(b)分别为三种不同测角方法的俯仰维测角误差曲线和方位维测角误差曲线。

[0110] (3) 仿真结果分析

[0111] 从图3(a)和图3(b)可以看出,当存在一个旁瓣干扰和一个靠近主瓣的干扰时,子阵级传统单脉冲俯仰维测角误差最大,本发明实施例的测角方法的测角误差始终低于子阵级约束自适应单脉冲。综上所述,三种方法的测角误差都随着输入信噪比的增大而下降,当外界环境中存在靠近主波束的干扰时,本发明实施例的测角方法的测角性能优于子阵级约束自适应单脉冲测角。

[0112] 从图4(a)和图4(b)可以看出,随着旁瓣干扰个数的增加,子阵级传统自适应单脉冲测角误差始终大于另外两种方法的测角误差,当干扰个数小于3时,子阵级约束自适应单脉冲测角误差小于本发明实施例的子阵级广义自适应单脉冲测角误差,当干扰个数超过3时,子阵级约束自适应单脉冲测角误差急剧增大,此后,本发明实施例的测角方法的测角误差始终小于子阵级约束自适应单脉冲。

[0113] 此外,子阵级约束自适应单脉冲通过对主波束施加额外约束条件,对主波束方向图保形,但是额外的约束条件会损失空域自由度。当干扰个数小于施加约束条件后所剩余的空域自由度时,子阵级约束自适应单脉冲测角误差较小,测角性能较好;当干扰个数超过施加约束条件后所剩余的空域自由度时,子阵级约束自适应单脉冲测角曲线失真,导致该

方法测角误差增大。综上,随着旁瓣干扰个数的增加,本发明实施例的测角方法既不依赖于根据自适应和差波束方向图得到的单脉冲比曲线的斜率,也不损失系统自由度,能保持较好的测角性能。

[0114] 当共形阵天线在外界环境中存在靠近主波束的干扰时,相比于现有的子阵级传统自适应单脉冲测角方法和子阵级约束自适应单脉冲测角方法,本发明基于共形阵天线的广义自适应单脉冲测角方法在实现干扰抑制的同时,具有更好的测角性能。因为子阵级传统自适应单脉冲为了抑制干扰,在干扰位置处形成零陷,但是由于干扰距离主瓣较近,俯仰维差波束方向图失真,此时鉴角曲线严重失真,子阵级传统自适应单脉冲俯仰维测角误差急剧升高;而子阵级约束自适应单脉冲通过对主波束施加约束条件,使得差波束方向图保形,能抵消一部分零陷造成的损失。本发明的测角方法不依赖于根据自适应和差波束方向图得到的单脉冲比曲线的斜率,测角误差最小。当旁瓣干扰个数较多时,相比于子阵级约束自适应单脉冲测角方法,本发明在实现干扰抑制的同时,测角误差更小。由于子阵级约束自适应单脉冲对主波束施加约束条件,实现主波束保形,额外的约束条件导致系统空域自由度损失。当干扰个数超过施加约束条件后所剩余的空域自由度时,子阵级约束自适应单脉冲鉴角曲线失真,导致该方法测角误差增大。而本发明的测角方法不会额外损失系统自由度,随着旁瓣干扰个数的增加,能保持较好的测角性能。

[0115] 此外,本发明的共形阵天线子阵级广义自适应单脉冲测角法,与共形阵天线阵元级自适应处理相比,能够简化系统结构,减少算法的计算量,降低系统的复杂度,同时满足系统实时性的要求。

[0116] 以上内容是结合具体的优选实施方式对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施只局限于这些说明。对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干简单推演或替换,都应当视为属于本发明的保护范围。

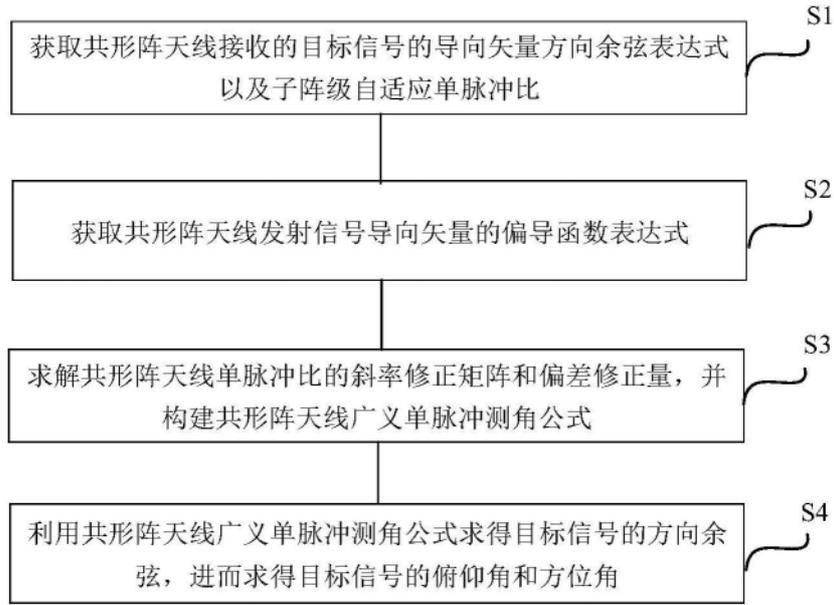


图1

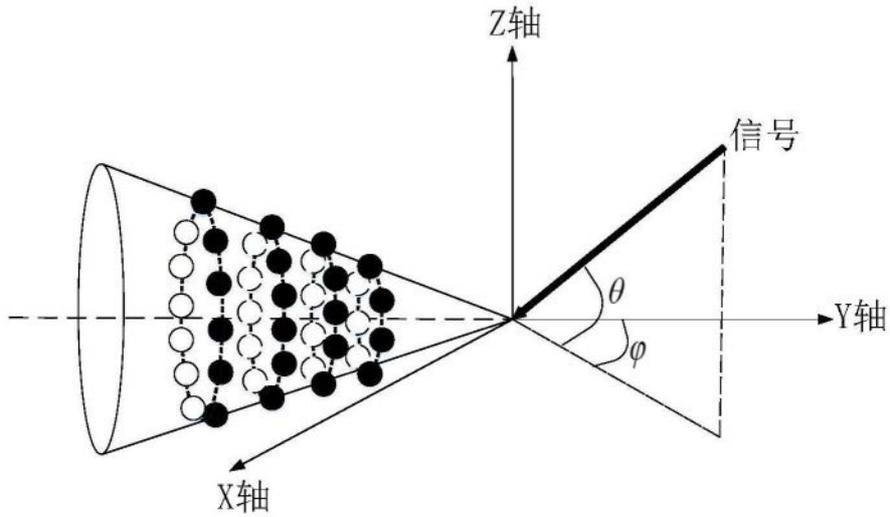


图2

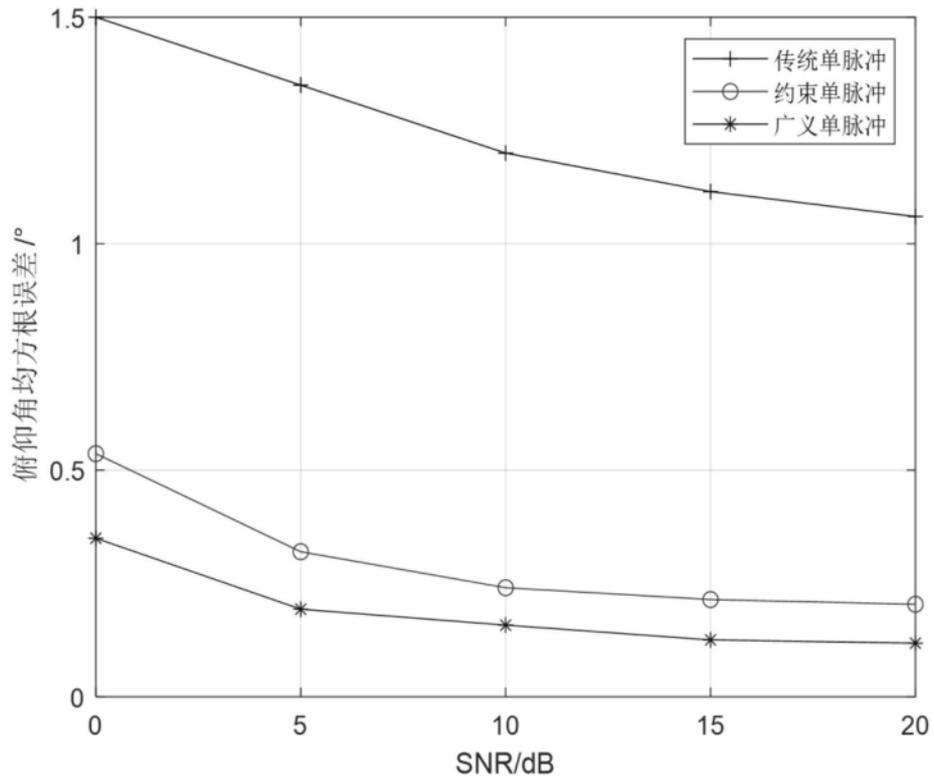


图3(a)

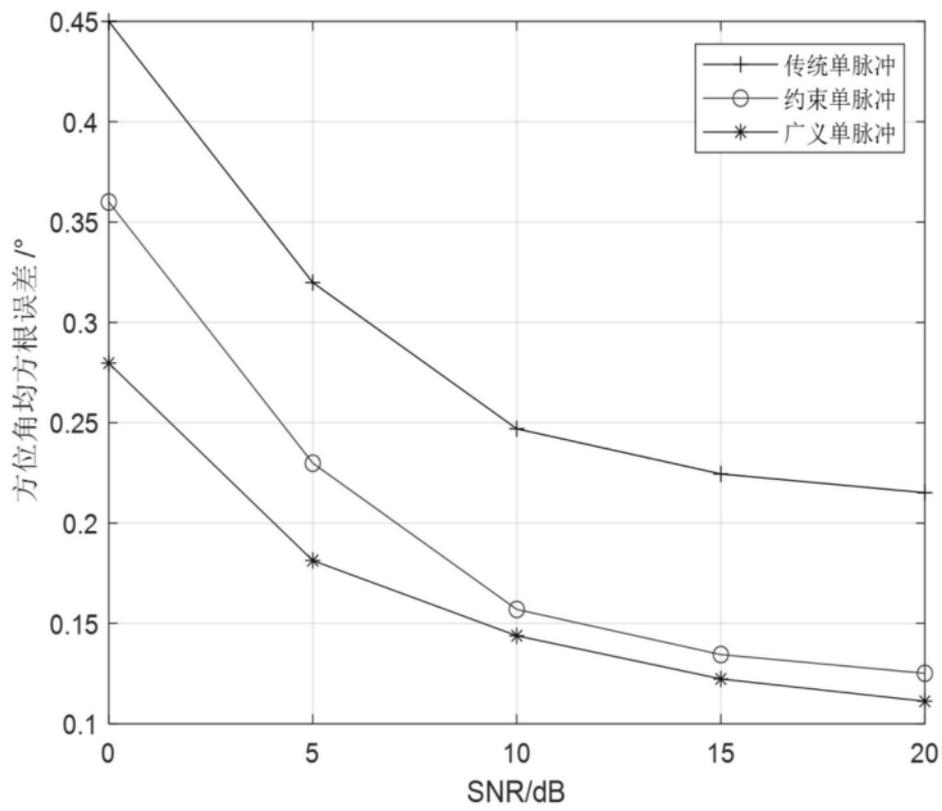


图3(b)

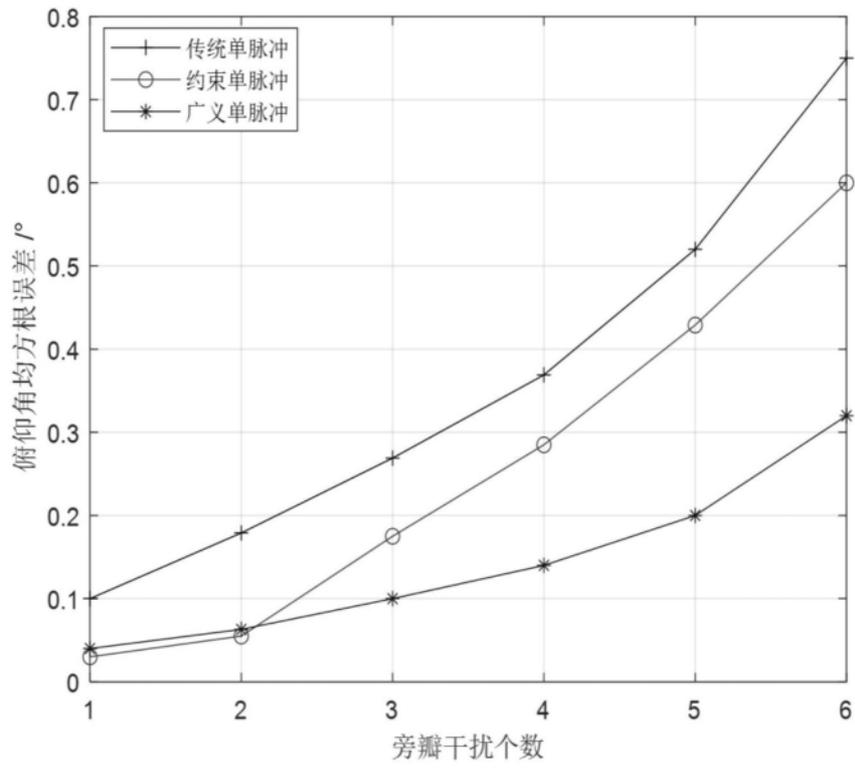


图4(a)

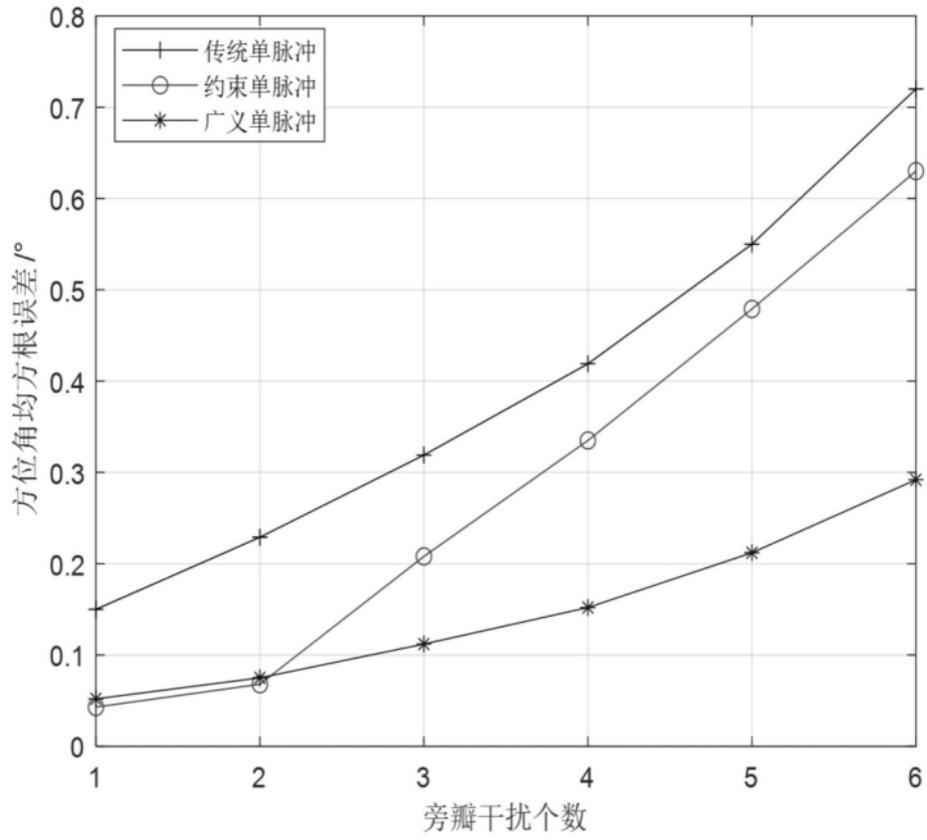


图4(b)