

基于时空联合估计噪声子空间的 MUSIC 波束形成方法

王思秀¹ 郭文强¹ 汪晓洁^{1,2} 张传朋³

1 新疆财经大学网络空间安全学院 乌鲁木齐 830012

2 新疆大学信息科学与工程学院 乌鲁木齐 830011

3 中国科学院 FAST 重点实验室 北京 100101

(wsx20050315@163.com)

摘要 针对在宽带短脉冲情况下频域 MUSIC 波束形成过程中噪声子空间估计不稳定的问题,提出了一种基于时空联合估计噪声子空间的 MUSIC 波束形成方法。该方法首先对线列阵接收数据构造时域复解析数据;然后根据增广数据构造方法和空间滑动的方法,在时域数据长度更短的情况下,稳定实现噪声子空间估计;最后根据估计出的噪声子空间含有的正交特性,通过单位矩阵与噪声特征向量相乘来得到相应波束。数值仿真和实测数据处理结果表明,相比频域 MUSIC 波束形成方法,该方法减少了稳定获取噪声子空间所需的快拍数,具有较好的稳定性和检测性能,提高了 MUSIC 波束形成在实际应用中的鲁棒性。

关键词: MUSIC 波束形成;宽带短脉冲;时域复解析;时空联合估计

中图分类号 TN911.7;TP391

MUSIC Beam-forming Method Based on Temporal and Spatial Union Estimation of Noise Subspaces

WANG Si-xiu¹, GUO Wen-qiang¹, WANG Xiao-jie^{1,2} and ZHANG Chuan-peng³

1 School of Cyber Science and Engineering, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China

2 College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, China

3 Key Laboratory of Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract Under the case of broadband short pulse, for the instability problem of noise subspaces estimation in frequency domain MUSIC beam-forming, a MUSIC beam-forming method based on temporal and spatial union estimation of noise subspaces is proposed. Firstly, this method constructs the complex analytic data for liner array receiving data in time domain. Then, according to the construction method of time domain augmented data and the spatial sliding motion method, this method stably realizes noise subspaces estimation with shorter data length. Lastly, based on the orthogonal property of noise subspaces, this method obtains the corresponding beam via identity matrix and noise eigenvector. The numerical simulation and measured data processing results show that, compared with the frequency domain MUSIC beam-forming, the new approach reduces the number of snapshots for stably obtaining noise subspace, has better stability and detection performance, and improves the robustness of MUSIC beam-forming in the practical application.

Keywords MUSIC beam-forming, Broadband short pulse, Time domain complex analytics, Temporal and spatial union estimation

近年来,具有高分辨能力的 MUSIC 波束形成方法在声纳、雷达和通讯等领域得到了广泛的应用^[1-7]。为了降低信源数目对 MUSIC 波束形成在实际应用过程中的影响,研究者提出了不需要预估信号源数目的改进的 MUSIC 算法^[1-2];为了改善 MUSIC 算法对相干信源方向估计效果不好的问题,研究者提出了类对角加载技术的改进的 MUSIC 算法^[3];为了改善 MUSIC 算法在实际应用中的实现过程,研究者进一

步提出了波束域 MUSIC 实现方法^[4]、L 型阵列多输入多输出降维 DOA 估计 MUSIC 算法^[5]和任意阵列半实值 MUSIC 的发射角和接收角联合估计算法^[6,8]。以上研究成果在一定程度上改善了 MUSIC 波束形成在实际应用过程中的鲁棒性,并进一步扩展了 MUSIC 波束形成在实际应用中的实现过程,但上述研究的实现过程均是在某一个变换域(频域或波束域)中进行操作的,因此在宽带短脉冲的情况下,还存在噪

到稿日期:2020-03-04 返修日期:2020-05-22 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(11703040);新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2017S036, XJEDU2019Y036)

This work was supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(11703040) and Scientific Research Program in Universities of Xinjiang Uygur Autonomous Region(XJEDU2017S036, XJEDU2019Y036).

通信作者:郭文强(www20050315@126.com)

声子空间估计不稳定的问题。

由于在频域和波束域中实现 MUSIC 波束形成需要对接收数据进行分块处理,对接收数据平稳性要求较高,使得频域和波束域 MUSIC 波束形成的宽容性较差^[9-11],主要表现在:在协方差矩阵估计中,需要多个快拍数据进行累积实现,但在有效数据较短或目标信号变化较快时,若采用多个快拍数据进行累积,则很难实现协方差矩阵的有效估计。虽然有研究者提出采用对角加载等技术来提高协方差矩阵的稳定性,以得到具有正交特性的噪声子空间,但该过程会导致对角加载量抉择的问题,对实际应用带来一定的限制。

为了进一步提高 MUSIC 波束形成在实际应用中的宽容性,解决在宽带短脉冲情况下 MUSIC 波束形成过程中噪声子空间估计不稳定的问题,本文结合时域解析信号构造方法和直接数据域空间滑动的方法,提出了一种基于时空联合估计噪声子空间的 MUSIC 波束形成方法,称之为 TSMUSIC 波束形成方法。

1 频域 MUSIC 波束形成方法

在频域 MUSIC 波束形成实现过程中,首先假设噪声和目标信号相互独立,对多个快拍数据估计所得的协方差矩阵 \mathbf{R}_x 进行特征分解;然后根据目标信源数目得到噪声子空间对应的特征向量 \mathbf{U}_v ;最后利用 \mathbf{U}_v 来实现对搜索角度 θ 对应的空间谱估计^[12],得到空间谱估计值,如式(1)所示。

$$\mathbf{P}_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{W}(\theta)(\mathbf{U}_v \mathbf{U}_v^H) \mathbf{W}(\theta)^H} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{W}(\theta) = [e^{j2\pi f \tau_1}, e^{j2\pi f \tau_2}, \dots, e^{j2\pi f \tau_N}]$ 为搜索角度 θ 对应的导向权向量。 $\tau_n = (n-1)d \cos(\theta)/c$, c 为介质声速, d 为相邻传感器间距, $1 \leq n \leq N$ 为传感器编号。

由式(1)输出空间谱的过程可知,实现频域 MUSIC 波束形成方法应该满足^[13-14]以下条件:噪声和目标信号相互独立,即噪声和目标信号相关成份对协方差矩阵 \mathbf{R}_x 的贡献量为 0;协方差矩阵 \mathbf{R}_x 的秩等于传感器数 N ;搜索角度对应的 θ 导向权向量 $\mathbf{W}(\theta)$ 为复数,以便获得与目标信号方位角正交的噪声子空间。

为了进一步阐明协方差矩阵所需的快拍数据,令一个快拍数据为一次时频变换所需要的数据,则记该数据对应的时间长为 ΔT 。

在频域 MUSIC 波束形成实现过程中,首先对处理数据进行一次分 K (该数据一般是线列阵所含传感器数 N 的两倍^[15-16]) 拍处理,并对每一个快拍数据进行时频变换处理;然后在频域对第 k 个快拍所得第 i 个子带对应的 f_i 频率数据进行互谱操作,得到第 k 个快拍在第 i 个子带对应的协方差矩阵估计值 $\mathbf{R}_x^k(f_i)$;最后对 K 个快拍数据所得的 $\mathbf{R}_x^k(f_i)$ 进行累积,得到第 i 个子带对应的协方差矩阵估计值 $\hat{\mathbf{R}}_x(f_i)$,如式(2)所示:

$$\hat{\mathbf{R}}_x(f_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{R}_x^k(f_i) \quad (2)$$

其中,在求取 $\mathbf{R}_x^k(f_i)$ 时,由于相邻快拍数据可按快拍数据长度的 $1/2$ 重叠使用,一次处理数据对应的时间长度为 $T_0 = K \times \Delta T / 2$ 。

对第 i 个子带对应的协方差矩阵估计值 $\hat{\mathbf{R}}_x(f_i)$ 进行特征分解,并根据目标信源数目得到的噪声子空间对应的特征向量 \mathbf{U}_v 实现对搜索角度 θ 对应的空间谱估计。

在上述实现过程中, K 个协方差矩阵估计值 $\hat{\mathbf{R}}_x(f_i)$ 的累积可以使噪声和目标信号相关成份贡献量为 0 的条件得到满足,并使 $\hat{\mathbf{R}}_x(f_i)$ 的秩等于传感器数 N ;因为时频变换使第 i 个子带对应的数据为复数,所以搜索角度 θ 对应的导向权向量也为复数。然而,当目标信号长度小于 T_0 时, MUSIC 波束形成对目标方位角的估计性能会变差。

2 基于时空联合估计噪声子空间的 MUSIC 波束形成方法

2.1 基本原理

令在时刻 t , 线列阵各传感器拾取数据为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \\ &= [s_1(t) + v_1(t), x_2(t) + v_2(t), \dots, x_N(t) + v_N(t)]^T \\ &= \mathbf{S} + \mathbf{V} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{S} = [s_1(t), \dots, s_N(t)]^T$ 为线列阵各传感器拾取数据所含的目标信号, $\mathbf{V} = [v_1(t), \dots, v_N(t)]^T$ 为线列阵各传感器拾取数据所含各向同性高斯白噪声与干扰之和的数据。

对式(3)做希尔伯特变换,可得:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{X}} &= H[\mathbf{X}] \\ &= H[\mathbf{S}] + H[\mathbf{V}] \\ &= \bar{\mathbf{S}} + \bar{\mathbf{V}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $H[\cdot]$ 为希尔伯特变换函数。

根据希尔伯特变换结果,对线列阵各传感器拾取数据构造时域复解析数据 \mathbf{Y} , 如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{Y}_s + \mathbf{Y}_v \\ &= \mathbf{X} + j \cdot \bar{\mathbf{X}} \\ &= |\mathbf{X}| \cdot \exp(j\boldsymbol{\varphi}_0) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $|\mathbf{X}|$ 和 $\boldsymbol{\varphi}_0$ 分别为 \mathbf{Y} 所包含的幅度和相位, $\boldsymbol{\varphi}_0 = \text{atan}(\text{im}[\mathbf{X}]/\text{re}[\mathbf{X}])$, $\text{im}[\cdot]$ 为虚部提取函数, $\text{re}[\cdot]$ 为实部提取函数。

在搜索角度 θ 时,按时延 τ_n ($1 \leq n \leq N$) 对 \mathbf{Y} 中各传感器复解析数据进行延时补偿。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Y}} &= \mathbf{Y}_s(t + \tau_n) + \mathbf{Y}_v(t + \tau_n) \\ &= \mathbf{X}(t + \tau_n) + j \cdot \bar{\mathbf{X}}(t + \tau_n) \\ &= |\mathbf{X}(t)| \cdot \exp(j(\boldsymbol{\varphi}_1 + \boldsymbol{\varphi}_n)) \\ &= |\mathbf{X}(t)| \cdot \exp(j\boldsymbol{\varphi}_1) \cdot \exp(j\boldsymbol{\varphi}_n) \\ &= \mathbf{Y} \cdot \exp(j\boldsymbol{\varphi}_n) \\ &= \mathbf{Y} \cdot \mathbf{W}_\tau \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\boldsymbol{\varphi}_n = [\varphi_{n1}, \dots, \varphi_{nN}]^T$, $\mathbf{W}_\tau = \exp(j\boldsymbol{\varphi}_n)$, $\tau_n = (n-1)d \cos(\theta)/c$, $1 \leq n \leq N$ 。

由 $\hat{\mathbf{Y}}$ 分解形式可知,各传感器复解析数据的延时补偿形式等同于其复数域中的相移形式,即通过延时形式来补偿目标信号方位引起的各传感器数据相位差,并在时域协方差矩阵 $\mathbf{R}_{\hat{\mathbf{Y}}}$ ($\mathbf{R}_{\hat{\mathbf{Y}}} = E[\hat{\mathbf{Y}} \hat{\mathbf{Y}}^H]$, $E[\cdot]$ 为期望函数)估计中提前对目标信号方位引起的各传感器数据不一致性进行了补偿。

2.2 增广数据构造

为了充分利用线列阵各传感器来拾取数据,根据线列阵各传感器拾取数据协方差矩阵的 Toeplitz 矩阵特性^[3],按式(7)对线列阵复解析数据进行增广数据构造,可进一步提高 TSMUSIC 波束形成方法对最低信噪比的需求,提高噪声的抑制能力。

$$\hat{z}_n(t) = [\hat{y}_n(t), \hat{y}_{N-n+1}^*(t)] \quad (7)$$

其中, $(\cdot)^*$ 为共轭函数, $\hat{y}_n = \hat{\mathbf{Y}}(n, t), 1 \leq n \leq N$ 。

相比协方差矩阵 \mathbf{R}_Z , 对由增广数据构造的数据矩阵 $\hat{\mathbf{Z}} = [\hat{z}_1(t), \dots, \hat{z}_N(t)]^T$ 所得的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_Z = E[\hat{\mathbf{Z}} \hat{\mathbf{Z}}^H]$ 进行了一次累积,因此提高了 TSMUSIC 波束形成方法的噪声抑制能力。

2.3 TSMUSIC 波束形成实现

在一次快拍时间内,为了进一步降低协方差矩阵估计时域数据长度的需求,本文参考了直接数据域空间滑动方法^[17-19],利用协方差矩阵在空间上的相关性对其进行累积,使协方差矩阵所含元素数由 $N \times N$ 降低为 $N/2 \times N/2$,进而使协方差矩阵对应的秩由 N 降低为 $N/2$ 。按式(8)可进一步降低稳定获取协方差矩阵估计值对有效数据或目标信号变化的要求。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_Z &= \sum_{i=1}^{N/2+1} \mathbf{R}_{Z,i} \\ &= \sum_{i=1}^{N/2+1} E[[\hat{z}_i(t), \hat{z}_{i+1}(t), \dots, \hat{z}_{i+N/2-1}(t)]^H \cdot [\hat{z}_i(t), \\ &\quad \hat{z}_{i+1}(t), \dots, \hat{z}_{i+N/2-1}(t)]] \end{aligned} \quad (8)$$

由上述过程可知, $\hat{\mathbf{R}}_Z$ 的求解过程包含时间和空间两个部分。在时域处理中,单个采样点可作为一个快拍数据,在短时内获得足够多的快拍数;在空间处理中,使协方差矩阵的秩由 N 降低为 $N/2$,进一步降低了稳定获取协方差矩阵估计值和噪声子空间所需的有效数据量。

对协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_Z$ 进行特征分解,得:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_Z &= \sum_{n=1}^N \hat{\lambda}_n \hat{u}_n \hat{u}_n^H \\ &= \hat{\mathbf{U}} \hat{\mathbf{\Lambda}} \hat{\mathbf{U}}^H \\ &= \hat{\mathbf{U}}_{us} \hat{\mathbf{\Lambda}}_{us} \hat{\mathbf{U}}_{us}^H + \hat{\mathbf{U}}_{vw} \hat{\mathbf{\Lambda}}_{vw} \hat{\mathbf{U}}_{vw}^H \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\hat{\mathbf{\Lambda}} = \text{diag}(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \dots, \hat{\lambda}_N)$ 和 $\hat{\mathbf{U}} = [\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_N]$ 分别为分解所得特征值和特征向量, $\hat{\mathbf{U}}_{us}$ 和 $\hat{\mathbf{U}}_{vw}$ 分别为分解所得信号特征向量和噪声特征向量, $\bar{\mathbf{U}}_{vw} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{W}_v \mathbf{U}_v$, \mathbf{U}_v 为未延时补偿所得的噪声特征向量, $\mathbf{\Gamma}$ 为一复权向量。

假设 $\text{Span}[\hat{\mathbf{U}}_{us}]$ 和 $\text{Span}[\hat{\mathbf{U}}_{vw}]$ 分别为信号子空间和噪声子空间。此时, $\text{Span}[\hat{\mathbf{U}}_{us}] \perp \text{Span}[\hat{\mathbf{U}}_{vw}]$, 当搜索角度 θ 与目标信号方位角一致时, $\text{Span}[\mathbf{U}_v] \perp \text{Span}[\mathbf{W}_v]$ 利用 \mathbf{U}_v 与 \mathbf{W}_v 的正交性可得到 TSMUSIC 波束形成在搜索角度 θ 上的空间谱估计值,如式(10)所示:

$$\mathbf{P}^{\text{TSMUSIC}}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{I}_{1 \times N} (\hat{\mathbf{U}}_{vw} \hat{\mathbf{U}}_{vw}^H) \mathbf{I}_{1 \times N}^H} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{I}_{1 \times N} = [1, \dots, 1]_{1 \times N}$ 为 $1 \times N$ 维单位矩阵。

该方法充分利用了时间和空间这两部分运算,降低了稳定获取协方差矩阵估计值所需的快拍数,即在短时间内稳定

求取与目标信号方位角对应导向向量正交的噪声子空间。TSMUSIC 波束形成算法的具体步骤如算法 1 所示。

算法 1

输入: N 元线列阵在时刻 t 拾取的数据,即式(3)

输出: TSMUSIC 波束形成搜索角度 θ 上的空间谱估计值,即式(10)

步骤 1 根据线列阵在时刻 t 拾取 N 元传感器数据 \mathbf{X} ,由式(4)和式(5)在时域构造复解析数据 \mathbf{Y} ;

步骤 2 在搜索角度 θ 上,按式(6)对 \mathbf{Y} 中各传感器复解析数据进行延时补偿;

步骤 3 按式(7)对延时补偿后的复解析数据 $\hat{\mathbf{Y}}$ 构造增广数据构造,得到数据矩阵 $\hat{\mathbf{Z}}$;

步骤 4 按式(8)求解协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_Z$,进一步降低稳定获取协方差矩阵估计值和噪声子空间所需的快拍数;

步骤 5 按式(9)对协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_Z$ 进行特征分解;

步骤 6 由目标信号源确定噪声子空间对应特征向量 $\hat{\mathbf{U}}_{vw}$;

步骤 7 利用特征向量 $\hat{\mathbf{U}}_{vw}$ 中 \mathbf{U}_v 与 \mathbf{W}_v 的正交性,按式(10)得到 TSMUSIC 波束形成在搜索角度 θ 上的空间谱估计值。

3 数据的处理分析

3.1 数值仿真分析

为了进一步验证 TSMUSIC 波束形成对短脉冲信号的检测性能的影响,本文对 TSMUSIC 波束形成进行了数值仿真分析。数值仿真平台为 3.2 GHz 处理器、4GRAM 的 64 位 PC 机;仿真环境为 Windows7 旗舰版操作系统下的 Matlab-R2018b。

3.1.1 单目标情况

仿真条件如下:线列阵为 64 元的等间隔水平阵,相邻传感器间距为 0.5 m,采样率为 20 kHz,一次拾取数据长度为 1 s。目标信号相对线列阵方位角为 90° ,目标信号为带宽为 1.2~1.8 kHz 的宽带调频脉冲信号,长度为 0.02 s,与噪声谱级比为 SLR,噪声为加性高斯白噪声。一次处理数据长度为 1 s,频域 MUSIC 波束形成被分成 600 个子带进行空间谱估计,单个子带的协方差矩阵估计由 100 个快拍实现;TSMUSIC 波束形成通过带通滤波器选取 1.2~1.8 kHz 的频段,协方差矩阵估计由 1 个快拍实现。

图 1 给出了在 SLR = -20 dB 的情况下,由频域 MUSIC 波束形成与 TSMUSIC 波束形成所得的单一时刻波束图。图 1 给出的仿真结果进一步表明,在能够检测到宽带脉冲信号的情况下, TSMUSIC 波束形成的输出波束相比频域 MUSIC 波束形成的输出波束,具有更低的旁瓣级和更强的噪声抑制能力。

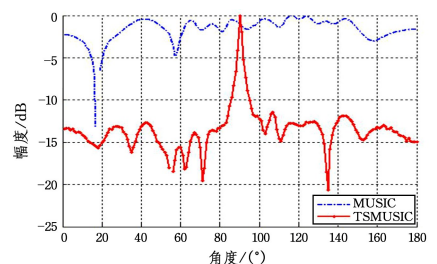


图 1 单目标下, MUSIC 与 TSMUSIC 的波束图

Fig. 1 Under one target, beam map of MUSIC and TSMUSIC

3.1.2 双目标情况

仿真条件如下:设双目标信号强度一样,带宽均为 $12\sim 18\text{ kHz}$,目标信号方位角分别为 90° 和 95° ,脉冲信号长度 0.2 s ,信号与噪声谱级比为 SLR ,线列阵条件、系统采样率、一次采样长度、频域 MUSIC 波束形成和 TSMUSIC 波束形成所用快拍数同 3.1.1 节。

图 2—图 4 给出了在 $\text{SLR} = -15\text{ dB}$ 的情况下,由频域 MUSIC 波束形成与 TSMUSIC 波束形成所得的方位历程图和单一时刻波束图。仿真结果表明,在检测多个宽带脉冲目标信号时,TSMUSIC 波束形成的输出波束相比频域 MUSIC 波束形成的输出波束具有更窄的主瓣宽带,在一定谱级下,其可以对相邻多目标的实现进行有效分辨,进一步验证了 TSMUSIC 波束形成充分利用了时间和空间上的相关运算,降低了稳定获取协方差矩阵估计值和噪声子空间所需的有效数据量。

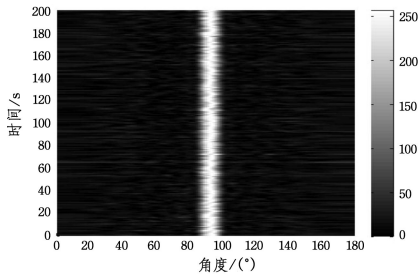


图 2 MUSIC 所得方位历程图

Fig. 2 MUSIC obtaining bear/time record

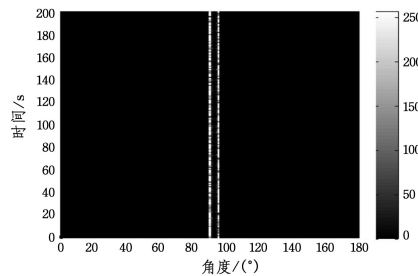


图 3 TSMUSIC 所得方位历程图

Fig. 3 TSMUSIC obtaining bear/time record

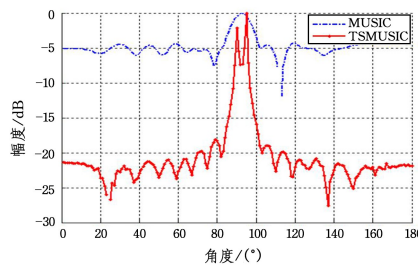


图 4 双目标下,MUSIC 与 TSMUSIC 的波束图

Fig. 4 Under two targets,beam map of MUSIC and TSMUSIC

图 5 和图 6 给出了在不同信号长度下,频域 MUSIC 波束形成和 TSMUSIC 波束形成对目标的检测性能。该结果进一步验证了随着一次处理数据中目标信号有效数据的减少,频域 MUSIC 波束形成可用快拍数会变少,进而降低了频域 MUSIC 波束形成对目标信号方位角的估计性能。数值仿真结果与理论分析相一致。

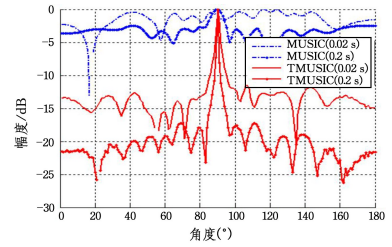


图 5 MUSIC 与 TSMUSIC 波束图(单目标)

Fig. 5 Beam map of MUSIC and TSMUSIC(onetarget)

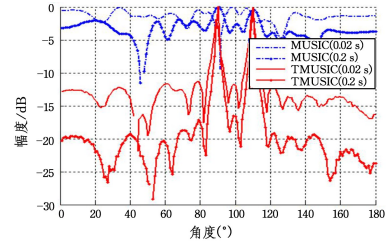


图 6 MUSIC 与 TSMUSIC 波束图(双目标)

Fig. 6 Beam map of MUSIC and TSMUSIC(two targets)

由以上仿真结果得到以下结论:

(1)针对宽带短脉冲信号,相比频域 MUSIC 波束形成,TSMUSIC 波束形成对目标信号数据长度的宽容性更高,且具有更低的旁瓣级和更强的噪声抑制能力;

(2)在仿真条件下,TSMUSIC 波束形成相比频域 MUSIC 波束形成的输出波束具有更窄的主瓣宽带,可以对相邻多目标的实现进行有效分辨,提高分辨宽带短脉冲多目标的性能;

(3)TSMUSIC 波束形成可有效地降低稳定获取协方差矩阵估计值和噪声子空间所需的有效数据量,进而降低了快拍数对频域 MUSIC 波束形成输出波束的影响。

3.2 实测数据处理分析

为了进一步验证本文方法对目标检测和方位估计的有效性,本文利用某次实验数据对上述两种方法进行处理分析。

3.2.1 实验平台及数据处理

为了提高波束形成系统的实时性,本文基于 ADI 公司研发的 ADSP-21160 处理器^[20-21]设计了一套波束形成系统的硬件平台,如图 7 所示。

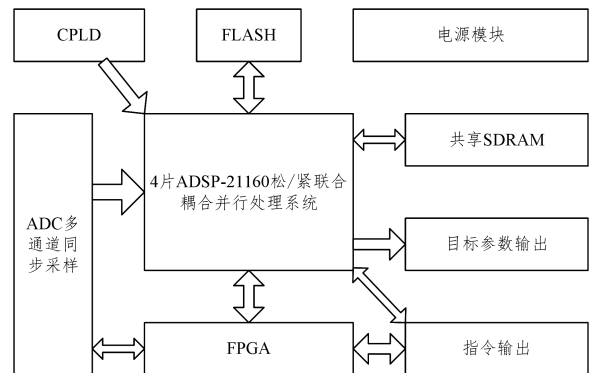


图 7 波束形成系统的硬件平台框图

Fig. 7 Diagram of hardware platform block of beam-forming system

本文以该硬件平台为基础,基于 VisualDSP++ 集成开发环境,通过编程实现了频域 MUSIC 波束形成方法和 TSMUSIC 波束形成方法。

实验中,接收阵为 16 元等间隔水平直线列阵,线列阵采样率为 20 kHz,该段数据在 70° 附近存在带宽为 $1\sim 2$ kHz 的脉冲信号,信号长度为 100 ms,占空比为 10%。一次处理数据长度为 20 000 个采样数据,频域 MUSIC 波束形成被分为 1 000 个子带来进行空间谱估计,单个子带协方差矩阵估计由 76 个快拍实现,每个快拍包含 512 个数据样本,相邻快拍之间重叠 256 个数据样本。TSMUSIC 波束形成通过带通滤波器选取 $1\sim 2$ kHz 频段,协方差矩阵估计由 1 个快拍实现。数据处理软件为 Windows7 旗舰版操作系统下的 MatlabR2018b。

3.2.2 数据分析

图 8 和图 9 分别为两种方法所得的时间历程图。图 10 为两种方法在 $t=15$ s 时的输出空间谱。

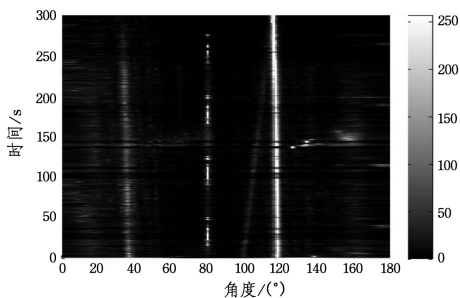


图 8 MUSIC 所得的方位历程图

Fig. 8 Bearing time record of MUSIC

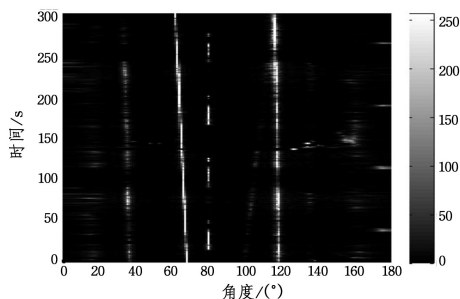


图 9 TSMUSIC 所得的方位历程图

Fig. 9 Bearing time record of TSMUSIC

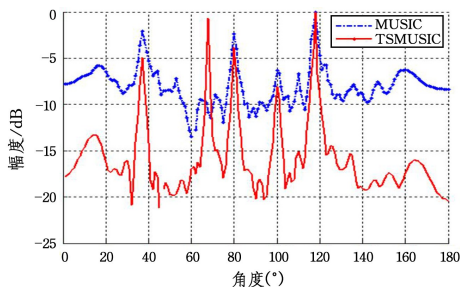


图 10 MUSIC 与 TSMUSIC 的空间谱 ($t=15$ s)

Fig. 10 Beam map of MUSIC and TSMUSIC ($t=15$ s)

针对本段数据,频域 MUSIC 波束形成方法无法对 70° 附近的目标信号实现有效检测和方位角估计;而 TSMUSIC 波束形成方法所得的方位历程图中的目标航迹和方位角清晰可辨。其原因在于短脉冲信号的平稳时间较短,不能满足频域 MUSIC 波束形成对多次快拍的时间要求,进而导致失配;而 TSMUSIC 波束形成方法充分利用了时间上和空间上的相关

运算,有效降低了稳定获取协方差矩阵估计值所需的快拍数。由图 10 可知,相比频域 MUSIC 波束形成方法,TSMUSIC 波束形成方法空间谱主副瓣比降低了 6 dB 以上,具有更低的旁瓣级和更强的噪声抑制能力。

实测数据处理结果进一步验证了本文所提 TSMUSIC 波束形成方法可以有效解决宽带短脉冲情况下频域 MUSIC 波束形成过程中噪声子空间估计不稳定的问题,在一定程度上解除了协方差矩阵估计所需的快拍数对频域 MUSIC 波束形成的限制,提高了 MUSIC 波束形成在实际应用中的鲁棒性。

结束语 针对宽带短脉冲情况下频域 MUSIC 波束形成中噪声子空间估计不稳定的问题,本文提出了一种基于时空联合估计噪声子空间的 MUSIC 波束形成方法,即 TSMUSIC 波束形成方法。该方法首先根据协方差矩阵的 Toeplitz 特性,对时域复解析数据进行了增广矩阵的构造;然后结合直接数据域中的空间滑动方法,利用时间上和空间上的相关性实现了对协方差矩阵的良好估计,进一步降低了协方差矩阵稳定性对目标信号有效长度的要求,在短时间内获得了良好的协方差矩阵估计值和噪声子空间。

数值仿真及实测数据处理的结果表明:针对宽带短脉冲信号,相比频域 MUSIC 波束形成,TSMUSIC 波束形成对目标信号数据长度的宽容性更高,具有更低的旁瓣级和更强的噪声抑制能力;具有更窄的主瓣宽带,在一定谱级比下,可以对相邻多目标的实现进行有效分辨,提高了分辨多目标的能力;改善了在频域 MUSIC 波束形成过程中噪声子空间估计的不稳定性,并提高了其在实际应用中的鲁棒性。

参考文献

- [1] ZHANG Z J, HOU Z B, ZHANG H. A Modified MUSIC Algorithm without Considering the Source Number[J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(5): 58-62.
- [2] CHEN Z F, SUN J C, HOU H. MUSIC-Like Beamforming Method for Wideband DOA Estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1257-1259.
- [3] GAO Y, LI D S. Adaptive Beamforming Algorithm Based on Modified MUSIC and ADL-LCMV[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(3): 24-29.
- [4] ZHOU H, JIANG X Z, YUAN Z Y. Study of the high resolution DOA estimation technology based on the beam space MUSIC algorithm [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(2): 72-75.
- [5] WANG W, WANG X M, LI X, et al. Reduced-dimensional DOA Estimation Based on MUSIC Algorithm in MIMO Radar with L-shaped Array[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(8): 1954-1959.
- [6] ZHANG Q, ZHANG L R, ZHENG G M, et al. Joint DOD and DOA estimation for bistatic MIMO radar with arbitrary array using semi-real-valued MUSIC [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(3): 532-538.
- [7] KONG C X, YANG A, ZHU L J. Traveling Wave Fault Location of Double-ended Transmission Lines Based on Wavelet

- Transform[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2019, 36(5): 31-36.
- [8] LIU G L, DUAN H G, HOU J Z. Beam Tracking Based on Second-order extended Kalman Filter Theory in Millimeter Wave Communication Systems[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2021, 33(1).
- [9] SCHMIDTR O. Multiplex location and signal parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [10] SCHMIDTR O, FRANKSR E. Multiplex resource DF signal processing: an experimental system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 281-290.
- [11] CHOI J W, KIM Y H. Spherical beam-forming and music methods for the estimation of location and strength of spherical sound sources[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1995, 9(5): 569-588.
- [12] LIN C C, CHEN Y L. An iterative method of direction-of-arrival estimation for coherent signals by using projection subspace [C]// 2016 International Conference on System Science and Engineering(ICSSE). National Chianan University, Taiwan, 2016: 22-26.
- [13] YOO D S. Subspace-based DOA estimation with sliding signal-vector construction for ULA [J]. Electronics Letters, 2015, 51(17): 1361-1363.
- [14] WANG L, SONG Z J, HUA Y. Adaptive MVDR Beamforming Algorithm Based on Time-Domain Analysis Signals[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(3): 318-322.
- [15] SONG H, KUPERMAN W A, HODGKISS W S, et al. Null broadening with snapshot-deficient covariance matrices in passive sonar [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, 28(2): 250-261.
- [16] LI Z Z, XU Z L, LI H T, et al. Fast TAMVDR algorithm based on fourier transform[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(1): 85-89.
- [17] XING G X, CAI Z M. Direct data domain algorithm for arbitrary array[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(6): 19-23.
- [18] XING G X, CAI Z M, ZHANG W. A reverberation suppressing method by direct data domain based localized domain joint algorithm[J]. Acta Acustica, 2013, 38(4): 459-466.
- [19] CHEN F T, MENG Z. Directional Discontinuous Reception Mechanism for 5G Millimeter Wave Communication[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2021, 33(1).
- [20] YAN Z H, HUANG J G, ZHANG Q F, et al. Real-time processing with multi-process or applied to beam space MUSIC[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(9): 104-106.
- [21] ZHANG D L, ZHANG B, SONG Y K. High-speed implementation of 2-D high precision MUSIC algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2018, 41(3): 356-361.



WANG Si-xiu, born in 1981, master, associate professor. His main research interests include signal processing and so on.



GUO Wen-qiang, born in 1975, Ph. D., professor. His main research interests include blind signal processing and so on.