

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.03.010

适用于通信信号盲源分离的 分离条件数学建模方法研究

刘治军, 赵义平, 徐楠, 邱乐德

(中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部, 北京 100094)

摘要:针对使用盲源分离技术分离卫星通信信号的数学假设工程实施问题,重点对分离条件中的数学假设混合矩阵列满秩展开研究。根据最优化理论,提出了一种适用于通信信号盲源分离的分离条件数学建模方法。首先,介绍了盲源分离的分离模型与基本假设;其次,选择矩阵条件数来衡量混合矩阵的正定性,并结合阵列天线接收模型,以矩阵条件数为目标函数,建立最优化模型,寻找最优天线间距;最后,以两个信号源、两个接收天线为例进行仿真。仿真结果表明:所建立的优化模型可以有效找到最优天线间距,通过设计合适的天线间距可以有效满足混合矩阵列满秩条件。最优天线间距与载波频率成反比。该建模方法有效将抽象的数学假设转化为具体的天线间距设计,加强了盲源分离技术的可实施性,为大规模的盲源分离天线阵列设计提供技术支撑。

关键词:矩阵条件数;分离条件;最优化模型;盲源分离;频谱混叠

中图分类号:V474

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)03-0060-07

Research on mathematical modeling method of separation conditions for blind source separation of communication signals

LIU Zhijun, ZHAO Yiping, XU Nan, QIU Ledede

(Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the engineering implementation problem of separating satellite communication signals using blind source separation technology, the mathematical assumption of the full rank of the mixed matrix column in the separation conditions is emphatically studied. Based on the optimization theory, a mathematical modeling method of separation conditions for blind source separation of communication signals is proposed. Firstly, the separation model and basic assumptions of BSS are introduced; Then, the condition number of the matrix is selected to measure the positive definiteness of the mixed matrix, and combined with the array antenna receiving model, the optimization model is established with the condition number of the matrix as the objective function to find the optimal antenna spacing; Finally, two signal sources and two receiving antennas are simulated. The simulation results show that the optimization model can effectively find the optimal antenna spacing, and the full rank condition of the mixed matrix column can be effectively satisfied by designing appropriate antenna spacing. The optimum antenna spacing is inversely proportional to the carrier frequency. The optimization model effectively translates abstract mathematical assumptions into specific antenna spacing design, providing technical support for large-scale BSS antenna array design.

收稿日期:2022-12-20; 修回日期:2023-02-13

基金项目:民用航天技术预先研究项目(编号:D030302)

引用格式:刘治军,赵义平,徐楠,等.适用于通信信号盲源分离的分离条件数学建模方法研究[J].空间电子技术,2023,20(3):60-66. LIU Z J, ZHAO Y P, XU N, et al. Research on mathematical modeling method of separation conditions for blind source separation of communication signals[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(3):60-66.

Key words: matrix condition number; separation condition; optimization model; blind source separation (BSS); spectrum aliasing

0 引言

随着大规模卫星星座的建设以及各种新型卫星通信技术的应用,空间环境中无线电信号日益密集,自然干扰和人为干扰日益严重,通信接收、频谱监视等应用中遇到的混合信号越来越多。这类信号容易发生频谱混叠,无法采用传统的时分频分方法进行分离,因而需要研究通信信号的盲源分离技术^[1]。盲源分离技术起源于20世纪80年代几位法国学者在神经生理方面的研究^[2-3],国内对盲源分离问题的研究始于20世纪90年代。2001年,张贤达和保铮等^[4]发表了一篇关于盲源分离的综述性文章,对盲源分离的理论、方法和应用进行了概括,并做出展望。从此大量学者开始关注盲源分离理论,并将此理论与自身研究领域相结合。

近年来大量学者^[5-16]开始将此技术应用于通信信号的分离,重点解决频谱混叠、空间上距离较近的混合通信信号分离问题。大多学者研究内容主要集中在分离算法上,并将满足盲源分离技术的基本数学假设作为已知前提,很多基于混合矩阵正定的分离算法均取得了较好的分离结果。但在实际卫星通信应用中,尤其是混合矩阵列满秩的工程实现出现困难,其困难原因有两点:①卫星通信中,即使接收天线阵元个数(接收传感器个数)大于信号源个数,仍然经常不能满足混合矩阵列满秩;②混合矩阵列满秩是个抽象的数学描述,无法直接指导实际工程下达设计技术指标。究其原因在于卫星通信与一般的盲源分离应用场景有较大不同,如在语音信号处理中所使用的传感器,围绕信号源分布在四面八方,因此一般只要传感器个数大于信号源个数就可认为是满足混合矩阵列满秩。但在卫星通信应用中,多个接收天线集中在一颗卫星上,接收天线间的阵元间距远小于卫星与信号源之间的距离;多个信号源集中在一个波束内,信号源间的距离也远小于卫星与信号源间的距离。这些情况导致即便卫星使用多阵元的阵列天线,阵元数大于信号源数,接收矩阵也不一定满足列满秩条件。

为解决以上工程应用难点,本文在前人的研究基础上,将研究目标锁定为如何将数学假设转

化为具备实际物理意义的工程设计指标。结合天线接收模型,选择矩阵条件数来衡量接收矩阵的正定性(即混合矩阵列满秩),对矩阵条件数建立最优化模型,通过寻找最优阵元间距,得到较小的矩阵条件数进而满足混合矩阵列满秩条件,为解决以上两点工程实施难题提供了一种有效途径。本文的研究对象以两个信号接收幅度相近、频谱混叠、空间上距离较近但不重叠的两个非移动信号为例进行建模分析,对于复杂的情况可以通过提升接收处理系统的复杂度,如增加阵元数、多种信号处理方法联合使用等,来满足不同的复杂应用场景。

1 基于多天线的盲源分离处理系统模型

卫星通信一般多径效应不明显,因此盲源分离模型通常可以选用线性混合模型,每个接收阵元所接收到的信号都是源信号的线性组合。那么线性瞬时混合模型表示如式(1)所列:

$$x_i(k) = \sum_{j=1}^N [a_{ij}s_j(k)], (i = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

N 为源个数, M 为阵元个数(传感器个数)。 k 为观测时间,对于数字信号来说,则表示第 k 个观测值。

写成矩阵形式,如式(2)所列:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{S}(k) \quad (2)$$

其中 \mathbf{A} 是 $M \times N$ 阶的混合矩阵。

盲信号分离的任务是在未知 \mathbf{S} 和 \mathbf{A} 的情况下,仅通过对 \mathbf{X} 的处理,得到分离矩阵 \mathbf{W} ,为了书写方便,求出源信号 \mathbf{S} 的估计 \mathbf{Y} ,对瞬时混合模型的分离表示如式(3)所列:

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{W}\mathbf{X}(k) = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{S}(k) \quad (3)$$

其中 \mathbf{W} 是 $N \times M$ 阶分离矩阵。当 $\mathbf{W}\mathbf{A}$ 是一个每行每列只有一个非零元素的矩阵时,就达到了恢复信号的目的。

如图1所示是基于多天线的盲源分离系统的示意图。前半部分是未知源信号的混合过程,后半部分是盲信号的分离过程。各个源信号 \mathbf{S}_i 由不同天线所发射,经过空间混合矩阵 \mathbf{A} 混合后得到一组信号 \mathbf{X}_i ,被多天线接收。多天线所接收到的信号 \mathbf{X}_i

是所有源信号 S_i 的混合。实际应用中混合矩阵为空间无线传输矩阵与星内有线传输矩阵的乘积,有线传输矩阵一般都有幅相一致性要求,可以简化模型将传输矩阵作为混合矩阵。

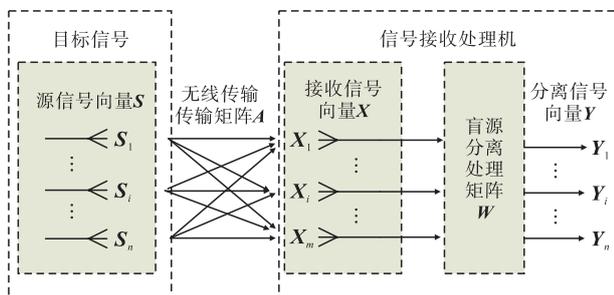


图 1 基于多天线的盲源分离系统模型

Fig.1 Model of blind source separation system based on multiple antennas

2 盲源分离的基本假设

正定条件下的盲源分离技术的使用有 3 条基本假设^[4,6,15]：

- 1) 源信号之间是相互统计独立的；
- 2) 源信号中不能有多于一个信号是高斯分布的；
- 3) 混合矩阵列满秩。

对于假设条件(1)：不同源信号所携带的通信信息是不同的,相互之间的信息是互不影响的,因而可以认为满足独立性假设;对于假设条件(2)：通信信号多是亚高斯信号,因而比较容易满足此假设条件;对于假设条件(3)：混合矩阵 A 列满秩,此指标较为抽象,在其他信号处理领域一般传感器个数大于信号源个数即可满足,但卫星通信信号一般使用多个阵元的阵列天线进行接收,且阵元间距远小于传输距离,因此即使阵列天线的阵元数大于信号源个数也容易出现混合矩阵为欠定矩阵的情况。为了建模方便,采用矩阵条件数对混合矩阵的正定性进行衡量。

3 最优天线间距的优化模型

以接收窄带信号的均匀分布的多天线为例,给出混合矩阵 A 的数学模型。设 $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 是未知的具有零均值单位方差的相互独立的 n 维非高斯源信号矢量,以 θ_i 角入射到间距为半波长的均匀分布的多天线阵(天线数为 m),如图 2 所示。

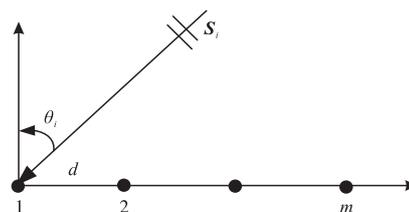


图 2 均匀分布的多天线示意图

Fig.2 A multi antenna model with uniform distribution

则混合阵列 A 为列满秩的 $m \times n (m \geq n)$ 阶未知混合复数矩阵,如式(4)所列：

$$A(\theta) = [p_1\alpha(\theta_1), p_2\alpha(\theta_2), \dots, p_n\alpha(\theta_n)] \quad (4)$$

其中, p_1, p_2, \dots, p_n 为幅度加权值,不同频率的信号一般采用传统频分方式即可分离。本文重点针对频谱混叠的且幅度相近的通信信号为简化模型,设其幅值加权值均为 1,将不同源信号的接收频率简化为频率相同,因此统一用 f 。通信信号一般可以采用复数表达式以保证相位信息,因此所有模型均为复数模型。来波方向为 θ_i 的信号的方向矢量 $\alpha(\theta_i)$ 为：

$$\alpha(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1, \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_i\right), \dots, \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)\sin\theta_i\right) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1, \exp\left(j\frac{2\pi f}{c}d\sin\theta_i\right), \dots, \exp\left(j\frac{2\pi f}{c}d(m-1)\sin\theta_i\right) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式(5)中, d 为多天线的天线间距, λ 为波长。 c 为电磁波传播速度,近似为光速 3×10^8 m/s, f 为信号的载波频率。

为保留相位信息,通信信号常用复数形式表达,文献[6]指出混合矩阵可以通过矩阵条件数进行衡量,并给出了复数形式下的混合矩阵 A 的计算方法,因而为衡量混合矩阵的病态性, $A^H A$ 的条件数为：

$$cond(A^H A) = \|A^H A\|_F \cdot \|(A^H A)^{-1}\|_F \quad (6)$$

式(6)中 $\|\cdot\|_F$ 表示范数,本文采用的是二范数,将式(4)与式(5)代入式(6),由此可见,多天线的天线间距 d 、信号的载波频率 f 、源个数 n 、以及信号的来波方向 θ_i ,均对混合矩阵 A 产生影响。但是由于受实际天线尺寸等因素制约,全局最优值可能难以满足使用条件,此时可以通过选择条件数较小的局部最优解进行代替。

综上,混合矩阵的条件数与信号来波方向、载波频率、源个数以及多天线的天线间距 4 个因素有

关,来波方向、载波频率与源个数是非合作目标不可控,只有天线间距 d 是可以人为设计的。即对于指定载波频率的源信号,并且来波方向 θ_i 也确定,通过选择一个合适的天线间距 d ,可使混合矩阵的条件数达到最小,进而满足分离算法所需的混合矩阵列满秩假设。此问题可以归结以矩阵条件数为目标函数、天线间距 d 为变量、其他因素为参量的多参量最优化问题,优化模型为:

$$\begin{aligned} & \min_{d \in \mathbb{R}} \text{cond}(\mathbf{A}(d)^H \mathbf{A}(d)) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} d \geq 0 \\ d_{\max} - d \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

模型中,变量 d 代表实际天线的间距,具有实际物理意义,因此需满足正实数条件,由于天线间距不能无限大,因而设定其最大距离不超过 d_{\max} 。卫星的阵列天线规模是受限的,过大则无法发射至太空,因此 d_{\max} 受制于卫星与火箭的共同约束。对于两个源信号的情况,本文根据个人经验在 10 倍波长以内即可找到最优解,因此可以设定 d_{\max} 不超过 10 倍波长。 $\text{cond}(\mathbf{A}(d)^H \mathbf{A}(d))$ 的定义由式(6)给出,由式(4)可知 $\mathbf{A}(d)$ 的表达式如式(8)所列:

$$\mathbf{A}_\theta(d) = [\boldsymbol{\alpha}_{\theta_1}(d), \boldsymbol{\alpha}_{\theta_2}(d), \dots, \boldsymbol{\alpha}_{\theta_n}(d)] \quad (8)$$

式中,与式(4)不同的是,矩阵 $\mathbf{A}(d)$ 以角度向量 $\boldsymbol{\theta}$ 为参量,将 d 作为变量的矩阵函数。与式(5)相类比得到 $\boldsymbol{\alpha}_{\theta_i}(d)$ 的表达式,如式(9)所列:

$$\begin{aligned} & \boldsymbol{\alpha}_{\theta_i}(d) = \\ & \left[1, \exp\left(j \frac{2\pi f}{c} d \sin \theta_i\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi f}{c} d (m-1) \sin \theta_i\right) \right]^T \end{aligned} \quad (9)$$

当给定一组个数已知、来波方向为 $\boldsymbol{\theta}$ 、载波频率为 f 信号向量时,利用式(7)所给出的优化模型即可求出,最佳天线间距 d 。最优化理论的研究内容,一方面是建立最优化模型,另一方面是优化算法,根据不同的优化模型与计算规模使用不同的优化算法。本文的重点是建立优化模型而非优化算法,简化模型后,计算量较小,为研究方便与直观理解,采用枚举法进行仿真分析。

4 实验仿真与分析

本小节以两个源信号、两个接收天线为例进行仿真分析,由于只考虑两个接收天线情况,则式(5)可简化为:

$$\boldsymbol{\alpha}(\theta_i) = \left[1, \exp\left(j \frac{2\pi f}{c} d \sin \theta_i\right) \right]^T \quad (10)$$

由于只考虑两个源信号并假定 p_1, p_2 幅度加权值为 1,为便于分析引入 θ 为基准来波方向, $\Delta\theta$ 为来波方向角度差值, $\theta = \theta_1, \Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 将式(10)代入式(4)可得:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1, & 1 \\ \exp\left(j \frac{2\pi f}{c} d \sin \theta\right), & \exp\left(j \frac{2\pi f}{c} d \sin(\theta + \Delta\theta)\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

需分析的因素有天线间距、载波频率和来波方向三项。首先根据实际的物理场景,分析并确定仿真条件,进而确定仿真方案,最后对仿真结果进行分析。

1) 以两个源信号,两个接收天线为例,设载波频率为 2.5 GHz 的信号。基准来波方向角 θ 为 -5° 时, $\Delta\theta$ 取 10° ,基准来波方向角 θ 为 0° 时, $\Delta\theta$ 取 0.5° 。观察天线间距 d_{opt} 与混合矩阵 $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ 条件数的关系。

2) 以两个源信号,两个接收天线为例,设基准来波方向角 θ 为 0° , $\Delta\theta$ 取 0.5° ,分别在载波频率 2.5 GHz、8 GHz 和 15 GHz 时,观察天线间距 d 的变化对混合矩阵 $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ 条件数的影响,比较 3 种情况下所得最佳的天线间距。

3) 以两个源信号,两个接收天线为例,设载波频率为 2.5 GHz,设两个来波方向的角度差分别为 0.5° 与 10° 。当基准来波方向 θ 从 -60° 到 60° 、以 0.5° 的间隔变化时,设定 $d_{\max} = 15 \text{ m}$,分别求出最佳天线间距,绘制曲线并观察规律。

仿真一:当 $\Delta\theta$ 取 10° 时,天线间距 d 与混合矩阵 $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ 条件数的关系如图 3 与图 4 所示。需要指出的是图 3 是对结果进行了截取,仅画出了间距 d 在 0 到 10 米以内并且条件数小于 3 的情况。由此图可得出的首要结论是,最优的间距 d 会重复出现。为进一步分析,对图 3 进一步截取得到图 4,图 4 是间距 d 在半波长与 3 倍波长之间的取值。一般情况下,阵列天线的理想间距是半波长,但若取半波长的间距会使得指定阵列口径的阵元过多,增加成本,并且为防止馈源间产生互耦作用,所需工艺复杂,间距过大则合成后的波束主瓣分裂,因而实际工程中多不选半波长为阵元间距,一般不能超过 3 个波长。图 4 中,在 3 倍波长以内便取到了 1 个局部最优的阵元间距 d_{opt} ,说明当两个信号的入射方向角差值较大时,一般阵列天线的相邻两个阵元即可满足盲源分离的条件。

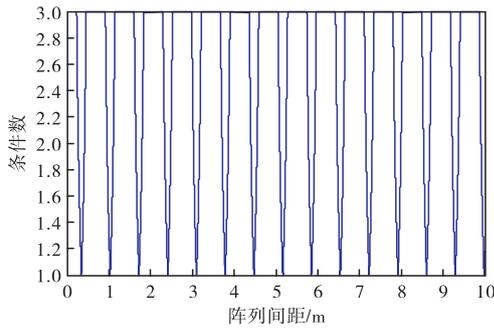


图 3 在 10 m 内的天线间距 d 与混合矩阵 $A^H A$ 条件数的关系图

Fig. 3 Relation between antenna spacing d within 10 m and condition number of mixed matrix $A^H A$

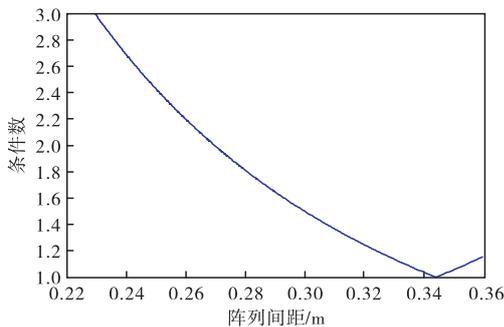


图 4 在 3 倍波长内的天线间距 d 与混合矩阵 $A^H A$ 条件数的关系图

Fig. 4 Relation between antenna spacing d and condition number of matrix $A^H A$ in 3 times wavelength

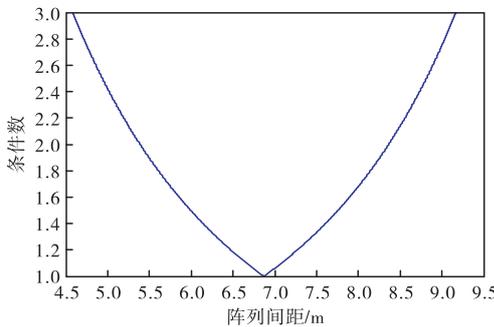


图 5 载波 2.5 GHz、入射角相差 0.5° 天线间距 d 与矩阵 $A^H A$ 条件数的关系图

Fig. 5 Relationship between carrier 2.5 GHz, incidence angle difference of 0.5° , antenna spacing d and condition number of matrix $A^H A$

当取 $\Delta\theta$ 取 0.5° 时, 天线间距 d 与混合矩阵 $A^H A$ 条件数的关系如图 5 所示。当 $d = 6.8757\text{ m}$ 时, 矩阵 $A^H A$ 取到最小值, 最小值为 1.0001。此时在 3 倍波长以内没有局部最优值。此时, 对于直线阵列, 只要整个阵列的口径大于 6.8757 m , 可以选

取满足距离关系的两个非相邻的阵元进行接收, 进而进行盲源分离处理。

仿真二: 当载波频率 f_1 为 2.5 GHz 时。如图 5 所示, 当 $d_1 = 6.8757\text{ m}$ 时, 矩阵 $A^H A$ 取到最小值, 最小值为 1.0001。当载波频率 f_2 为 8 GHz 时, 如图 6 所示, 当 $d_2 = 2.1486\text{ m}$ 时, 矩阵 $A^H A$ 取到最小值, 最小值为 1.0000。当载波频率 f_3 为 15 GHz 时, 如图 7 所示, 当 $d_3 = 1.1459\text{ m}$ 时, 矩阵 $A^H A$ 取到最小值, 最小值为 1.0000。对 3 次的仿真数据进行比较, 首先比较三者的频率, 如式 (12) 所列:

$$f_1 : f_2 : f_3 = 2.5 : 8 : 15 = 1 : 3.2 : 6 \quad (12)$$

再将 3 次所得的最优间距相比较, 如式 (13) 所列:

$$\frac{1}{d_1} : \frac{1}{d_2} : \frac{1}{d_3} = \frac{1}{6.8757} : \frac{1}{2.1486} : \frac{1}{1.1459} = 1 : 3.2001 : 6.0003 \quad (13)$$

最后, 比较式 (12) 与式 (13) 可得局部最优间距与载波频率成反比。

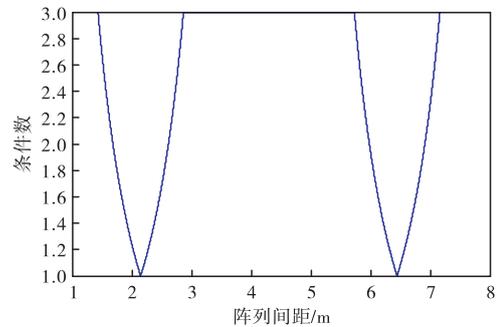


图 6 载波 8 GHz、入射角相差 0.5° 天线间距 d 与矩阵 $A^H A$ 条件数的关系图

Fig. 6 Relation between the number of conditions of matrix $A^H A$ and the antenna spacing d with carrier 8 GHz and incidence angle difference of 0.5°

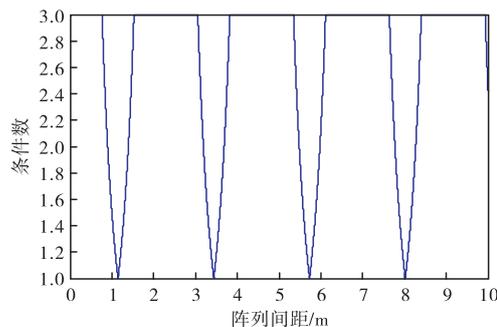


图 7 载波 15 GHz、入射角相差 0.5° 天线间距 d 与矩阵 $A^H A$ 条件数的关系图

Fig. 7 Relation between carrier 15 GHz, incidence angle difference of 0.5° , antenna spacing d and condition number of matrix $A^H A$

仿真三:仿真结果如图8与图9所示,图8为基准入射方向取不同值时最佳天线间距的计算结果。图9与图8相对应,当取定某一来波方向,计算出最优的天线间距时矩阵条件数所计算的结果。

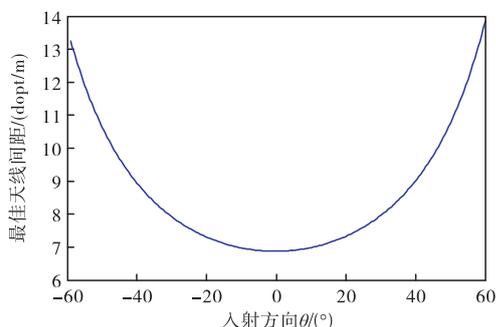


图8 $\Delta\theta$ 取 0.5° 时最佳天线间距与基准入射方向角 θ 的关系

Fig. 8 Relationship of minimum condition number and reference incidence direction angle θ when $\Delta\theta = 0.5^\circ$

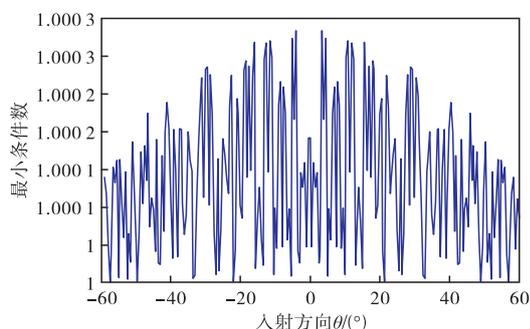


图9 $\Delta\theta$ 取 0.5° 时最小条件数与基准入射方向角 θ 的关系
Fig. 9 Relationship of minimum condition number and reference incidence direction angle θ when $\Delta\theta = 0.5^\circ$

首先,对优化结果的可取性进行分析。由图9可见,当间距 d 达到局部最优 d_{opt} 时,矩阵条件数十分接近1,说明模型寻优结果有效,所寻得的天线间距可以满足列满秩。

其次,再分析图8的物理意义。如图2所示基准来波方向角 θ 为天线阵的信号来波方向与天线阵列法线的夹角,此夹角越小,最优天线间距越小,当 θ 为 0° 时,所得最佳天线间距为6.87 m,其物理含义为接收天线阵列正对着信号,更利于满足混合矩阵列满秩假设。

最后,分析曲线规律。图8左右并不对称,右侧要比左侧略高,这是因为 $\Delta\theta$ 取 0.5° ,为正数。如图10所示,当 $\Delta\theta$ 取 -0.5° 时,左侧比右侧略高。初步分析是法线方向指向两个信号中间将获得更优的天线间距。为进一步验证此结论,分别取 $\Delta\theta$ 为 $\pm 10^\circ$ 进行比较。图11是在为 $\Delta\theta$ 取 -10° 的仿真结

果,曲线左侧比右侧高,而在 $\Delta\theta$ 取 10° 的情况下,所得结果如图12所示,曲线右侧要比左侧高。对比结果表明,天线阵列正对着信号,并且正对着两个信号的中间位置最佳。

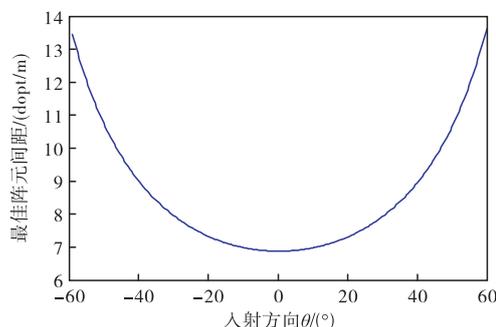


图10 $\Delta\theta$ 取 -0.5° 时最佳天线间距与基准入射方向角 θ 的关系

Fig. 10 Relationship of optimum antenna spacing and reference incident angle θ when $\Delta\theta = -0.5^\circ$

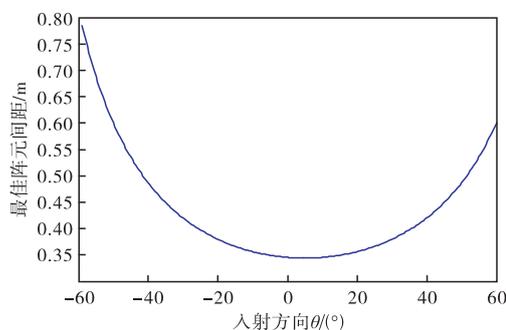


图11 $\Delta\theta$ 取 -10° 时最佳天线间距与基准入射方向角 θ 的关系

Fig. 11 Relationship of minimum condition number and reference incidence direction angle θ when $\Delta\theta = -10^\circ$

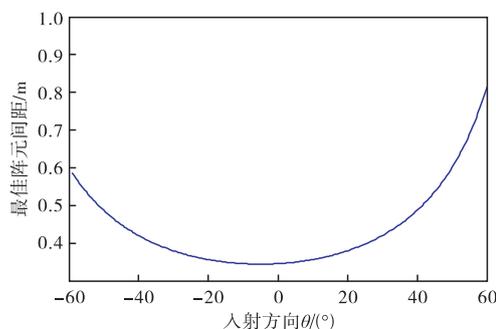


图12 $\Delta\theta$ 取 10° 时最佳天线间距与基准入射方向角 θ 的关系

Fig. 12 Relationship of minimum condition number and reference incidence direction angle θ when $\Delta\theta = 10^\circ$

4 结论

如何将盲源分离的基本数学假设转换为工程

可实现的技术指标,是利用盲源分离技术分离频谱混叠通信信号的关键问题。本文针对此关键问题进行了研究,通过将矩阵条件数作为目标函数,建立优化模型,将抽象的列满秩数学假设转换为具体的寻找最优天线间距设计,进而具备工程可操作性。研究表明:在此优化模型下,可以找到最优的天线间距使得混合矩阵的矩阵系数接近 1,进而满足盲源分离的列满秩数学假设。最优的天线间距会重复出现,局部最优间距与载波频率成反比。天线阵列正对着源信号,并且正对着两个信号的中间位置最佳。此三点结论与实际应用的物理现象相符,优化模型所得出的结果有效。本文以两个信号源进行仿真分析,当需要分离更多信号的混合情况时,以此进行拓展,为大规模的阵列天线阵元间距设计,为阵元数量加减优化设计给予理论支撑,在大规模阵列中选取不同间距的阵元来达到不同源信号的分离。

本文以简单的均匀线阵为例进行建模,为实现盲源分离技术在卫星通信中的广泛应用,下一阶段还需结合不同类型的天线接收模型建立优化模型。

参考文献:

- [1] 刘治军,梁宗闯,邱乐德,等.一种同频非合作航天器通信信号的盲源分离算法[J].航天器工程,2015,24(6):20-26.
- [2] JUTTEN C, HERAULT J. Blind separation of sources, part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture[J]. Signal Processing, 1991, 24(1):1-10.
- [3] COMON P, JUTTEN C, HERAULT J. Blind separation of sources, part II: Problems statement[J]. Signal Processing, 1991, 24(1):11-20.
- [4] 张贤达,保铮.盲信号分离[J].电子学报,2001,29(S1):1766-1771.
- [5] 钟雲.单载波体制卫星信号盲分离关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [6] 万坚,涂世龙,廖灿辉,等.通信混合信号盲分离理论与技术[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [7] 李红光,郭英,齐子森,等.复杂电磁环境下多跳频信号盲检测[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(7):13-19.
- [8] 周长霖,王春阳,宫健,等.基于干扰重构和盲源分离的混合极化抗 SMS-P 干扰[J].北京航空航天大学学报,2021,47(9):1841-1848.
- [9] 周治宇,陈豪.空间同频电子侦察信号的盲分离[J].中国空间科学技术,2009,29(3):10-15+22.
- [10] 余彦.单通道混叠图像盲源分离算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [11] 王少波,郭英,睦萍,等.欠定条件下同步组网跳频信号盲源分离方法[J].计算机工程,2020,46(10):166-172+181.
- [12] 温柔,孙惜媛,何姿,等.基于密度聚类和 l_p 范数最小化的空中微动群目标盲源分离技术研究[J].空间电子技术,2022,19(2):1-8.
- [13] 田宝平,应昊蓉,杨文境,等.结合 ICA 和复数神经网络的双麦阵列盲源分离方法[J].信号处理,2021,37(11):2185-2192.
- [14] 高忻.复杂电磁环境下的信号分选与识别关键技术研究[实现][D].成都:电子科技大学,2020.
- [15] AAO H, JUHA K, ERKKI O. 独立成分分析[M].周宗潭,译.北京:电子工业出版社,2007.
- [16] 刘慧,倪育德,刘鹏.基于松弛改进 FastICA 算法的星基 ADS-B 信号分离[J].电讯技术,2020,60(2):203-209.

作者简介:刘治军(1988—),黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,工程师。主要研究方向为信号处理与测控系统设计工作。E-mail: liuzixing1988@163.com