

基于高阶幂的单快拍 LDACS 系统波达方向估计

王磊, 高翔, 胡潇潇, 刘海涛

(中国民航大学 民航航班广域监视与安全管控技术重点实验室, 天津 300300)

摘 要: L 波段数字航空通信系统(L band digital aeronautical communication system, LDACS)是未来航空宽带通信重要的基础设施之一, 针对 LDACS 信号容易受到相邻波道大功率测距仪(distance measuring equipment, DME)信号干扰的问题, 提出了联合正交投影干扰抑制与单快拍稀疏分解的波达方向(direction of arrival, DOA)估计方法。通过子空间投影抑制 DME 干扰, 然后使用单快拍数据构建伪协方差矩阵, 对伪协方差矩阵求高阶幂, 之后进行奇异值分解, 并利用约束条件求解稀疏解得到期望信号来向的估计值。所提方法使用高阶伪协方差矩阵降低了噪声影响, 仅用单快拍就可以准确估计 LDACS 信号的入射方向。仿真结果表明, 改进单快拍高阶幂(improved single snapshot high order power, ISS-HOP) L1-SVD 算法的估计精度优于 ISS-HOP-MUSIC 算法。该方法可以有效抑制 DME 干扰, 提高 OFDM 接收机性能。

关 键 词: L 波段数字航空通信系统; 测距仪; 波达方向估计; 改进单快拍高阶幂算法

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2024)02-0362-06

L 波段数字航空通信系统是国际民航组织路线图着重发展的未来地空数据链系统^[1], 是未来航空宽带通信重要的基础设施之一。此外, LDACS 还可为民航导航和监视提供备份解决方案, 发挥重要作用^[2-3]。在信息安全方面, LDACS 系统引入了危险评级, 提出了可行的网络安全架构和协议, 以减少地空通信消息交换所需的安全开销^[4-6]。针对有限的、碎片化的频谱资源, 文献[7-9]提出了滤波正交频分复用(filtered orthogonal frequency division multiplexing, F-OFDM)、可重构 F-OFDM、可变 F-OFDM 等波形设计方案, 功率谱密度更集中, 降低了带外泄露。测距仪 DME 与 LDACS 系统有部分频段重叠, 因此 LDACS 系统容易受到大功率 DME 信号的干扰, 严重影响 LDACS 系统 OFDM 接收机的性能^[10]。

近年来, 许多研究致力于解决 LDACS 系统中

DME 干扰问题。在时域方面, 文献[11-13]研究了 DME 信号的数学模型, 并提出了脉冲熄灭和限幅等非线性时域滤波方法。随着性能要求的提高, 阵列天线已经应用于地空数据通信系统中, 通过选择不同的阵列可实现更高的信噪比和鲁棒性^[14-15]。在阵列天线空域滤波方面, 文献[16-17]提出使用子空间正交投影抑制 DME 干扰的方法, 并通过盲波束形成将天线方向图的主瓣对准 OFDM 信号来向, 以提高输出信噪比。然而, 考虑到机载平台的机动特性, 可获得的快拍数目有限, 常规的盲波束形成方法和 DOA 估计方法将不再适用。Donoho、Malioutov 和 Candes 等提出了关于稀疏信号采集和恢复的压缩感知理论, 为有限快拍下的 DOA 估计带来了新思路^[18-20]。随着研究的不断深入, 利用单快拍样本间相关性构造伪协方差矩阵的方法也被提出^[21-22], 从而可以在单快拍时估计信号的方向。

针对 LDACS 系统中传统的 DOA 估计方法在单快拍时无法准确估计出 OFDM 信号入射方向的问题, 本文提出一种改进单快拍高阶幂 ISS-HOP 的 DOA 估计方法。首先, 接收机将接收信号矢量投影到干扰信号正交补空间消除 DME 干扰; 之后, 使用单快拍数据构造伪协方差矩阵, 求出伪协方差矩阵

收稿日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2233216)、中国交通教育研究会教育科学研究课题(JT2022YB138)与中国民航大学民航航班广域监视与安全管控技术重点实验室开放基金(202101)资助

作者简介: 王磊(1981—), 副教授

通信作者: 王磊(1981—) e-mail: wanglei@cauc.edu.cn

的高阶幂;最后结合稀疏分解 L1-SVD 算法,实现 OFDM 信号的 DOA 估计。

1 系统模型

本文提出的 LDACS 系统抗干扰接收机框图如图 1 所示。接收机包括阵列天线、干扰抑制、DOA 估计、波束形成、OFDM 解调模块五部分。信号的处理流程为:多个天线通道接收的信号先通过干扰抑制模块进行干扰抑制,然后利用 DOA 估计模块估计出 OFDM 信号来向,在 OFDM 来向上形成主波束,充分利用阵列增益提高输出信噪比,最后送入 OFDM 解调模块,完成信号解调。本文重点关注干扰抑制和 DOA 估计。

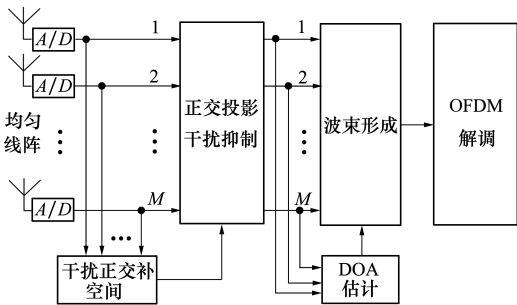


图 1 LDACS 抗干扰接收机

设定机载接收天线为均匀线阵,由 M 个阵元组成。接收信号包括 LDACS 系统的 OFDM 信号和 DME 干扰信号,并且信号来自不同角度,同时入射至均匀线阵,且入射信号和噪声不相关。因此,阵列接收信号矢量可表示为

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{a}(\theta)s(n) + \sum_{k=1}^K \mathbf{d}_k(\theta)\mathbf{j}_k(n) + \mathbf{n}(n) \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 是 OFDM 信号; $\mathbf{a}(\theta)$ 是 OFDM 信号的导向矢量; $\mathbf{j}_k(n)$ 是第 k 个 DME 干扰; $\mathbf{d}_k(\theta)$ 是第 k 个 DME 干扰对应的导向矢量; K 是 DME 干扰的数目; $\mathbf{n}(n)$ 是高斯白噪声。

(1) 式还可以表示为

$$\mathbf{X}(n) = \mathbf{S}(n) + \mathbf{J}(n) + \mathbf{N}(n) \quad (2)$$

2 单快拍下的 DOA 估计方法

2.1 正交投影干扰抑制

考虑到 OFDM 信号、DME 干扰、噪声彼此统计独立,接收信号的协方差矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_{XX} = E\{\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^H(n)\} = \mathbf{R}_S + \mathbf{R}_J + \mathbf{R}_N \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_S$ 是 OFDM 信号的协方差矩阵; $\mathbf{R}_J$ 是 DME 干扰的协方差矩阵; $\mathbf{R}_N$ 是噪声的协方差矩阵。

通过对协方差矩阵 $\mathbf{R}_{XX}$ 进行分解可得

$$\mathbf{R}_{XX} = \sum_{i=1}^K \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H + \sum_{i=K+1}^M \sigma_i^2 \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H = \mathbf{E}_J \mathbf{\Lambda}_J \mathbf{E}_J^H + \mathbf{E}_{s+n} \mathbf{\Lambda}_{s+n} \mathbf{E}_{s+n}^H \quad (4)$$

式中: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{K+1} \geq \sigma_{K+2}^2 \geq \dots \geq \sigma_M^2$ 为协方差矩阵 $\mathbf{R}_{XX}$ 的特征值,并且特征值不为零; $\mathbf{E}_J$ 为干扰子空间, $\mathbf{\Lambda}_J$ 为对应特征值构成的对角矩阵; $\mathbf{E}_{s+n}$ 为 OFDM 信号与噪声子空间, $\mathbf{\Lambda}_{s+n}$ 为对应特征值构成的对角矩阵。由于 DME 干扰的功率相比于 OFDM 信号和噪声大很多,所以 K 个 DME 干扰对应的特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 明显大于其他特征值,其对应的特征向量构成干扰子空间 $\mathbf{U}_J$ 。

通过对空间投影理论的分析,利用干扰子空间得到其正交补空间为

$$\mathbf{U}_J^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{U}_J(\mathbf{U}_J^H \mathbf{U}_J)^{-1} \mathbf{U}_J^H \quad (5)$$

阵列接收到的信号 $\mathbf{X}(n)$ 通过向 $\mathbf{U}_J^\perp$ 投影,能够抑制 DME 干扰,过程为

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{U}_J^\perp \mathbf{X}(n) = \mathbf{U}_J^\perp \mathbf{S}(n) + \mathbf{U}_J^\perp \mathbf{N}(n) \quad (6)$$

阵列接收信号经过正交投影后得到的 $\mathbf{Y}(n)$ 用于 DOA 估计。

2.2 伪协方差矩阵的构造

采用单快拍接收信号并对其进行重新排列,构造出秩与信源数目相等的伪协方差矩阵。构造矩阵的形式可以表示为

$$\mathbf{R}_Z = \bar{\mathbf{A}}(\theta) \mathbf{D} \bar{\mathbf{A}}^H(\theta) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{D}$ 是 $L \times L$ 维满秩矩阵; L 是信号数量; $\bar{\mathbf{A}}(\theta) = [\bar{\mathbf{a}}(\theta_1), \bar{\mathbf{a}}(\theta_2), \dots, \bar{\mathbf{a}}(\theta_L)]$ 是 $M \times L$ 维阵列流型矩阵。 $\bar{\mathbf{a}}(\theta_l)$ 中第 p 个元素可表示为 $e^{j[\varphi_l + (p-1)\Delta\varphi_l]}$, 其中 $\Delta\varphi_l = (2\pi d/\lambda) \sin\theta_l$ 。为确保伪协方差矩阵的秩与信源数目相等,需要满足 $M > L$, 则构造的伪协方差矩阵 $\mathbf{R}_Z$ 的维度为 $M \times M$ 。

矩阵 $\mathbf{R}_Z$ 的元素 $R_Z(p, q)$ 可表示为

$$R_Z(p, q) = \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^L e^{j[\varphi_m + (p-1)\Delta\varphi_m]} e^{-j[\varphi_n + (q-1)\Delta\varphi_n]} d_{mn}, \quad p, q = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

式中, d_{mn} 为矩阵 $\mathbf{D}$ 的元素。

当矩阵 $\mathbf{D}$ 为对角阵,且对角线上的元素非 0,即 $m = n$ 时,矩阵 $\mathbf{D}$ 是满秩的, (8) 式可表示为

$$R_Z(p, q) = \sum_{m=1}^L e^{j[\varphi_m + (p-q)\Delta\varphi_m]} d_{mm},$$

$$p,q=1,2,\cdots M \tag{9}$$

进而伪协方差矩阵 $\mathbf{R}_Z$ 的秩为 L , 可以表示为 $\mathbf{R}_Z = \overline{\mathbf{A}}(\theta)\mathbf{D}\overline{\mathbf{A}}^H(\theta)$ 。

在(9) 式基础上,令 $\varphi_m = 0, d_{mm} = s_m$, 则伪协方差矩阵可表示为^[21]

$$\mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} y_1 & y_2^* & \cdots & y_M^* \\ y_2 & y_1 & \cdots & y_{M-1}^* \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_M & y_{M-1} & \cdots & y_1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

2.3 ISS-HOP 方法

根据第 2.1 节内容可知,经过正交投影后的阵列接收信号仅包含 OFDM 信号和噪声,并且 OFDM 信号的特征值大于噪声的特征值。

通过(10)式得到伪协方差矩阵,分为两部分 $\mathbf{R}_Z = \mathbf{R}'_S + \mathbf{R}'_N \tag{11}$

对(11)式进行特征值分解得 $\mathbf{R}_Z = \mathbf{E}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{E}_n^H \tag{12}$

对(12)式求 m 次高阶幂,可以得到 $\mathbf{R}_Z^m = \mathbf{E}_s \mathbf{\Lambda}_s^m \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{\Lambda}_n^m \mathbf{E}_n^H = \mathbf{E}_s \mathbf{\Sigma}_s \mathbf{E}_s^H + \mathbf{E}_n \mathbf{\Sigma}_n \mathbf{E}_n^H \tag{13}$

(13)式中的对角阵 $\mathbf{\Sigma}_s = \text{diag}(\lambda_1^m, \lambda_2^m, \cdots, \lambda_L^m)$, $\mathbf{\Sigma}_n = \text{diag}(\sigma_{L+1}^{2m}, \sigma_{L+2}^{2m}, \cdots, \sigma_M^{2m})$, 其中 L 是 OFDM 信号个数。因为 LDACS 系统使用蜂窝网络通信,在每个单元区域内通常只有一个 OFDM 信号,所以取 $L=1$ 。

因此通过高阶幂的计算, $\lambda_1^m \gg \sigma_2^{2m} \geq \cdots \geq \sigma_M^{2m}$, 在 m 趋于无穷大时, (13) 式最后一项变为无穷小, 可忽略不计, 则(13) 式可表示为

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \mathbf{R}_Z^m = \mathbf{E}_s \mathbf{\Sigma}_s \mathbf{E}_s^H \tag{14}$$

在实际情况下,参数 m 无需取极限值,绝大多数情况下取有限整数就能满足需求。

为了单快拍时能够准确估计出 OFDM 信号的入射方向,构造出高阶伪协方差矩阵代替常规协方差矩阵,然后利用稀疏分解 L1-SVD 方法估计信号的波达方向。具体的步骤为:

- 步骤 1 利用(10)式获得伪协方差矩阵 $\mathbf{R}_Z$;
- 步骤 2 对伪协方差矩阵求 m 次幂得到高阶伪协方差矩阵 $\mathbf{R}_Z^m$;
- 步骤 3 对伪协方差矩阵的高阶幂 $\mathbf{R}_Z^m$ 进行奇异值分解;
- 步骤 4 扩展方向向量,构建冗余字典,并建立稀疏模型;

步骤 5 针对稀疏模型,采用二阶锥规划方法求最优解。

3 验证与分析

3.1 仿真参数设置

根据 LDACS 系统技术规范^[23],设计 LDACS 仿真系统实现基于高阶幂的单快拍 DOA 估计。表 1 所示为 LDACS 系统的仿真技术参数。

表 1 LDACS 系统的仿真技术参数

参数	数值
LDACS 系统载波频率/kHz	500
传输带宽/kHz	498.05
FFT 长度	64
子载波间距/kHz	9.765 625
采样间隔/ μ s	0.4
循环前缀时间/ μ s	17.6
有效符号时间/ μ s	102.4
OFDM 符号周期/ μ s	120
有效子载波个数	50
信道编码	RS+卷积编码
调制方式	QPSK
DME 载波偏移量/kHz	500

其他的实验参数设置为:阵列天线采用均匀线阵,阵元数目为 16 个,相邻 2 个阵元间距为信号半波长;OFDM 信号来向设置为 10° , DME 干扰信号来向为 30° , 噪声为加性高斯白噪声;信噪比和信干比设置分别为 10 dB 和 -10 dB。

实验中为了衡量 DOA 估计的准确程度,引入均方根误差(RMSE),计算方法为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{K} \frac{1}{N_{\text{MC}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{MC}}} \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_i^k - \theta_i^k)^2} \tag{15}$$

式中: K 表示信号个数; N_{MC} 表示蒙特卡洛实验的仿真次数; $\hat{\theta}_i^k$ 表示第 i 次蒙特卡洛实验中第 k 个信号的 DOA 估计角度; θ_i^k 表示第 i 次蒙特卡洛实验中第 k 个信号的真实角度。

3.2 仿真实验与分析

在实验过程中,除了本文提到的稀疏分解 L1-SVD 方法,还使用了 MUSIC 算法进行对比实验。图 2 显示了在单快拍情况下,4 种 DOA 估计方法的空间谱结果。可以看出,正交投影抑制 DME 干扰后的接收信号,使用常规 MUSIC 算法和 L1-SVD 算法,空间谱杂乱,无法准确分辨出目标角度。而构造伪协

方差矩阵并进行高阶幂运算,即 ISS-HOP 算法,所得到的空间谱尖锐,只有一个峰值,对应 OFDM 信号的入射方向。这表明单快拍情况下,ISS-HOP 算法具有可行性,能够准确估计期望信号来向,而且本文提出的 ISS-HOP-L1-SVD 算法谱峰更尖锐,分辨性能更好。

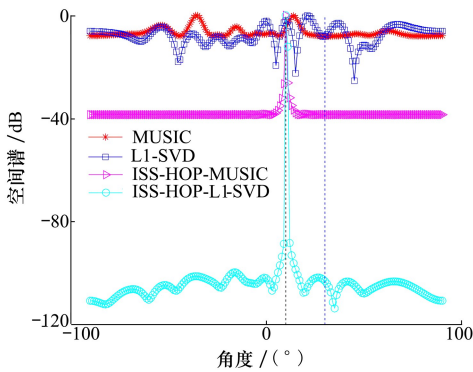


图 2 单快拍情况下的空间谱

图 3 显示多快拍情况下,常规 DOA 估计的空间谱结果。设置快拍数为 200,信号来向等其他设置不变。可以看出,利用正交投影抑制掉 DME 干扰后,MUSIC 算法和稀疏分解 L1-SVD 算法的空间谱只有 1 个峰值,且峰值对应的角度即为 OFDM 信号的入射方向。

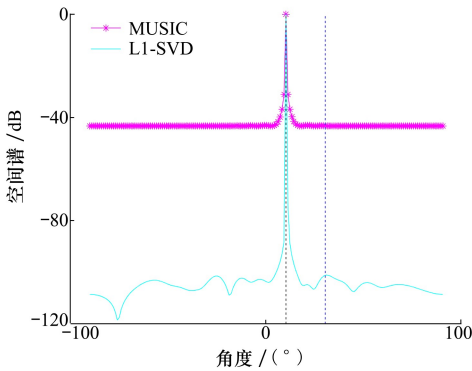


图 3 多快拍情况下的空间谱

为了进一步探究快拍数对 DOA 估计误差性能的影响,将接收信号的快拍数范围设置为 20~150,步长为 10,并进行 300 次蒙特卡洛实验。图 4 显示了 2 种算法的均方根误差随快拍数变化情况,从仿真结果中可以看出,随着快拍数的增加,估计误差逐渐减小,当快拍数增加到 80 之后,2 种方法的估计误差能够保持在较低的水平,并趋向于 0。这表明只有在快拍数较多时常规的 DOA 估计算法才具有

良好的估计性能。

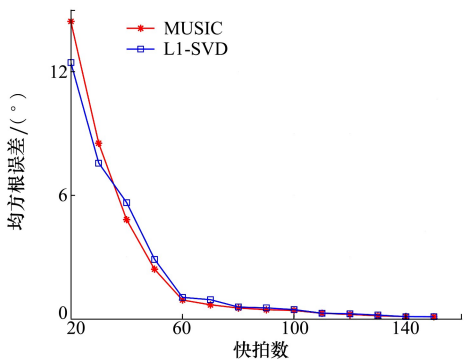


图 4 不同快拍数情况下的 RMSE 性能

为研究基于高阶幂的单快拍 DOA 估计算法性能,将快拍数设置为单快拍,在信噪比从 -5~5 dB 以 1 dB 间隔变化的条件下,进行 300 次蒙特卡洛仿真实验。图 5 的实验结果显示,无高阶幂运算的 ISS 算法和有高阶幂运算的 ISS-HOP 算法的均方根误差随着 SNR 的增加呈现下降趋势,并在 3 dB 左右接近于零,但 ISS-HOP 算法通过对伪协方差矩阵进行高阶幂运算,能够减小噪声的影响,因此其信噪比适应能力比 ISS 算法更好。4 种算法中,ISS-HOP-L1-SVD 算法的 RMSE 最小,当信噪比为 0 dB 时,均方根误差小于 1°,估计性能比其他的 3 种方法更好。

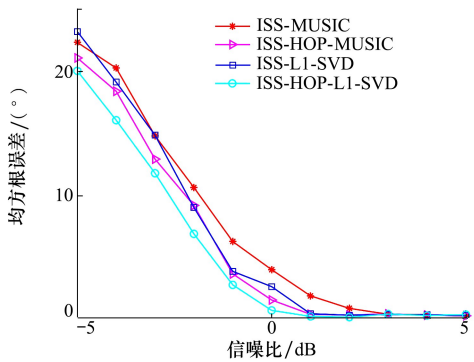


图 5 不同信噪比情况下的 RMSE 性能

4 结 论

针对 DME 信号对 LDACS 系统造成干扰,导致 OFDM 接收机性能受到严重影响的问题,本文提出了一种基于高阶幂的单快拍 LDACS 系统信号来向估计方法。首先 OFDM 接收机通过子空间投影方

法得到干扰信号的正交补空间,抑制 DME 信号获得无干扰数据,然后在 DOA 估计器中,利用单快拍数据构建伪协方差矩阵并进行高阶幂运算,最后结合稀疏分解特性形成 ISS-HOP-L1-SVD 算法,在单快拍情况下实现准确的 DOA 估计。本方法能够解决常规 DOA 估计方法在单快拍下失效的问题,使用高阶伪协方差矩阵不仅确保了较好的估计效果,同时

还降低了噪声影响,减小估计误差。在仿真实验中,ISS-HOP-L1-SVD 算法的误差性能要优于 ISS-HOP-MUSIC 算法。实验结果表明,所提出的方法可以有效地消除 LDACS 系统中的 DME 干扰,提高系统的性能和可靠性。在未来的研究中,可以进一步探索其他单快拍算法在该问题上的应用,以提高 DOA 估计的性能。

参考文献:

- [1] SCHNELL M, EPPL U, SHUTIN D, et al. LDACS: future aeronautical communications for air-traffic management[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 104-110
- [2] BATTISTA G, KUMAR R, NOSSEK E, et al. Placing LDACS-based ranging sources for robust RNP 1.0 accuracy en-route[C]//IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference, St.Petersburg, USA, 2017
- [3] FILIP-DHAUBHADEL A, SHUTIN D. LDACS-based non-cooperative surveillance multistatic radar design and detection coverage assessment[C]//IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference, San Diego, USA, 2019
- [4] MÄURER N. Paving the way for an IT security architecture for LDACS: a datalink security threat-and risk analysis[C]//Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference, Herndon, USA, 2018
- [5] MÄURER N, GRÄUPL T, SCHMITT C. Evaluation of the LDACS Cybersecurity Implementation[C]//IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference, San Diego, USA, 2019
- [6] EWERT T, MÄURER N, GRÄUPL T. Improving usable LDACS data rate via certificate validity optimization[C]//Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference, Dulles, USA, 2022
- [7] ABD-ELATY E, EL-AGOOZ S, ZEKRY A. Compact spread spectrum LDACS wavelet based for DME interference mitigation[C]//National Radio Science Conference, Port Said, Egypt, 2019
- [8] AGRAWAL N, AMBEDE A, DARAK S J, et al. Design and implementation of low complexity reconfigurable filtered-OFDM-based LDACS[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(7): 2399-2403
- [9] ROY S, CHANDRA A. On the design of variable Filtered-OFDM based LDACS for future generation air-to-ground communication system[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(2): 644-648
- [10] FANTAPPIE P. L-DACS spectral efficiency[C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, Herndon, USA, 2019
- [11] EPPL U, BRANDES S, GLIGOREVIC S, et al. Receiver optimization for L-DACS1[C]//IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference, Orlando, USA, 2009
- [12] EPPL U, SHUTIN D, SCHNELL M. Mitigation of impulsive frequency-selective interference in OFDM based systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(5): 484-487
- [13] EPPL U, SCHNELL M. Adaptive threshold optimization for a blanking nonlinearity in ofdm receivers[C]//Global Communications Conference, Anaheim, USA, 2012
- [14] RAO S, PANDYA A, OSTROOT C. Phased array antennas for aircraft applications[C]//IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation, Hyderabad, India, 2018
- [15] GÜRBÜZ A, MIELKE D M, BELLIDO-MANGANELL M A. On the Application of beamforming in LDACS[C]//Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference, Dulles, USA, 2022
- [16] 王磊, 李广雪, 李冬霞, 等. 基于 OFDM 符号特征的干扰抑制与盲波束形成方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1397-1402
WANG Lei, LI Guangxue, LI Dongxia, et al. Interference suppression and blind beamforming based on OFDM symbol characteristic[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1397-1402 (in Chinese)
- [17] 王磊, 孙海霞, 刘明莉, 等. 基于信号特性的宽带航空数据链信号来向估计方法[J]. 信号处理, 2022, 38(7): 1458-1466
WANG Lei, SUN Haixia, LIU Mingli, et al. Signal direction estimation method for wideband aeronautical data link system based on signal characteristics[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(7): 1458-1466 (in Chinese)
- [18] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306
- [19] MALIOUTOV D, CETIN M, WILLISKY A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays

[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(8): 3010-3022

[20] CANDES E J, ROMBERG J K, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(8): 1207-1223

[21] 谢鑫, 李国林, 刘华文. 采用单次快拍数据实现相干信号 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 604-608
XIE Xin, LI Guolin, LIU Wenhua. DOA estimation of coherent signals using one snapshot[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 604-608 (in Chinese)

[22] 蒋柏峰, 吕晓德, 向茂生. 一种基于阵列接收信号重排的单快拍 DOA 估计方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1334-1339
JIANG Baifeng, LYU Xiaode, XIANG Maosheng. Single snapshot DOA estimation method based on rearrangement of array receiving signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(6): 1334-1339 (in Chinese)

[23] EUROCONTROL. PJ.14-W2-60 TRL6 Final LDACS A/G Specification[EB/OL]. (2023-03-10) [2023-04-08]. https://www.ldacs.com/wp-content/uploads/2023/03/SESAR2020_PJ14-W2-60_TRL6_D3_1_230_3rd_LDACS_AG_Specification_v1.0.0.pdf

Single snapshot DOA estimation algorithm based on high-order power in LDACS

WANG Lei, GAO Xiang, HU Xiaoxiao, LIU Haitao

(CAAC Key Laboratory of Civil Aviation Wide Surveillance and Safety Operation Management & Control Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The L-band digital aeronautical communication system (LDACS) is one of the essential infrastructures for future aviation broadband communication. To address the problem of interference from adjacent high-power distance measuring equipment (DME) signals, a joint orthogonal projection interference suppression and single-snapshot sparse decomposition direction of arrival (DOA) estimation method is proposed. Firstly, the DME interference is suppressed by using the subspace projection, and then a pseudo-covariance matrix is constructed by using single-snapshot data. High-order power of the pseudo-covariance matrix is calculated, followed by singular value decomposition and sparse solution obtained using constraints to estimate the desired target. The proposed method in this paper reduces the impact of noise by utilizing high-order pseudo-covariance matrix, enabling accurate estimation of the DOA of OFDM signals with only a single snapshot. Simulation results show that the estimation accuracy by using ISS-HOP-L1-SVD algorithm is better than that via ISS-HOP-MUSIC algorithm. This method can effectively suppress DME interference and improve the performance of the OFDM receiver.

Keywords: L-band digital aeronautical communication system(LDACS); distance measuring equipment(DME); direction of arrival(DOA) estimation; improved single snapshot high order power(ISS-HOP) algorithm

引用格式:王磊, 高翔, 胡潇潇, 等. 基于高阶幂的单快拍 LDACS 系统波达方向估计[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(2): 362-367

WANG Lei, GAO Xiang, HU Xiaoxiao, et al. Single snapshot DOA estimation algorithm based on high-order power in LDACS[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(2): 362-367 (in Chinese)