



研究与开发

基于异步调控的时间调控超表面 DOA 估计方法

易鸣, 陈明, 钟州, 金梁
(信息工程大学, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对现有时间维度波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计方案中, 时间调控速率受限导致目标信号频谱混叠的问题, 提出了一种基于异步调控的 DOA 估计方法, 该方法能够有效提升调控速率, 进而提升信号处理的信号带宽。在不改变时间调控超表面 (time-varying metasurface, TVM) 硬件约束的情况下, 该方法利用单元状态会持续一段时间的性质, 交错不同列单元的变化起始时间, 在一个状态持续时间内获得了多个不同的响应。异步调控方法能够使 TVM 在受材料限制的情况下, 等效增加虚拟多通道个数, 提高 DOA 估计的精度。仿真结果验证了方法的有效性, 相较于现有的同步调控方法, 新方法在 DOA 估计性能上有了较大提升, 能够逼近理论上的最优 DOA 估计结果。

关键词: DOA 估计; 时间调控超表面; 异步调控

中图分类号: TP928

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025005

DOA estimation method for time-varying metasurface based on asynchronous modulation

YI Ming, CHEN Ming, ZHONG Zhou, JIN Liang
Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: In response to the challenge of spectral aliasing in target signals, which arose from constraints on the temporal modulation rate in existing time-domain direction of arrival (DOA) estimation methods, a novel asynchronous control-based DOA estimation technique was proposed. This approach significantly increased the modulation rate, effectively mitigating the problem of spectral aliasing and consequently broadening the signal processing bandwidth. This novel approach capitalized on the inherent persistence of unit states over a duration, without necessitating any alterations to the hardware constraints of the time-varying metasurface (TVM). By staggering the initiation of state changes across various column units, the method enabled the acquisition of multiple distinct responses within a single state's temporal window. The asynchronous modulation strategy effectively augmented the virtual channel count under the limitations imposed by material properties, thereby enhancing the precision of DOA estimation. Empirical simulation outcomes substantiated the efficacy of this approach, demonstrating a significant enhancement in DOA estimation performance compared to existing synchronous modulation techniques, closely approximating the theoretical

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U22A2001); 自主科研项目“基于智能反射面的单通道测向定位技术研究” (No.a8709)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U22A2001), Independent Research Program “Research on Single-Channel Direction Finding and Localization Technology Based on Intelligent Reflecting Surfaces” (No.a8709)



optimum for DOA estimation outcomes.

Key words: DOA estimation, time-varying metasurface, asynchronous modulation

0 引言

波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计被广泛用于获取用户位置, 从而提高通信质量。作为雷达和无线通信领域的关键技术, DOA 估计在阵列信号处理、传感器网络、遥感等领域得到了广泛的研究, 并在实际应用中扮演了重要的角色。例如, 在卫星移动通信方面, 准确的 DOA 估计可以辅助形成高精度的定向波束, 提高了通信质量和效率^[1]。在智能天线技术方面, DOA 估计可用于波束成形, 引导信号以实现大容量通信, 这对于提升通信系统性能至关重要^[2]。

在过去的研究中, 多信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 算法^[3]、通过旋转不变性技术估计信号参数 (estimating signal parameter via rotational invariance technique, ESPRIT) 算法^[4]以及相关改进的子空间类算法^[5-6]被用于提供高精度的 DOA 估计结果。同时, 以正交匹配追踪为代表的压缩感知算法^[7]的研究正在兴起。这些经典 DOA 估计技术通常依赖于多通道天线阵列^[8]来确保性能, 而提高分辨率的最直接方法是增加天线数量。然而, 天线数量的增加会带来结构尺寸大、馈电电路复杂、制造成本和功耗上升等问题。

近年来, 超表面作为一种能够主动调控电磁波振幅、相位和极化, 从而影响电磁波传播特性的新型材料^[9-11], 因具有体积小、易加工等优势而受到广泛关注。在基于超表面的研究中, 文献^[12]引入了时间维度, 提出了时间调控超表面 (time-varying metasurface, TVM) 的概念, 为电磁波调控提供了新的自由度。时间调控带来的谐波效应能够很好地实现多维接收空间的构建, 实现虚拟多通道接收的效果。TVM 通过产生多模态且低相关的方向图, 对信号的多阶谐波进行接收,

仅需要单通道即可实现 DOA 估计^[13-15], 从根本上降低了硬件复杂度。

文献^[16]提出了基于 TVM 的 DOA 估计方法, 该方法通过分析 TVM 的频谱散射特性实现了 DOA 估计。文献^[17]通过分析两个一阶谐波频率下接收信号的振幅不平衡特性来实现 DOA 估计。文献^[18]提出了一种基于时间调控理论的 DOA 估计方法, 该方法利用谐波特征矩阵, 结合时间调控和相位调控, 重构阵列的流形矢量。文献^[19]通过设计 TVM 单元的编码序列, 在时域上对入射信号进行调控, 并利用谐波恢复多通道接收信号矩阵, 从而实现 DOA 估计。现有的基于 TVM 的 DOA 估计方法大多未考虑入射信号带宽的影响, 直接假设入射信号经过时间调控后可以获得虚拟多通道, 从而实现 DOA 估计。然而, 当入射信号以频率 f_0 照射超表面时, 周期时间调控会使超表面产生大量谐波分量, 这些谐波分量以不同方向的波束射出。谐波分量的频率间隔由 TVM 的调控频率决定, 当调控频率低于入射信号带宽时, 产生的谐波会出现混叠, 导致无法进行 DOA 估计。

不同材料制作的超表面具有不同的电磁波调控能力。基于变容二极管的超表面具有连续调节幅度、相位和极化的能力, 但其调整速度慢, 一个状态的改变需要数百纳秒。相比之下, 基于 PIN 二极管的超表面只能在几个离散的调节参数之间切换状态, 但其状态改变速度非常快, 可以在 100 ns 内实现状态切换^[20]。因此, 即使是调控速率最高的超表面, 入射信号带宽的上限也不到 5 MHz。然而, 随着无线通信技术的发展, 通信信号的带宽需求会越来越高。

针对以上问题, 本文设计了一种基于异步调控的时间调控超表面 DOA 估计方法, 在不改变 TVM 硬件约束的前提下, 利用单元状态会持续

一段时间的性质，交错不同列单元的变化起始时间，在一个响应持续时间内获得多个不同的响应。这种异步调控方法能够使 TVM 在材料限制的情况下，等效增加虚拟多通道个数，提高 DOA 估计精度。仿真结果验证了该方法的有效性，相较于现有同步调控方法，DOA 估计性能有了较大提升，能够逼近理论上的最优 DOA 估计结果。

1 单通道 TVM 信号接收模型

考虑一个 M 列的 TVM 进行信号接收，其中相邻列单元间距为 d ，单通道 TVM 信号接收模型如图 1 所示。从一维超表面出发，假设每列单元均由同一信号控制，因此整个超表面可以等效为阵列单元间距为 d 、阵元数为 M 的天线阵列。

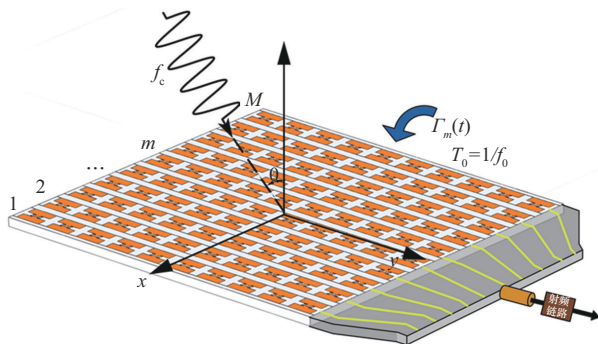


图 1 单通道 TVM 信号接收模型

假设远场发射器发射的 L 个独立的同频窄带信号 $S(t) = \sum_{l=1}^L s_l(t) e^{j2\pi f_c t}$ ，其中 $s_l(t)$ 为来自 θ_l 的基带信号， j 为虚数单位， f_c 为载频。第 m 列单元的接收信号可以表示为：

$$x_m(t) = S(t) e^{j\beta(m-1)d \sin \theta_l} + n_m(t) \quad (1)$$

其中， $\beta = 2\pi/\lambda$ ，表示频率为 f_c 的波数； $n_m(t)$ 表示零均值高斯白噪声；方差为 σ^2 。因此在单通道模型中，接收信号 $y(t)$ 可以表示为：

$$y(t) = \sum_{m=1}^M \Gamma_m(t) x_m(t) \quad (2)$$

其中， $\Gamma_m(t)$ 为第 m 列中的周期时间调控函数，可

以表示为各阶谐波的线性组合：

$$\Gamma_m(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_{mk} e^{j2k\pi f_0 t} \quad (3)$$

其中， f_0 表示调控频率， c_{mk} 为 $\Gamma_m(t)$ 的第 k 阶傅里叶系数，表示为：

$$c_{mk} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \Gamma_m(t) e^{-j2k\pi f_0 t} dt \quad (4)$$

其中， $T_0 = 1/f_0$ ，表示调控周期。综上所述，接收信号可以表示为：

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=1}^M x_m(t) c_{mk} e^{j2k\pi f_0 t} + n(t) \quad (5)$$

由式 (5) 可知，由于超表面的时间调控，入射信号会产生一种非线性现象，其特征是在基波分量之外会产生大量的谐波，即信号频谱分布在 $f_c + kf_0, k \in \{-\infty, +\infty\}$ 无穷多个频点上。各频率分量的间隔由 f_0 决定，根据奈奎斯特采样定理， f_0 需大于入射信号带宽 B_x 才能够保证不发生频谱混叠。

$$\varphi_k(\theta) = \sum_{m=1}^M c_{mk} e^{j\beta(m-1)d \sin \theta} \quad (6)$$

TVM 实现虚拟多通道原理示意图如图 2 所示，在一个码元周期内，TVM 单元变化 N 次，可以等价于 N 个异构阵列方向图对信号分别进行了观测，从而构建了 N 维虚拟通道。在理想条件下，为充分利用 TVM 阵列自由度，状态数 N 需要不小于阵列数 M 。

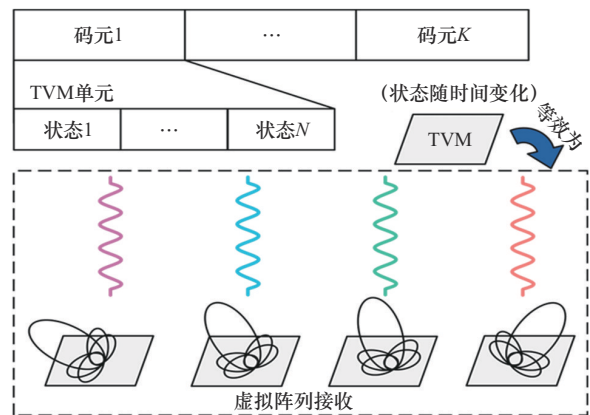


图 2 TVM 实现虚拟多通道原理示意图



对于一个 M 列 TVM，当 $N \geq M$ 时，即虚拟通道数不小于超表面列数时，能够获得理论最优的 DOA 估计结果；当 $2 \leq N < M$ 时，通道个数不足，导致估计自由度不足，DOA 估计精度会随着通道数 N 的减小而降低，且估计信源个数最大值变为 $N-1$ 个。当状态数 N 为最小值 2 时，TVM 调控速率取得理论最大值 $(f_0)_{\max} = f_v/2$ ，其中 f_v 为单元调控频率；当 $N < 2$ 时，在一个码元持续时间内，TVM 单元无法改变响应，此时 TVM 失去意义，需要采用传统的单通道算法实现 DOA 估计。因此，基于 TVM 的 DOA 估计可以根据调控速率和入射信号带宽的大小关系分为以下 3 种情况。

(1) 当 $B_x > f_v/2$ 时，采用 TVM 接收信号，频谱会发生混叠，需要采用传统单通道算法实现 DOA 估计。

(2) 当 $f_v/M < B_x \leq f_v/2$ 时，TVM 可以满足周期调控的最低速率需求，但是虚拟通道数小于 TVM 列数，无法充分利用多个天线单元的空域资源，导致估计性能下降。

(3) 当 $B_x \leq f_v/M$ 时，TVM 单元可以在一个码元持续时间内变化 M 次，能够获得理论最优的虚拟通道个数，DOA 估计性能可以逼近多通道阵列。

2 本文所提方案

根据第 1 节的分析可知，同步调控方法在对 TVM 单元进行状态切换时，各列单元起始时间相同，当调控速率确定时，状态数 N 也随之确定。当 $f_v/M < B_x \leq f_v/2$ 时，状态数 N 小于 TVM 列数 M ，等效获得的通道数不足，无法实现最佳的 DOA 估计效果。因此，为能够充分利用 TVM 多个天线单元的空域资源，本文针对 $f_v/2 \leq B_x < f_v/M$ 时的 DOA 估计场景，提出异步调控方法。

2.1 异步调控方法

考虑 TVM 每个单元响应会持续一段时间的性质，本文通过交错不同列单元变化起始时间，使得 TVM 每个单元调控的起始时间在一个响应持续时间内间隔排开。此时单个状态的持续时间缩短，实现了在一个响应持续时间内存在多个不同的响应，等效增加虚拟通道个数，提高 DOA 估计精度。异步调控方法原理示意图如图 3 所示。

在异步调控方法中，假设在每个调控周期内每个 TVM 单元有 N 个不同的状态，一个状态持续时间为 T_0/N ，相邻列之间调控开始时间相差 Δt 。为保证编码独立性，有：

$$M\Delta t = k \frac{T_0}{N}, k \in (1, 2, \dots, \frac{M}{2}) \quad (7)$$

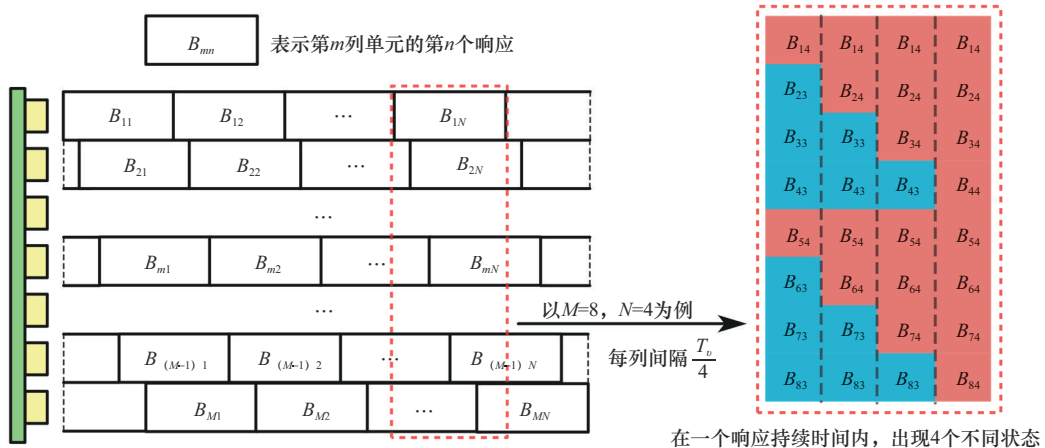


图 3 异步调控方法原理示意图

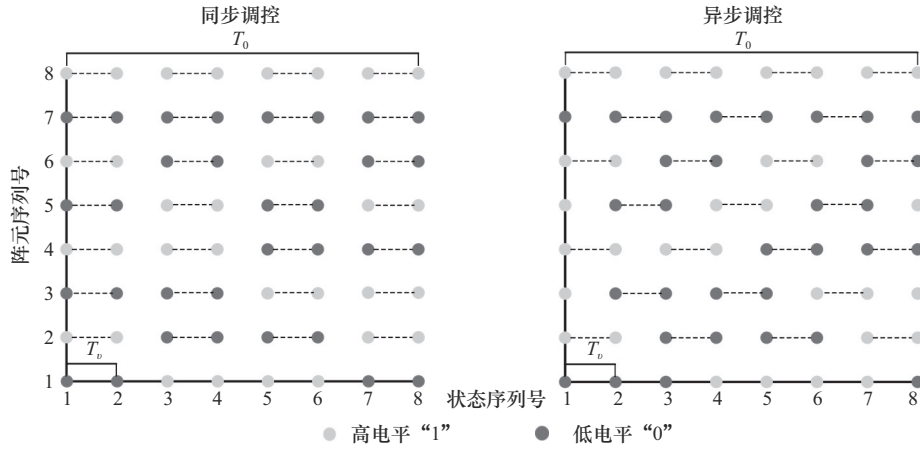


图4 哈达玛矩阵异步调控示意图

$$\Delta t = \frac{T_v}{k}, k \in (2, \dots, M) \quad (8)$$

采用异步调控方法，可以使一个调控周期内原有状态数变为 k 倍。

为便于理解，在后续的分析中都基于 PIN 二极管的 TVM 为基础进行理论说明，每个单元通过对 PIN 二极管施加控制电压的方式控制单元的反射系数，实现 1 bit 的控制能力。此时 TVM 的时间调控函数可以表示为：周期性的方波信号，包含高电平“1”和低电平“0”。哈达玛矩阵异步调控示意图如图 4 所示，图 4 显示了当 $N=4$ 、 $M=8$ 、 $k=4$ 时，选取哈德玛矩阵作为原状态编码矩阵，异步调控后 TVM 的状态。图 4 中使用虚线表示电平持续时间，原点表示状态。同步调控时，状态矩阵编码为“10101010”“10011001”“10100101”和“10010110”。异步调控时，增加了 4 组编码“10111110”“10001000”“10110001”和“10000111”。由图 4 可知，异步调控后状态编码矩阵相较于调控前增加了 4 列，状态的持续时间缩短，等效增加了虚拟多通道个数。

2.2 接收信号稀疏表示

第 n 个状态下单通道 TVM 接收信号 $y_n(t)$ 为：

$$y_n(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M B_{mnl} S_l(t) e^{j\beta(m-1)d \sin \theta_l} + n(t) \quad (9)$$

其中， $B_{mnl} = (-1)^{b_{mnl}}$ 表示第 m 个单元第 n 个状态的响应系数，在状态为低电平“0”时， $b_{mnl}=0$ ，表示与信号反向；在状态为高电平“1”时， $b_{mnl}=1$ ，表示与信号同向。

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{B}^T \mathbf{A} \mathbf{S}(n) + \mathbf{N}(n) \quad (10)$$

其中， $\mathbf{Y}(n) = [y_1(n), \dots, y_N(n)]^T$ 为由各个状态下接收信号组成的接收信号矩阵， $\mathbf{B} = \{(-1)^{b_{mnl}}\} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 为反射系数矩阵， $\mathbf{A} = [\boldsymbol{\alpha}(\theta_1), \dots, \boldsymbol{\alpha}(\theta_L)]^T$ 为阵列流型矩阵， $\boldsymbol{\alpha}(\theta) = [1, \dots, e^{j\beta d(M-1) \sin \theta}]^T$ 为远场信号导向矢量， $\mathbf{S}(n) = [s_1(n), \dots, s_L(n)]^T$ 为入射信号矩阵， $\mathbf{N}(n) = [n_1(n), \dots, n_N(n)]^T$ 为噪声信号矩阵。

阵列流型矩阵 \mathbf{A} 中包含了全部远场信号的方向信息 θ ，同时对于整个信号空间而言，实际信号的来波方向是稀疏的，入射信号空域稀疏性示意图如图 5 所示。其中，空心表示信号的可能入射方向，实心表示有信号入射，信号的来波方向为 θ_l 。

因此，将空间均匀划分为 $\{\theta_1, \dots, \theta_K\}$ ，假设

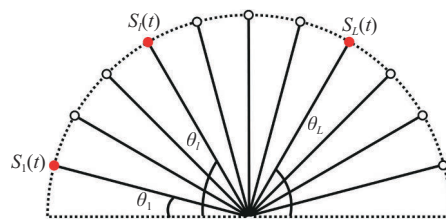


图5 入射信号空域稀疏性示意图



上述每个方向都有一个可能的潜在信号，可以得到一个过完备的基矩阵 $\bar{\mathbf{A}}=[\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$ 和一个稀疏信号向量 $\bar{\mathbf{S}}(n)=[s_1(n), \dots, s_K(n)]^T$ 。为了保证空域稀疏性成立，潜在信号的个数 K 要远大于实际信号个数 L ，满足 $K \gg L$ 。此时式 (10) 可进一步写成：

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{S}}(n) + \mathbf{N}(n) \quad (11)$$

此时 $\mathbf{B}\bar{\mathbf{A}}$ 为压缩感知理论中的测量矩阵。当空间划分角度确定时，测量矩阵 $\mathbf{B}\bar{\mathbf{A}}$ 就随之确定了。压缩感知用于 DOA 估计领域中，就是通过接收信号 \mathbf{Y} 和确定后的测量矩阵重构出原始入射信号 \mathbf{S} 的过程。在理想情况中，在稀疏信号向量 $\bar{\mathbf{S}}(n)$ 中只有 L 个位置的元素值信号不为零，其余 $K-L$ 个位置的元素值为零。此时 L 个非零向量组成的矩阵就是原始的入射信号矩阵，其对应的角度位置就是入射信号的 DOA 估计值。这种典型的压缩感知 (compressed sensing, CS) 问题可以通过求解 l_1 范数最小化模型来解决^[21]：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{S}} &= \operatorname{argmin} \|\bar{\mathbf{S}}\|_1 \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{Y} - \mathbf{B}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{S}}\| \leq \delta \end{aligned} \quad (12)$$

其中， δ 为与噪声相关的参数，表示由噪声引起的误差大小。

2.3 基于异步调控的 l_1 -SVD 算法

在空域信号处理领域，信号在空间中的稀疏性必然存在且稀疏度足够高，可以应用压缩感知理论求解 DOA 估计值。 l_1 -SVD 算法是经典的 l_1 范数最小化问题，其依靠对多快拍数据进行奇异值分解 (singular value decomposition, SVD)，从而实现对数据矩阵的降维处理，并通过二阶凸规划方式求解目标最优解的优化算法。首先对接收信号矩阵 \mathbf{Y} 进行奇异值分解：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{L}\mathbf{V}^T \quad (13)$$

其中， \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 均为正交矩阵，分别包含在左

奇异向量和右奇异向量， \mathbf{L} 是对角矩阵，其对角线元素为奇异值。

定义 $\mathbf{D}_K = [\mathbf{I}_K \mathbf{0}]^T$ ，其中 \mathbf{I}_K 表示 K 阶单位矩阵， $\mathbf{0}$ 表示 $K \times (NN - K)$ 维零矩阵， NN 表示快拍数，因此，可以将接收信号矩阵降维成 $M \times K$ 维矩阵 \mathbf{Y}_{SV} ：

$$\mathbf{Y}_{SV} = \mathbf{U}\mathbf{L}\mathbf{D}_K = \mathbf{Y}\mathbf{V}\mathbf{D}_K \quad (14)$$

依次对稀疏信号向量 $\bar{\mathbf{S}}(n)$ 和噪声向量 $\mathbf{N}(n)$ 进行降维处理，可得：

$$\bar{\mathbf{S}}_{SV} = \bar{\mathbf{S}}\mathbf{V}\mathbf{D}_K \quad (15)$$

$$\mathbf{N}_{SV} = \mathbf{N}\mathbf{V}\mathbf{D}_K \quad (16)$$

此时，降维后的接收信号矩阵可以表示为：

$$\mathbf{Y}_{SV} = \mathbf{B}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{S}}_{SV} + \mathbf{N}_{SV} \quad (17)$$

由式 (17) 可知，奇异值分解对接收信号矩阵的列进行了处理，没有改变非零行的位置。将接收信号矩阵的维数从 $M \times NN$ 降到了 $M \times L$ ，矩阵列数由快拍数变为信源个数。在实际情况下， $NN \gg L$ ，能够很大程度上降低计算复杂度。同时优化模型转变为：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{S}} &= \operatorname{argmin} \|\bar{\mathbf{S}}_{SV}\|_1 \\ \text{s.t. } & \|\mathbf{Y}_{SV} - \mathbf{B}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{S}}_{SV}\|_F^2 \leq \sigma^2 \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $\|\cdot\|_F^2$ 表示弗罗贝尼乌斯范数， σ^2 表示高斯白噪声功率。

为了求解方便，通过惩罚函数方法，将有约束的优化问题转化为无约束的优化问题：

$$\min \|\mathbf{Y}_{SV} - \mathbf{B}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{S}}_{SV}\|_F^2 + \lambda \|\bar{\mathbf{S}}_{SV}\|_1 \quad (19)$$

其中， λ 为正则化参数，与噪声的大小有关。 λ 的选取极为重要^[22]，当参数过小时，空间谱函数会出现大量伪峰；当参数选取过大时，实际来波方向对应峰值会消失。

3 仿真结果与分析

本节通过数值模拟评估了本文所提异步调控

方法估计 DOA 的可行性。然后，通过和现有方法的对比，证明了本文所提异步调控方法的有效性，所有仿真实验都进行了 1 000 次蒙特卡罗模拟。在仿真实验中，本文设置入射信号带宽为 5 MHz，TVM 单元的调控频率为 20 MHz。在同步调控方法中，一个码元周期内最多能够实现 4 个不同的状态；在异步调控方法中，为了实现 8 列 TVM 的估计性能，令 $\Delta t = 1/2f_v$ ，仿真相关参数见表 1。

表 1 仿真相关参数

参数符号	参数名称	参数取值
M	TVM 列数	8
d	阵元间隔	$\lambda/2$
f_c	载波频率	3.15 GHz
f_0	调控频率	5 MHz
f_s	采样频率	10 GHz
f_v	单元调控频率	20 MHz
B	带宽	5 MHz
NN	快拍数	1 000
Δt	相邻列交错时间	50 ns

DOA 估计的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 可以定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{LJ} \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L (\hat{\theta}_l(j) - \theta_l)^2} \quad (20)$$

其中, J 为蒙特卡罗实验数, L 为信号源数量, $\hat{\theta}_l(j)$ 为第 l 个信号第 j 次的蒙特卡罗估计值。

3.1 算法有效性

入射方向为 -25° 和 20° 的空间谱以及入射方向为 -1° 和 1° 的空间谱分别如图 6、图 7 所示, 图 6 和图 7 均对比了使用 MUSIC 算法和本文所提异步调控方法的空间谱情况。由图 6 和图 7 可知, 本文所提异步调控方法不仅空间谱峰更加尖锐, 干扰信号产生的旁瓣更低, 并且对入射方向间隔很近的信号同样能够有效分辨。MUSIC 算法在信号

相隔较远时可以分辨, 但是对于邻近的信号则无法分辨。因此, 本文所提异步调控方法具有更高的分辨能力。

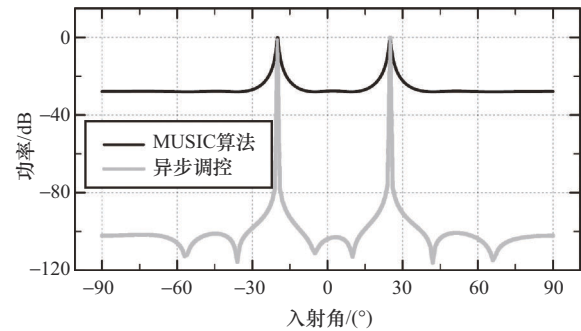


图 6 入射方向为 -25° 和 20° 的空间谱

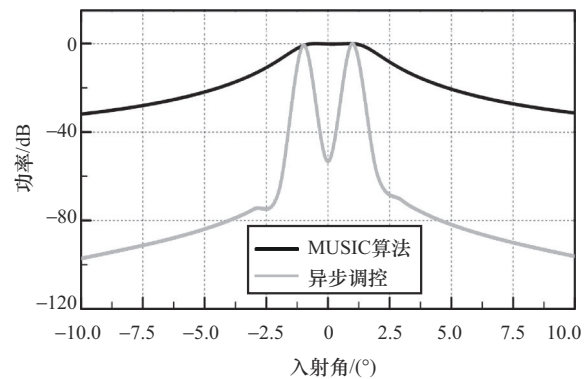


图 7 入射方向为 -1° 和 1° 的空间谱

7 路和 3 路入射信号对应空间谱分别如图 8、图 9 所示。在表 1 的仿真参数下, 虚拟通道数 $N=4$, 图 8 给出了入射信号数量 $L=7$ 时, 入射角度在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 均匀分布时对应的空间谱函数, 由图 8 可知, 采用异步调控方法和多通道阵列都能获得正确的 DOA 估计结果, 但是异步调控方法的空间谱旁瓣更低, 抗干扰能力更强, 这是由于异构方向图接收带来的增益。特别地, 采用同步调控方法时, 由于虚拟多通道个数小于入射信号个数, 无法获得空间谱。图 9 给出了入射方向为 $(-30^\circ, -10^\circ, 25^\circ)$ 时对应的空间谱函数, 由图 9 可知, 虽然同步调控方法能够获得有效空间谱函数, 但是估计误差较大, 无法实现 DOA 估计。异步调控方法和同步调控方法的空间旁瓣功率均比多通道阵列低, 证



明了基于TVM的DOA估计方法具有更好的抗干扰性能。

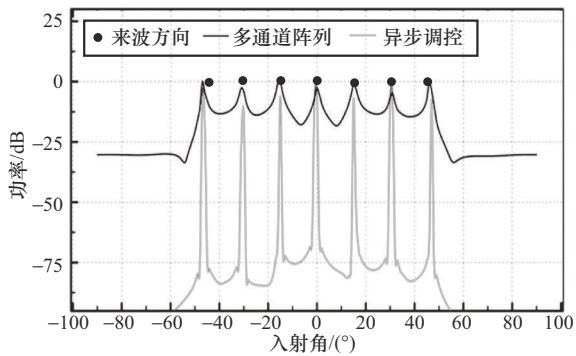


图8 7路入射信号对应空间谱

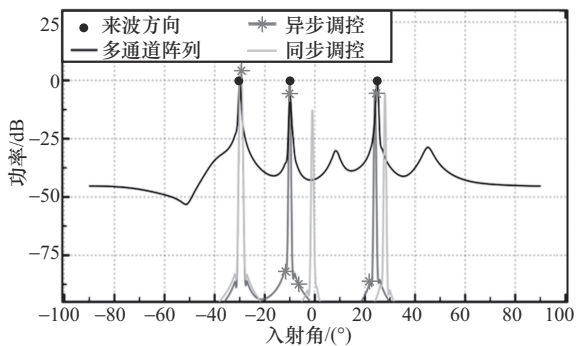


图9 3路入射信号对应空间谱

3.2 DOA估计精度

将本文所提异步调控方法与同步调控方法和多通道阵列中的经典MUSIC和 l_1 -SVD算法进行对比。不同方法下DOA估计RMSE随SNR的变化如图10所示,其中,快拍数为1000,来波方向为 $(-20^\circ, 30^\circ)$ 。由图10可知,本文所提异步调控方法和多通道阵列实现 l_1 -SVD算法DOA估计精度基本一致,同时采用同步调控方法估计RMSE较高,DOA估计精度差,证明了在调控速率不足时,同步调控方法的DOA估计精度较低,但是异步调控方法能够有效提高DOA估计精度,获得理论上的最优DOA估计结果,证明了本文所提异步调控方法的有效性。

不同方法下DOA估计RMSE随信源个数的变化如图11所示,其中,快拍数为1000,SNR为0。由图11可知,同步调控方法只有在3个信源之内时

能够获得有效的DOA估计结果,并且估计RMSE高,DOA估计精度差,当信源个数超过4个时,无法得到有效的DOA估计结果。这是由于调控速率不足时采用同步调控方法所得虚拟多通道数不足,无法充分利用阵列全部信息。此外,异步调控方法和多通道阵列实现 l_1 -SVD算法DOA估计精度基本一致,证明了本文所提异步调控方法的有效性。

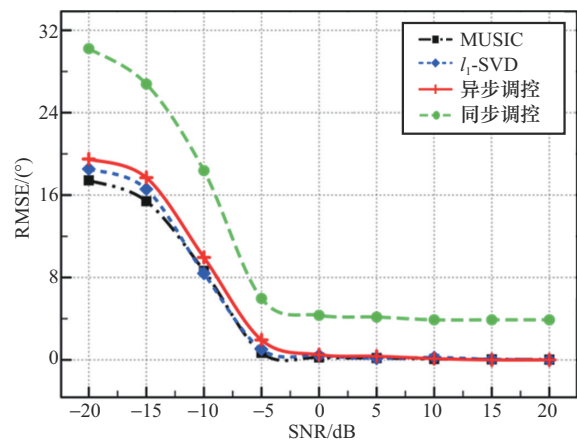


图10 不同方法下DOA估计RMSE随SNR的变化

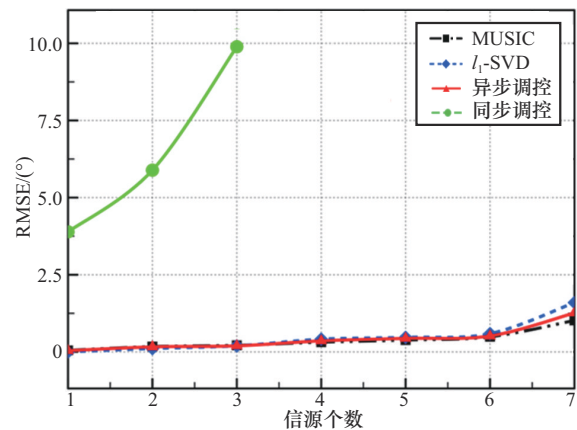


图11 不同方法下DOA估计RMSE随信源个数的变化

4 结束语

本文提出了一种基于异步调控的DOA估计方法,在TVM单元调控速率受材料限制的情况下,交错不同列单元变化起始时间,在一个状态持续时间内获得多个不同的响应。针对调控速率不足的问题,充分利用TVM单元状态持续时间

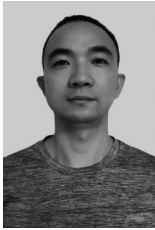
增加虚拟多通道数量。随后, 根据异步调控码字得到新的测量矩阵, 以此对信号空间均匀划分, 得到接收信号的稀疏表示。最后利用基于异步调控的 l_1 -SVD 算法实现 DOA 估计。仿真结果验证了所提方法的有效性, 相较于现有同步调控方法, DOA 估计性能有了较大提升, 能够逼近理论上的最优 DOA 估计结果。

参考文献:

- [1] BAYER H, KRAUSS A, ZAICZEK T, et al. Ka-band user terminal antennas for satellite communications[antenna applications corner] [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016, 58(1): 76-88.
- [2] KUCHAR A, TANGEMANN M, BONEK E. A real-time DOA-based smart antenna processor[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1279-1293.
- [3] SCHMIDT R, SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal Parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [4] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. Direction-of-arrival estimation by subspace rotation methods - ESPRIT[C]//Proceedings of the ICASSP '86. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2003: 2495-2498.
- [5] REN Q, WILLIS A J. Fast root MUSIC algorithm[J]. Electronics Letters, 1997(33): 450-451.
- [6] MA C W, TENG C C. Detection of coherent signals using weighted subspace smoothing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(2): 179-187.
- [7] TROPP J A. Greed is good: algorithmic results for sparse approximation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(10): 2231-2242.
- [8] ZHOU C W, GU Y J, FAN X, et al. Direction-of-arrival estimation for coprime array via virtual array interpolation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(22): 5956-5971.
- [9] NI X J, WONG Z J, MREJEN M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. Science, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [10] MINOVICH A E, MIROSHNICHENKO A E, BYKOV A Y, et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(2): 195-213.
- [11] HOLLOWAY C L, KUESTER E F, GORDON J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 10-35.
- [12] SHALTOUT A, KILDISHEV A, SHALAEV V. Time-varying metasurfaces and Lorentz non-reciprocity[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(11): 2459.
- [13] WANG X Y, CALOZ C. Direction-of-arrival (DOA) estimation based on spacetime-modulated metasurface[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1613-1614.
- [14] HE C, CAO A J, CHEN J F, et al. Direction finding by time-modulated linear array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(7): 3642-3652.
- [15] CHEN X Q, ZHANG L, LIU S, et al. Artificial neural network for direction-of-arrival estimation and secure wireless communications via space-time-coding digital metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(23): 2201900.
- [16] DAI J Y, TANG W K, WANG M T, et al. Simultaneous *in situ* direction finding and field manipulation based on space-time-coding digital metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(6): 4774-4783.
- [17] FANG X Y, LI M M, HAN J Z, et al. Accurate direction-of-arrival estimation method based on space-time modulated metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 10951-10964.
- [18] FU H S, DAI F Z, HONG L. Two-dimensional off-grid DOA estimation with metasurface aperture based on MMV sparse Bayesian learning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 8005818.
- [19] 周群焰, 王思然, 戴俊彦, 等. 基于时空编码数字超表面的雷达散射截面缩减及波达角估计方法[J]. 雷达学报, 2024, 13(1): 150-159.
ZHOU Q Y, WANG S R, DAI J Y, et al. Simultaneous direction of arrival estimation and radar cross-section reduction based on space-time-coding digital metasurfaces[J]. Journal of Radars, 2024, 13(1): 150-159.
- [20] SLEASMAN T, IMANI M F, XU W R, et al. Waveguide-fed tunable metamaterial element for dynamic apertures[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15): 606-609.
- [21] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. SIAM Review, 2001, 43(1): 129-159.
- [22] XU X, WEI X H, YE Z F. DOA estimation based on sparse signal recovery utilizing weighted l_1 -norm penalty[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(3): 155-158.



[作者简介]



易鸣（1986-），男，信息工程大学副研究员、硕士生导师，主要研究方向为智能超表面、物理层安全、阵列信号处理等。



钟州（1982-），男，信息工程大学副研究员、硕士生导师，主要研究方向为无线通信、物理层安全等。



陈明（1999-），男，信息工程大学硕士生，主要研究方向为智能超表面、无线通信、物理层安全、阵列信号处理等。



金梁（1969-），男，信息工程大学教授、博士生导师，主要研究方向为智能超表面、无线内生安全、移动通信、物理层安全等。