

卫星多波束天线指向误差对干扰源定位性能的影响

程安启, 王华力

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007)

摘要: 本文详细分析了卫星多波束天线的指向误差对多波束天线的阵列流形和干扰源定位的影响, 并提出一种修正方法, 可以在已知天线指向精度的情况下对采用 MUSIC 算法的得到定位结果进行修正, 从而有效提高了卫星干扰源定位的性能. 计算机仿真支持了理论分析的结果.

关键词: 卫星多波束天线; 干扰源定位; 阵列流形; 天线指向误差; 波达方向估计

中图分类号: TN975; TN927 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 07 1327-04

Influence on Performance of Interference Localization Using Satellite Multiple Beam Antenna with Pointing Error

CHENG Anqi, WANG Huali

(Institute of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: This paper presents an analysis of the influence of pointing error on antenna array manifold and performance of interference localization based on a satellite multiple beam antenna. A modified approach is also presented which can modify the results of interference localization by using MUSIC algorithm and come out with more robust results. Simulation results support the theoretical analysis.

Key words: satellite multiple beam antenna; interference localization; array manifold; antenna pointing error; DOA estimation

1 引言

卫星通信系统实现干扰源定位主要有两种途径, (1) 基于信号到达时差(TDOA)定位, (2) 基于信号到达角(AOA)技术, 即测向定位. 前者需要多颗卫星相互配合, 实现较为复杂. 后者则可以实现单颗卫星的超分辨率定位, 是一种具有良好应用前景的卫星干扰源定位技术^[1~3]. 文献[2~4]讨论了基于卫星多波束天线和空间谱估计技术进行高分辨率干扰源定位的原理和方法, 但都未考虑卫星多波束天线自身的指向误差的影响^[5]. 本文将分析多波束天线的指向误差对基于星载多波束天线的干扰源定位性能的影响并给出一个定量的结论, 为基于星载多波束天线的干扰源定位技术的实用化提供重要的依据和参考.

本文将首先简要介绍卫星多波束天线的简化数学模型和利用卫星多波束天线实现干扰源定位的基本原理. 然后着重分析天线指向误差对利用卫星多波束天线进行干扰源定位性能的影响. 最后给出计算机仿真的结果和本文的结论. 文中如未作出说明, 则用 $(*)^T$ 和 $(*)^H$ 表示矩阵的转置和 Hermitian 转置. $\hat{\theta}$ 表示 θ 的估计值, $f'(*)$ 和 $f''(*)$ 表示 $f(*)$ 的一阶和二阶导数, $Tr(*)$ 表示求迹运算.

2 基于卫星多波束天线的干扰源定位技术

2.1 卫星多波束天线的简化数学模型

卫星多波束天线可以实现卫星波束的赋形覆盖, 是目前应用最为广泛的一种通信卫星天线^[3]. 卫星多波束天线通常是指馈源阵列配置于反射面和透镜天线的焦平面, 控制馈源

和焦点的相对位置, 由焦点的各个馈源形成多个不同指向且相互交叉的点波束, 其中, 六边形结构(也称格形结构)是最常见的馈源阵列配置方式.

这里假设多波束天线焦平面上的馈源数为 M (即有 M 个波束), 波束覆盖区内有 K 个窄带辐射源($K < M$), 其相应的DOA(Direction of Arrival)参数分别为 $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]$, 这里 $\Theta_k = [\theta_k, \varphi_k]^T$ 表示第 k 个辐射源的方位角和仰角. 那么第 i 个波束的输出信号为

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^K a_i(\Theta_k) s_k(t) + n_i(t) \quad (1)$$

式中, $s_k(t)$ 表示第 k 个辐射源信号的基带复包络, $n_i(t)$ 是第 i 个波束接收通道的加性高斯白噪声, $a_i(\Theta_k)$ 为第 k 个辐射源信号在第 i 个波束的响应函数. 对于多波束天线, $a_i(\Theta_k)$ 可用一简化的解析函数式来表示:

$$a_i(\Theta_k) = \sqrt{\eta} \frac{\pi D J_1(u)}{\lambda u} \quad (2)$$

其中, $u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin(\sqrt{(\theta_k - \theta_i)^2 + (\varphi_k - \varphi_i)^2})$, 这里 $J_1(*)$ 为一类贝塞尔函数, η 为天线效率, D 为天线孔径的大小, λ 为波长; (θ_i, φ_i) 表示第 i 个波束的中心指向. $A(\Theta) = [a_1(\Theta_k), a_2(\Theta_k), \dots, a_M(\Theta_k)]^T (k = 1, 2, \dots, K)$ 为整个多波束天线馈源阵列的响应, 也称之为阵列流形(manifold).

为简化起见, 我们采用的多波束天线模型是由呈六边形的7个馈源喇叭构成. 点波束宽度为1.5, 其静态方向图如图1所示. 假设在波束覆盖区内, 一典型期望信号和干扰信号的

分布如图 2 所示: 期望信号来向为 $(0.1, 0.1)$, 信噪比(SNR)为 15dB, 两个干扰信号的来向分别为 $(0.5, -0.3)$ 和 $(-1.0, -1.5)$, 干噪比分别为 40dB 和 50dB. 3 个辐射源的归一化频率参数均设为 1, 方位角和仰角的单位均为度.

2.2 基于卫星多波束天线的干扰源定位技术

基于卫星多波束天线的干扰源定位问题, 即干扰源信号 DOA 参数 Θ 的估计问题, 近年来提出了许多方法, 但基本上可归为两大类方法, 即基于经典估计理论的最大似然估计和

归结于信号参量估计的参数谱方法^[9]. 最大似然估计主要是将阵列流形看作是检测映射向量, 将经典的检测和估计理论移用到阵列信号处理中来. 即根据多波束天线的输出数据矢量的最大似然函数来估计辐射源信号 DOA 参数. 归结于信号参数估计的参数谱方法主要是以特征分解为基础的子空间方法, 与最大似然估计方法不同的是, 特征分解方法的基础是阵列信号空域采样数据的协方差矩阵. 此方法在构造(伪)谱函数时引入了信号子空间以及其正交空间(噪声子空间)的概念, 并充分利用信号子空间和噪声子空间的正交性进行辐射源的 DOA 估计. 分析表明, 特征分解方法可以突破天线的瑞利极限, 从而实现对抗扰源的超分辨率的定位, MUSIC 算法是此类方法的突出代表^[3, 7]. 本文将 MUSIC 算法为例分析卫星多波束天线的干扰源定位性能.

采用 MUSIC 算法进行空间谱估计, 得到估计值的基本关系式:

$$f(\Theta) = \frac{a^H(\Theta) E_n E_n^H a(\Theta)}{a^H(\Theta) a(\Theta)} = \text{Tr}(P_{\Theta} E_n E_n^H) \quad (3)$$

其中, $a(\Theta)$ 为式(2)中定义的阵列响应函数, 投影矩阵 $P_{\Theta} = a(\Theta)[a^H(\Theta) a(\Theta)]^{-1} a(\Theta)$. E_n 为对多波束阵列天线的阵列协方差矩阵进行特征分解得到的噪声子空间.

在构造二维空间(伪)谱函数时可以有信号子空间法和噪声子空间法, 上面式(3)为噪声子空间法. 通过此法得到的二维空间谱函数也称零谱函数. 对 Θ 进行空域二维搜索, $f(\Theta)$ 能使取最小值的 Θ 即是辐射源的 DOA 估计值 $\hat{\Theta}$ (如为无偏估计则 $f(\hat{\Theta}) = 0$).

3 指向误差对卫星多波束天线阵列流形和干扰源定位的影响

3.1 天线指向误差对多波束天线的阵列流形影响

上面的分析与推导中, 我们都是假定多波束天线的指向



图 1 多波束天线静态方向图

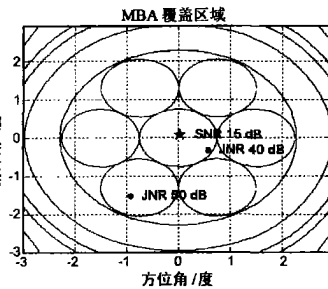


图 2 多波束天线覆盖区内信号/干扰分布情况

精确已知的. 而天线指向误差则是由卫星天线自身的指向误差, 卫星姿态误差以及星体结构误差等因素决定的^[5], 此外还与卫星平台的星历精度以及天线指向精度等有关. 卫星多波束天线的指向误差通常分为常值指向误差和随机指向误差. 其中常值误差通常可以由姿态控制系统进行补偿, 而随机误差为不可预知的随机变量, 往往用其统计值(均值)或最大值表示^[5]. 结合卫星干扰源定位的实际, 我们认为天线的指向误差实际上表现为一种噪声分量. 在进行谱估计时, 如果随机噪声分量越小, 则估计精度越高. 因此, 我们取最大的天线指向误差可以将干扰源定位的噪声分量作最坏的打算, 而实际的估计精度将优于这个估计的精度. 下面, 假定天线的指向误差是指天线指向随机误差的最大值. 我们将分析天线指向误差对多波束天线数学模型的影响.

假设天线指向误差使得多波束天线的第 i 个波束的中心指向的方位角和仰角偏差分别为 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\varphi_i$. 即由波束中心指向 (θ_i, φ_i) 偏向 $(\theta_i + \Delta\theta_i, \varphi_i + \Delta\varphi_i)$, 那么此时第 k 个辐射源信号在多波束天线的第 i 个波束的响应函数为 $\bar{a}_i(\Theta_k)$. 根据式

$$(2) \text{ 有: } \bar{a}_i(\Theta_k) = \sqrt{\pi} \frac{\pi D J_1(\bar{u})}{\lambda u} \quad (4)$$

其中, $\bar{u} = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \left[\sqrt{(\theta_k - \theta_i - \Delta\theta_i)^2 + (\varphi_k - \varphi_i - \Delta\varphi_i)^2} \right]$ 其他参数均与式(2)中定义相同.

首先, 由一阶贝塞尔函数的定义^[10], 有以下展开式

$$\text{当 } -3 < x < 3 \text{ 时, } J_1(x) = \frac{1}{2}x - \frac{1}{2^3 2!}x^3 + \frac{1}{2^5 2! 3!}x^5 \dots$$

这里我们取

$$J_1(x) \approx \frac{1}{2}x - \frac{1}{16}x^3 \quad (5)$$

将 $\bar{a}_i(\Theta_k)$ 按式(5)的定义展开有

$$\bar{a}_i(\Theta_k) = \sqrt{\pi} \frac{\pi D J_1(\bar{u})}{\lambda u} = \sqrt{\pi} \frac{\pi D}{\lambda} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{16} \bar{u}^2 \right] \quad (6)$$

也即:

$$\bar{a}_i(\Theta_k) = \sqrt{\pi} \frac{\pi D}{2\lambda} - \sqrt{\pi} \frac{\pi^2 D^2}{16\lambda^2} \sin^2 \left[\sqrt{(\theta_k - \theta_i - \Delta\theta_i)^2 + (\varphi_k - \varphi_i - \Delta\varphi_i)^2} \right] \quad (7)$$

考虑到天线指向误差相对于波束指向为较小偏差量, 即 $(\Delta\theta_i, \Delta\varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 的较小偏差量. 因此, 我们可以将 $\bar{a}_i(\Theta_k)$ 进行 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\varphi_i$ 上的二维泰勒展开, 忽略高阶无穷小量, 我们可以近似得到

$$\begin{aligned} \bar{a}_i(\Theta_k) &\approx a_i(\Theta_k) + \frac{\partial a_i(\Theta_k)}{\partial \theta_i} \Delta\theta_i + \frac{\partial a_i(\Theta_k)}{\partial \varphi_i} \Delta\varphi_i \\ &= a_i(\Theta_k) + \Delta a_i(\Theta_k) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\Delta a_i(\Theta_k) = \frac{\partial a_i(\Theta_k)}{\partial \theta_i} \Delta\theta_i + \frac{\partial a_i(\Theta_k)}{\partial \varphi_i} \Delta\varphi_i$

根据式(2), 进一步有

$$\begin{aligned} \Delta a_i(\Theta_k) &= \sqrt{\pi} \frac{\pi^2 D^2}{16\lambda^2} \sin 2 \sqrt{(\theta_k - \theta_i)^2 + (\varphi_k - \varphi_i)^2} \\ &\quad \cdot \frac{(k - \theta_i) \Delta\theta_i + (\varphi_k - \varphi_i) \Delta\varphi_i}{\sqrt{(\theta_k - \theta_i)^2 + (\varphi_k - \varphi_i)^2}} \end{aligned} \quad (9)$$

这样, 我们可以将天线指向存在误差时的阵列流形表示为:

$$\bar{A}(\Theta) = A(\Theta) + \Delta A(\Theta) \quad (10)$$

其中, $A(\Theta)$ 为天线无指向误差时的阵列流形, $A(\Theta) = [a_1(\Theta_k), a_2(\Theta_k), \dots, a_M(\Theta_k)]^T$, $\bar{A}(\Theta)$ 有误差时的阵列流形, $\bar{A}(\Theta) = [\bar{a}_1(\Theta_k), \bar{a}_2(\Theta_k), \dots, \bar{a}_M(\Theta_k)]^T$, $\Delta\bar{A}(\Theta)$ 为天线指向误差 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\varphi_i$ 带来的多波束天线阵列流形的误差分量, $\Delta A(\Theta) = [\Delta a_1(\Theta_k), \Delta a_2(\Theta_k), \dots, \Delta a_M(\Theta_k)]^T$, 并有 $(k = 1, 2, \dots, K)$.

至此, 我们推导出天线指向误差对多波束天线阵列流形的影响, 天线指向误差会使得多波束天线的阵列流形 $A(\Theta)$ 加上一个误差分量 $\Delta\bar{A}(\Theta)$, 并且此误差分量由天线指向的误差决定.

3.2 天线指向误差对干扰源定位性能的影响

下面将进一步探讨天线指向误差的存在对利用 MUSIC 算法进行干扰源定位的影响.

由于 $\Delta A(\Theta)$ 的存在, 则阵列协方差矩阵为:

$$\bar{R} = \bar{A}(\Theta) S \bar{A}^H(\Theta) + \sigma^2 I \quad (11)$$

则相应的二维空间谱函数为

$$f(\Theta) = \frac{a^H(\Theta) \bar{E}_n \bar{E}_n^H a(\Theta)}{a^H(\Theta) a(\Theta)} = \text{Tr}(P \bar{E}_n \bar{E}_n^H) \quad (12)$$

式中, 投影矩阵 $P = a(\Theta) [a^H(\Theta) a(\Theta)]^{-1} a^H(\Theta)$. \bar{E}_n 为对多波束阵列天线的阵列协方差矩阵 \bar{R} 进行特征分解得到的噪声子空间.

可以证明, 式(12)中的噪声子空间 \bar{E}_n 与式(3)中的的关系为^[7]:

$$\bar{E}_n = E_n + \Delta E_n \quad (13)$$

以及 $\Delta E_n^H A(\Theta) = -E_n^H \Delta A(\Theta)$ (14)

令 $\bar{\Theta}$ 和 Θ 为通过式(12)和(3)得到的 Θ 的估计值, 且有下式成立

$$\bar{f}(\bar{\Theta}_i) = f'(\Theta) = 0 \quad (15)$$

那么, 天线指向偏差引起的采用 MUSIC 算法进行空间谱估计的误差就可以用 $\bar{\Theta}$ 与 Θ 之间的差值表示.

进一步我们将 $\bar{f}(\bar{\Theta})$ 在 Θ 处泰勒展开, 可以有

$$\bar{f}(\bar{\Theta}_i) = 0 = \bar{f}'(\Theta_i) + \bar{f}''(\Theta_i) (\bar{\Theta}_i - \Theta_i) + \dots \quad (16)$$

由于 $(\bar{\Theta}_i - \Theta_i)$ 为较小值, 故可有近似式^[7]:

$$\bar{f}''(\bar{\Theta}_i) (\bar{\Theta}_i - \Theta_i) \cong \bar{f}''(\Theta_i) (\bar{\Theta}_i - \Theta_i) \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)并进行变形可以得到:

$$\bar{\Theta}_i - \Theta_i \approx - \frac{\bar{f}'(\Theta_i)}{\bar{f}''(\Theta_i)} \quad (18)$$

可以证明^[7]:

$$\bar{f}'(\Theta_i) \approx \frac{2 \text{Re}\{d^H(\Theta_i) E_n \Delta E_n^H A(\Theta_i)\}}{A^H(\Theta_i) A(\Theta_i)} \quad (19)$$

$$\bar{f}''(\Theta_i) = 2 \frac{d^H(\Theta_i) E_n E_n^H d(\Theta_i)}{A^H(\Theta_i) A(\Theta_i)} \quad (20)$$

式中 $d(\Theta_i) = \left. \frac{\partial A(\Theta)}{\partial \Theta} \right|_{\Theta = \Theta_i}$.

将式(13)(14)(19)(20)代入式(18)可以得到:

$$\begin{aligned} \bar{\Theta}_i - \Theta_i &\approx - \frac{\bar{f}'(\Theta_i)}{\bar{f}''(\Theta_i)} = - \frac{\text{Re}\{d^H(\Theta_i) E_n \Delta E_n^H A(\Theta_i)\}}{d^H(\Theta_i) E_n E_n^H d(\Theta_i)} \\ &\approx \frac{\text{Re}\{d^H(\Theta_i) E_n E_n^H \Delta A(\Theta_i)\}}{d^H(\Theta_i) E_n E_n^H d(\Theta_i)} \end{aligned} \quad (21)$$

至此, 我们就可以得到关于天线指向存在误差时, 采用 MUSIC 算法进行 DOA 估计时, 所估计出的值与理想情况下的

估计值的差异, 其上述分析的物理意义在于, 存在天线指向误差时, 我们可以在进行 DOA 估计时, 不考虑指向误差, 而是对直接估计所得估计值进行修正, 此修正值得大小, 是由天线指向误差决定的.

4 计算机仿真

我们利用本文 2.1 节提出的天线结构及其数学模型进行计算机仿真. 仿真中假设所有辐射源均窄带信号且互不相关, 噪声为加性高斯白噪声, 采用 MUSIC 算法进行空间谱估计. 我们在仿真中仅认为天线的指向存在误差, 而其他参数如通道响应一致性等则认为是理想的情况.

图 3 为根据本文 2.1 节假设的一典型信号干扰分布情况下, 采用 MUSIC 算法得到的二维空间谱. 由图可以看出, 在天线指向精确已知的理想情况下, 我们能够通过空间谱估计算法高分辨率的估计得到其期望信号和干扰信号的 DOA 从而精确的界定期望信号和干扰信号的位置.

图 4 和图 5 给出了天线指向存在 0.15 度的误差时采样 MUSIC 算法得到的空间谱. 图 4 没有考虑天线的指向误差, 图 5 考虑了天线的指向误差并采用本文给出的算法进行了修正后得到的空间谱. 由图 4 和图 5 可以对比看出, 在天线存在 0.15 度(波

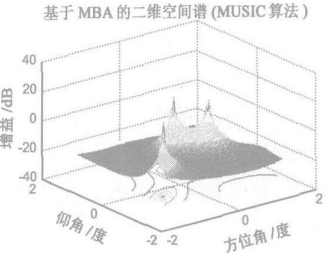


图 3 采用 MUSIC 算法得到的空间谱

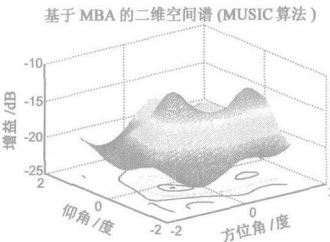


图 4 未考虑天线指向误差 (0.15 度) 时的空间谱

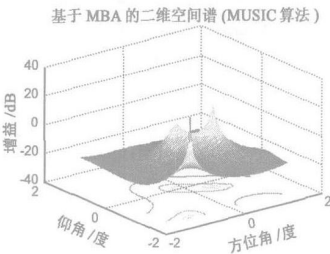


图 5 采用本文算法修正后的空间谱

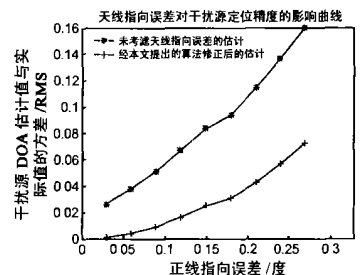


图 6 天线指向误差对空间谱估计精度的影响

瓣宽度的 10%) 时, 如果不考虑天线指向误差, 估计的空间谱峰值模糊, 无法正确得到 DOA 的估计值, 而采用本文提出的修正算法可以极大的提高空间谱估计的分辨率和精度.

图 6 给出了天线指向误差对 MUSIC 算法估计的空间谱的精度(用均方误差表示)的影响曲线, 同时也给出了经本文提出的算法修正以后的空间谱估计精度, 由图中曲线可以看出, 在没有考虑天线指向误差时, 天线指向误差极大的影响 MU-

SIC 算法的空间谱估计精度. 而采用本文提出的算法进行修正后, 其精度能够极大的提高.

5 结论

本文分析了天线指向误差对基于多波束天线的空间谱估计的影响. 通过理论分析得到一般性的结论: 小角度的天线指向误差使得多波束天线的阵列流形加上一个误差分量, 此误差分量由天线的指向误差的大小决定; 小角度的天线指向误差使得基于多波束天线的空间谱估计的性能(如分辨率和精度等)有极大的退化, 甚至无法估计出来波的 DOA; 我们通过理论分析得到一个修正算法, 可以修正天线指向误差给基于多波束天线的空间谱估计的估计结果, 从而降低了天线指向误差对基于星载多波束天线的空间谱估计的影响, 保证其估计的分辨率和精度.

参考文献:

- [1] K Bell, J Capetanakis. Direction of Arrival Estimation Using Superresolution Techniques with Multiple Beam Antennas [A]. International Communication Satellite System Conference [C]. USA: AIAA, 1992. 43 - 52.
- [2] W F Gabriel. Spectral analysis and adaptive array superresolution techniques [J]. Proc IEEE, 1980, 68(5): 654- 666.
- [3] 王华力, 甘仲民. 空间谱估计方法在卫星干扰源定位中的应用 [J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 53- 58.
- [4] 董新海, 王华力, 甘仲民. 应用超分辨率方向估计实现通信卫星干扰源定位 [J]. 电波科学学报, 2001, 16(2): 144- 148.

- [5] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] H Krim, M Viberg. Two decades of array signal processing [J]. IEEE Magazine on SP 1996, 13(4): 67- 94.
- [7] A Swindlehurst, T Kailath. A performance analysis of subspace based Method in the presence of model errors part I the music algorithm [J]. IEEE ASSP, 1990, 38(10): 1740- 1751.
- [8] 奚定平. 贝塞尔函数 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

作者简介:



程安启 男, 1979 年出生于湖北红安, 2002 年毕业于解放军理工大学. 现为解放军理工大学通信工程学院硕士研究生. 目前主要从事卫星通信和智能天线等方面的研究工作. E-mail: chr argel@sohu.com.



王华力 男, 1967 年出生于浙江温岭, 分别于 1993 年和 1997 年在南京理工大学获硕士和博士学位, 1997 年至 1999 年为通信工程学院卫星通信重点实验室博士后, 现为解放军理工大学通信工程学院副教授, 《通信学报》编委, 中国电子学会高级会员, IEEE Member, 目前主要从事卫星通信和智能天线方面的研究工作.