

分布式三元矢量天线二维波达方向及线极化状态估计

孙莉 周力 欧钢

(国防科技大学 电子科学与工程学院 卫星导航研发中心, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 矢量天线在多极化中的应用, 一般是由整个六元的矢量天线构成天线阵的阵元, 通道数多, 系统复杂。本文应用矢量天线的单分量电偶极子构成分布式的三元矢量天线, 每个矢量天线元只接收空间中三个正交的电场分量中的一个, 很好的进行了信号的来向、幅度、相位和极化信息的测量。采用对所构造的空时矩阵特征值分解结合多信号识别(MUSIC)方法, 估计出来波的仰角、方位角及线极化来波的极化状态, 给出了估计的误差。本文所提出的简单三通道系统结构可在多极化中得到应用。

关键词: 矢量天线; 仰角; 方位角; 线极化; MUSIC 算法

A Distributed Vector Sensor with Three Dipoles for Two Dimensional Direction of Arrival and Linearly Polarized State Estimation

SUN Li ZHOU Li OU Gang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the polarization diversity application, usually the full co-located vector sensor is used to form the elements of an array. The system is complicated with large numbers of channels. A distributed reduced vector sensor with three current dipoles was proposed in this article. It can carry on the vector measurement of the arrival's electric field. With combination of MUSIC and Eigen-value Decomposition of the space time matrix constructed, the distributed reduced vector sensor we proposed can estimate the elevation, azimuth and the linearly polarized state of the arrival. The estimation error was presented. This simple system with three channels can be used in the application of polarization diversity.

Key Words: Vector Sensor; Elevation; Azimuth; Linearly Polarized; MUSIC

1 引言

极化、幅度、时间、频率、相位以及来波方向是对来波信号的各个方面的描述, 来波的各方面信息可以综合利用, 借以提高对来波的辨识。

极化是波形多样性的一种, 极化信息的开发利用, 可以提高雷达和通信系统的性能。传统的雷达是用单一极化的天线发射信号、接收目标回波。单一极化的目标后向散射是一个标量, 这样就丢失了一些儿信息。想知道目标后向散射的整个信息, 就需要获得后向散射的极化状态。要求雷达能够进行矢量测量[1]。

矢量天线由三个电偶极子和三个磁环构成, 可以测量出空间中一点的三个正交的电场分量和三个正交的磁场分量[2]。多极化的应用使无线通信的信道容量成倍的增加, 在一个多径环境下, 应用极化状态的全部六个分量(三个电场

和三个磁场)比传统的双极化无线通信的信道容量能够提高三倍[3]。文献[4]进一步给出了对此的实验证明。

在阵列信号处理的来波方向估计中, 一般是利用平面阵各阵元间的相位差来估计来波信号的仰角和方位角。涉及来波信号的极化估计, 一般是用整个六元的矢量天线构成天线阵的一个阵元, 通道数多, 系统设计及实现复杂。

本文采用三个各向同性的矢量天线元(电偶极子天线), 组成分布式三元矢量天线。采用矢量天线测量出空间中的电场分量, 充分利用来波信号的幅度和相位信息, 估计出来波信号的仰角、方位角及线极化来波的极化状态; 并给出了估计的误差。本文所提出的三通道分布式简化矢量天线, 系统结构简单, 能够解决多极化应用中小型飞行器等平台受限的实际问题。

2 信号模型

空间中的一点接收到的一个电磁波,可以分解成三个正交的电场和三个正交的磁场。公式表达是在文献[2]的基础上进行的改进,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & -\sin\phi \\ \cos\theta\sin\phi & \cos\phi \\ -\sin\theta & 0 \\ \sin\phi & \cos\theta\cos\phi \\ -\cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$E_\theta = \sin\gamma e^{j\gamma}$, $E_\phi = \cos\gamma$ 为空间来波的两个正交分量。

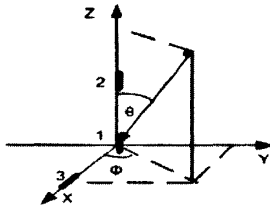


图1 来波方向示意图

分布式三元矢量天线,如图1所示。各向同性、只接收 E_z 分量和 E_x 分量的三个电偶极子沿 Z 轴和 X 轴正半轴摆放,间距为空间传播的来波信号波长的一半。来波方向 θ 为 90° 减去仰角, Φ 为方位角。

设空中来波为幅度归一化的线极化波,则放置于同一点各向同性,只接收 E_z 分量的电偶极子和只接收 E_x 分量的电偶极子,接收到的 E_z 分量和 E_x 分量可分别表示为

$$E_z = -\sin\theta \sin\gamma s(t) \quad (2)$$

$$E_x = (\cos\theta\cos\phi\sin\gamma - \sin\phi\cos\gamma)s(t) \quad (3)$$

二元 E_z 电偶极子线阵接收到的信号为

$$r(t) = s(t)\alpha(\theta, \gamma) + n(t) \quad (4)$$

其中噪声矢量为

$$n(t) = [n_1(t), n_2(t)]^T$$

$\alpha(\theta, \gamma)$ 为引导矢量,如下所示

$$\alpha(\theta, \gamma) = [-\sin\theta\sin\gamma, -\sin\theta\sin\gamma e^{-j2\pi d \cos\theta/\lambda}]^T$$

λ 为来波波长, d 为天线元间距 $\lambda/2$ 。

二元 E_z 电偶极子线阵接收信号的相位表达为

$$r_{z\varphi}(t) = \alpha_{z\varphi}(\theta)s(t) + n_{z\varphi}(t) \quad (5)$$

其中 $\alpha_{z\varphi}(\theta) = [1, e^{-j2\pi d \cos\theta/\lambda}]^T$

$$n_{z\varphi}(t) = [n_{z\varphi 1}(t), n_{z\varphi 2}(t)]^T$$

位于 X 轴上的 E_z 、 E_x 电偶极子组成的线阵,接收信号的相位表达为

$$r_{x\varphi}(t) = \alpha_{x\varphi}(\theta, \phi)s(t) + n_{x\varphi}(t) \quad (6)$$

其中 $\alpha_{x\varphi}(\theta, \phi) = [1, e^{-j2\pi d \sin\theta\cos\phi/\lambda}]^T$

$$n_{x\varphi}(t) = [n_{x\varphi 1}(t), n_{x\varphi 2}(t)]^T$$

3 来波仰角方位角及线极化状态估计

3.1 来波仰角估计

二元 E_z 电偶极子线阵接收信号的相位表达,其相关矩阵为

$$R_{z\varphi\varphi} = E[r_{z\varphi}(t)r_{z\varphi}^*(t)] = \alpha_{z\varphi}(\theta)S\alpha_{z\varphi}^*(\theta) + \delta^2 I \quad (7)$$

其中 $S = E[s(t)s^*(t)]$, $*$ 是复共轭转置, $E[\cdot]$ 是数学期望。

对 $R_{z\varphi\varphi}$ 相关矩阵,应用 MUSIC 算法

$$\tilde{R}_{z\varphi\varphi} = \sum_{i=1}^2 \lambda_i v_i v_i^* \quad (8)$$

在我们假设的来波信号情况下, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$ 是相关矩阵的特征值, v_i 是相关矩阵的特征向量。与 λ_1 对应的特征向量形成信号子空间为

$$\Pi_S = \sum_{i=1}^1 v_i v_i^* \quad (9)$$

与 λ_2 对应的特征向量形成噪声子空间为

$$\Pi_N = \sum_{i=2}^2 v_i v_i^* \quad (10)$$

引导矢量为

$$S(\theta) = [1, e^{-j2\pi d \cos\theta/\lambda}]^T \quad (11)$$

MUSIC 算法是用上面的引导矢量在噪声子空间的投影来进行来波方向的估计, MUSIC 的空间扫描为这个投影的范数的逆[5].

$$MUSIC(\theta) = \frac{1}{\|\Pi_N S(\theta)\|} \quad (12)$$

峰值对应的角度 θ 值, 即为 90° 减去仰角的值, 这样就估计出了来波的仰角。

3.2 来波线极化状态估计

构造一个空时矩阵 R 。

定义

$$R_{z\varphi\varphi} = E[r_{z\varphi}(t)r_{z\varphi}^*(t)] = \alpha_{z\varphi}(\theta)S\alpha(\theta, \gamma)^* \quad (13)$$

构造空时矩阵[6]为

$$R = R_{z\varphi\varphi} R_{z\varphi\varphi}^{-1} \quad (14)$$

其中 $(\cdot)^{-1}$ 为矩阵的伪逆运算。

对 R 矩阵进行特征值分解, 大的特征值即为信号的幅度值 $\sin \theta \sin \gamma$ 。利用上一步骤中估计出的 θ 值, 则得到线极化状态 γ 的估计值。

3.3 来波方位角估计

位于 X 轴上的 E_z 、 E_x 电偶极子组成的线阵, 接收信号的相位表达, 其相关矩阵为

$$R_{x\varphi\varphi} = E[r_{x\varphi}(t)r_{x\varphi}^*(t)] = \alpha_{x\varphi}(\theta)S\alpha_{x\varphi}(\theta)^* + \delta^2 I \quad (15)$$

对 $R_{x\varphi\varphi}$ 相关矩阵, 同样应用 MUSIC 算法

$$\tilde{R}_{x\varphi\varphi} = \sum_{i=1}^2 \lambda_i v_i v_i^* \quad (16)$$

与 λ_2 对应的特征向量形成的噪声子空间为

$$\Pi_{xN} = \sum_{i=2}^2 v_i v_i^* \quad (17)$$

引导矢量为

$$S(\beta) = [1, e^{-j2\pi d \cos \beta / \lambda}]^T \quad (18)$$

其中 $\cos \beta = \sin \theta \cos \Phi$ 。

$$MUSIC(\beta) = \frac{1}{\|\Pi_{xN} S(\beta)\|} \quad (19)$$

求出峰值的 β , 即得到 $\sin \theta \cos \Phi$ 的值。与第一步骤中估计出的 θ 值结合, 则估计出了来波的方位角。

本文采用的来波仰角、方位角和线极化状态的估计方法分三个步骤:

①对放置于 Z 轴的两 E_z 电偶极子组成的二元线阵, 应用 MUSIC 方法, 估计出 θ 值, 因而得到来波的仰角;

②对放置于 Z 轴的两 E_z 电偶极子组成的二元线阵, 构造出一个空时矩阵, 对其特征值分解, 利用信号的幅度信息, 结合第一步骤中得到的 θ 值, 估计出来波的线极化状态 γ ;

③利用放置于 X 轴的 E_z 、 E_x 两电偶极子组成的二元线阵, 对来波的相位信息, 同样应用 MUSIC 算法, 估计出 $\cos \beta$ 的值, 即得 $\sin \theta \cos \Phi$ 的估计值, 结合第一步骤中得到的 θ 值, 估计出来波的方位角。

4 仿真结果

仿真中, 阵元所加的噪声为零均值高斯白噪声, 一次实验结果采用 50 次估计的均值。所有仰角的估计误差随信噪比的变化如图 2 所示。信噪比 16dB 以上, 仰角 80° 以下, 估计误差小于 1° 。

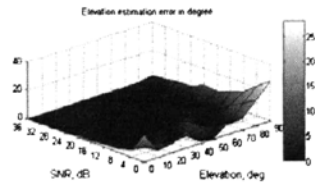


图 2 仰角估计误差随信噪比的变化

假设来波仰角为 45° , 所有线极化状态的估计误差随信噪比的变化如图 3 所示。其估计误差与仰角的估计误差相关, 这里包含了仰角的估计误差。信噪比 20dB 以上, 线极化状态描述 γ 在 60° 以下, 估计误差小于 2° 。

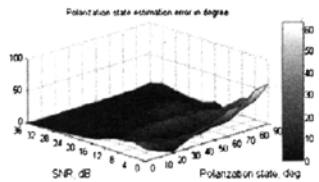


图 3 线极化状态估计误差随信噪比的变化

信噪比为 20dB, 所有仰角来波情况下, 所有线极化状态描述 γ 的估计误差如图 4 所示。

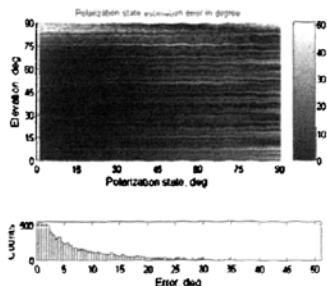


图4 所有仰角下所有线极化状态估计误差

假设来波仰角为 45° ，所有方位角的估计误差随信噪比的变化如图5所示。其误差包含了仰角的估计误差。方位角 0° 到 20° 估计误差较大；信噪比 16dB 以上，方位角 20° 以上，估计误差小于 1° 。

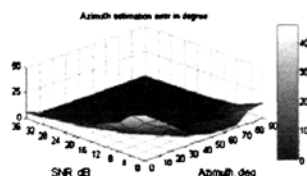


图5 方位角估计误差随信噪比的变化

信噪比为 16dB，所有仰角来波情况下，所有方位角的估计误差如图6所示。仰角 65° 以下，方位角 25° 以上，估计误差小于 2° 。

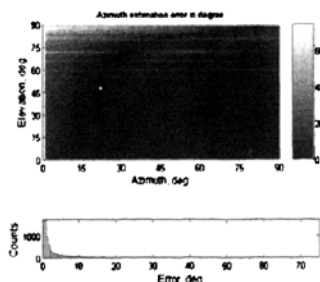


图6 所有仰角下所有方位角的估计误差

来波仰角为 85° 、 45° 、 25° 时，独立实验 100 次，来波仰角估计误差的标准差随信噪比的变化曲线，如图7所示。信噪比在 15dB 以上，估计误差的标准差在 0.5° 以内。

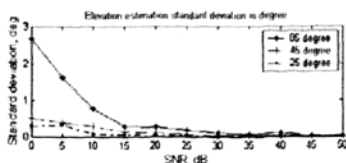


图7 仰角估计误差的标准差随信噪比的变化

综合以上误差分析，本系统对仰角 65° 以下，方位角 25° 以上，线极化状态描述在 50° 以内的空间来波的三个参量能够给出正确的估计。来波仰角估计误差在 1° 以内，方位角估计误差在 2° 以内，线极化状态估计误差在 3° 以内。

5 结论

本文采用矢量天线建模，信号建模准确，更贴近实际应用；很好的反映了来波信号的仰角、方位角和极化信息。设计了一个分布式三元矢量天线，三通道估计出信号的仰角、方位角和线极化状态三个参量；并给出了不同情况下，三个参量的估计误差。分布式三元矢量天线系统结构简单，易于实现。在多极化应用中，本文所提出的系统结构可应用在平台空间有限的系统上，例如小型飞行器、小型雷达等。

参考文献

- [1] Dino Giuli, "Polarization Diversity in Radars," Proc. IEEE, Vol. 74, No. 2, pp. 245-269, Feb. 1986.
- [2] Kainam Thomas Wong and Michael D. Zoltowski, "Self-Initiating MUSIC-Based Direction Finding and Polarization Estimation in Spatio-Polarizational Beam-space," IEEE Trans. Antenna and Propagation, Vol. 48, No.8, Aug. 2000.
- [3] Michael R. Andrews, Partha P. Mitra and Robert deCarvalho, "Tripling the capacity of wireless communications using electromagnetic polarization," Nature, Vol. 409, pp. 316-318, 2001.
- [4] C-C. Ko, J. Zhang, and A. Nehorai, "Separation and tracking of multiple broadband sources with one electromagnetic vector sensor," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, pp. 1109-1116, Jul. 2002.
- [5] Sebastian Miron, Nicolas Le Bihan and Jerome I. Mars, "Vector-Sensor MUSIC for Polarized Seismic Sources Localization," EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005:1, pp.74-84.
- [6] CHEN Huawei, QIU Xiaojun and ZHAO Junwei, "Two-dimensional wideband direction of arrival estimation with acoustic vector-sensor array," Chinese Journal of Acoustics, Vol.25, No.1, 2006.

作者简介:

孙莉，女，1981年生，湖南长沙国防科技大学电子科学与工程学院信息与通信工程专业博士研究生，研究方向：微带天线、天线阵应用研究、卫星导航定位。

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，一直致力和专注于微波、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>