

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.001

引用格式:赵宏伟,刘波,谢广钱,等.基于压缩感知的卫星干扰源定位[J].电讯技术,2015,55(5):467-471. [ZHAO Hongwei,LIU Bo,XIE Guangqian, et al.Satellite Interference Localization Based on Compressive Sensing Theory[J].Telecommunication Engineering,2015,55(5):467-471.]

基于压缩感知的卫星干扰源定位*

赵宏伟**,刘 波,谢广钱,刘 恒

(西安空间无线电技术研究所,西安 710100)

摘 要:针对传统测向方法实际应用性能较差的问题,提出了一种基于压缩感知的卫星干扰源定位方法。根据干扰信号方位角的空间稀疏性,建立了波达方向(DOA)估计模型,构造出基于阵列流型的过完备原子库和随机单位向量测量矩阵,最后结合信源估计技术和正交匹配追踪(OMP)算法实现干扰目标的方位估计。仿真验证了该方法能同时估计相干干扰信号的强度和角度,适合快速变化的干扰目标定位,并且具有较低的计算复杂度和更好的工程易用性。相关研究对压缩感知理论在卫星干扰源定位中的应用具有一定参考意义。

关键词:卫星干扰源定位;波达方向估计;压缩感知;正交匹配追踪

中图分类号:TN975 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)05-0467-05

Satellite Interference Localization Based on Compressive Sensing Theory

ZHAO Hongwei,LIU Bo,XIE Guangqian,LIU Heng

(Xi'an Institute of Space Radio Technology,Xi'an 710100,China)

Abstract:The conventional direction finding methods have poor performance in the actual application. A satellite interference localization method based on the compressive sensing(CS) theory is proposed. Based on the interference signal angle's sparseness in angle space,the corresponding direction of arrival(DOA) model,and the over-complete dictionary of atoms and measuring matrix by randomly sampling unit vector are constructed. Combined with the source estimation technology,the estimation using orthogonal matching pursuit(OMP) algorithm is obtained. The simulation results show that the method can estimate simultaneously the coherent signal amplitude and bearing and is suitable for the rapidly moving interference targets. It has smaller computational load and better engineering usability. Research in this paper promotes the application of compressive sensing in satellite interference localization.

Key words:satellite interference localization;direction of arrival estimation;compressive sensing;orthogonal matching pursuit

1 引 言

卫星通信是实现全球移动通信必不可少的手段之一^[1],通信卫星广泛采用的广播型通信方式使通信链路易受干扰。如何精确定位干扰源是卫星通信

领域必须要解决的关键问题。美国 Milstar 卫星可在检测到干扰源后,迅速将天线零点对准干扰源抑制干扰。

卫星通信系统实现干扰源定位的技术途径主要

* 收稿日期:2014-12-16;修回日期:2015-03-10 Received date:2014-12-16;Revised date:2015-03-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201089)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61201089)

** 通讯作者:hony88@163.com Corresponding author:hony88@163.com

有:到达时间差测向,需要两颗通信卫星相互配合实现;幅度比较式测向,灵敏度低;相位干涉仪测向,不具备同频信号或同信道信号的测向能力。上述这些技术都难以实现多个干扰源的精确定位。结合卫星天线多波束特性,基于阵列信号处理的波达方向(Direction of Arrival, DOA)估计技术在卫星多目标定位领域得到了广泛的关注^[2-3]。然而, MUSIC 算法等经典方法在高信噪比、足够大的快拍数以及非相干信号源条件下,才可以很好地实现目标定位。

压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论是信息论和信号处理领域的一项新兴技术^[4-5]。基于阵列接收信号的空域稀疏性,可将 CS 理论应用到空域多目标测向中,其主要优势是天线阵元分布形式、接收信号的相干性都不影响测向性能,对快拍数要求比较低,并且能够较好地重构信号强度。文献[6-7]研究了低信噪比和模型失配时的压缩感知 DOA 估计方法,文献[8]研究了高斯随机矩阵作为测量矩阵的压缩感知空间谱估计方法,文献[9-11]研究了压缩感知测向在雷达、声矢量阵中的应用,这些文献多采用设置噪声功率参数以及谱峰搜索的方法获取方向估计值,然而在实际应用中难以估计合适的参数,搜索导致算法处理的实时性较差;高斯矩阵作为测量矩阵,计算复杂度高,不利于工程硬件实现。

在卫星干扰源定位的应用背景下,本文提出一种基于压缩感知的干扰源定位方法。该方法借助信源估计技术获得干扰信号个数,采用正交匹配追踪算法直接获得角度估计值,避免设置噪声功率参数和谱峰搜索;采用随机单位向量矩阵代替高斯测量矩阵,算法复杂度低,易于工程硬件实现。

2 压缩感知 DOA 估计模型

由 M 个阵元组成直线阵,假设 K 个窄带干扰信号入射,由于实际干扰目标仅占据少量的空间角度分辨单位,因此干扰目标可以构成一个稀疏向量,构造 $N \times L$ 维的稀疏向量矩阵 $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$, $N(N \gg K)$ 为空间角度数量, L 为快拍数量。稀疏向量矩阵 $\mathbf{S}(t)$ 的 N 个行向量中有 K 个非零向量,分别对应着实际的 K 个信号,其余 $N-K$ 个行向量为零向量(或极小值,代表背景噪声值)。

构造 $M \times N$ 维过完备原子库 Ψ 和 $P \times M$ 维测量矩阵 Φ ,则基于压缩感知理论的 DOA 估计模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(t) &= \Phi \mathbf{X}(t) = \Phi \Psi \mathbf{S}(t) + \Phi \mathbf{E}(t), \\ \min \|\mathbf{S}(t)\|_0 \\ \text{s. t. } \|\mathbf{Y}(t) - \Phi \Psi \mathbf{S}(t)\|_2 &\leq \varepsilon. \end{aligned} \tag{1}$$

式中, $\mathbf{E}(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_M(t)]^T$ 为阵列测量噪声矢量,服从复高斯分布;假设通信功率比干扰功率低很多,将其近似为噪声; ε 为正则化系数。

采用重构算法对 $\mathbf{S}$ 进行恢复重建,得到其估计值 $\hat{\mathbf{S}}$,功率谱为

$$P_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\hat{S}_{i,l}|^2, i=1, 2, \dots, K. \tag{2}$$

3 压缩感知 DOA 估计算法实现

3.1 基于阵列流型的过完备原子库

由于固定的正交矩阵无法有效地表示未知规律的信号,并且表示信号的结构类型单一。基于过完备原子库(Over-complete Dictionary of Atoms)的信号表示方法是目前信号表示的一个重要方向。

DOA 估计中,在整个搜索空间的 $N(N \gg K)$ 个角度上进行扫描,使其包含所有可能的空间角度,扩展阵列流型矩阵构造 $M \times N$ 维的过完备原子库

$$\Psi = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_N)]. \tag{3}$$

式中, $a(\theta_i)$ 为第 i 个信号的导向矢量, $a(\theta_i) = [1, \exp(-j2\pi d_2 \sin\theta_i/\lambda), \dots, \exp(-j2\pi d_M \sin\theta_i/\lambda)]^T$, d_j 为第 j 个阵元到第一个阵元的距离, λ 为波长。

3.2 随机单位行向量测量矩阵

高斯随机矩阵在理论上容易满足压缩感知的约束等距性(Restricted Isometry Property, RIP)条件,但存在计算复杂度高、工程难以实现的问题。采用一种新型的单位行向量组合矩阵构造 $P \times M$ 维测量矩阵 Φ , $P(P < M)$ 为压缩维数。构造过程如下:

- (1) 定义 $\Phi_{M \times P}^T = [I_1^T, I_2^T, \dots, I_P^T]$, I_i 为单位行向量;
- (2) 任意 $i \in \{1, 2, \dots, P\}$, $I_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$, 其中 1 的位置为 $(i, c(i))$, $c(i) \in \{1, 2, \dots, M\}$;
- (3) 且当 $i \neq j (i, j \in \{1, 2, \dots, P\})$, $c(i) \neq c(j)$ 。

测量矩阵 Φ 对稀疏信号 $\mathbf{S}(t)$ 进行维数压缩,减少了投影测量数据量,降低了算法的计算复杂度。感知矩阵 $\Theta = \Phi \Psi$ 可理解为逆傅里叶变换矩阵的行随机抽取子阵,满足 RIP 条件,保证了采用压缩感知重构算法进行 DOA 估计的有效性和稳健性^[7]。

3.3 OMP 重构算法

相比凸松弛类算法,贪婪类算法在计算效率方

面具有较大优势,因此采用正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 算法求解。其基本思想是在每一次的迭代过程中,从完备原子库中选择与测量信号最匹配的原子来构建稀疏逼近,并求出信号表示残差;然后继续选择与信号残差最为匹配的原子,同时递归的选择原子集合进行正交化以保证迭代的最优性,满足迭代结束条件时,信号可以由一些原子线性稀疏表示^[8]。

3.4 算法步骤

基于压缩感知的干扰信号 DOA 估计算法步骤总结为:

- (1) 利用接收信号数据构建数据矢量 $\mathbf{X}(t)$;
- (2) 对搜索空间进行等间隔取角,得到 N 个角度,构造过完备原子库 Ψ ;
- (3) 构建随机单位行向量测量矩阵 Φ , 解决高斯随机矩阵的高计算度和工程难以实现等问题;
- (4) 目前文献多通过设置参数 ε 来求解模型 (1), ε 与噪声功率有关,实际应用中估计合适的 ε 值是非常困难的,不合适的 ε 值会导致算法的过估计或欠估计。为避免设置 ε 值,这里借助信源估计技术获得干扰源数 K ;
- (5) 将 OMP 算法的终止条件设置为最大迭代次数 K ,对信号 $\mathbf{S}$ 进行恢复重构,直接得到 K 个信号的功率谱值以及对应的目标角度值,避免了高复杂度的角度搜索。

3.5 复杂度分析

卫星上的应用技术应易于硬件实现,在保证实际性能的前提下,选择计算复杂度较低的算法。对本文算法和 MUSIC 算法的计算复杂度进行分析。对于 $M \times L$ 维的阵列接收数据,空间维度为 N , MUSIC 算法的计算量主要包括构造协方差矩阵、特征值分解、计算空间谱和谱峰搜索上,前三者的计算复杂度为 $O(M^2L+M^3+M^2N)$,简单的取极大值搜索谱峰方法,计算复杂度为 $O(N)$ 。压缩感知 DOA 估计算法的运算量主要为构建 $P \times N$ 维感知矩阵和 OMP 重构算法,两者的运算量为 $O(PMN+KMN)$ 。比较可知,在信号源数 K 、阵列数 M 、搜索空间维度 N 一定的情况下,调整压缩维数 P 能使压缩感知的复杂度低于 MUSIC 算法。

4 仿真实验与分析

本节通过非相干和相干干扰信号与传统的 MUSIC 算法进行比较,验证算法的有效性。假设干扰

目标为窄带随机信号,信号形式不限,信号幅度服从零均值、方差为 1 的复高斯变量;加性复高斯噪声与干扰信号互不相关,不考虑通道不一致性和互耦等的影响。仿真不局限于均匀直线阵,阵元之间的间隔随机设置为 $[0.4\lambda, 0.6\lambda]$, λ 为波长。假设观测空间 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 中存在 5 个干扰源,方位角依次为 -8.9° 、 -5.6° 、 -1.2° 、 3.5° 和 7.8° 。

定义角度估计误差的均方值为

$$RMSE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (\theta_{k,j} - \theta_k)^2} \tag{4}$$

式中, J 为独立蒙特卡罗试验次数,设置为 1000; K 为干扰源个数; θ_k 为第 k 个干扰源方位真实值; $\hat{\theta}_{k,j}$ 为第 j 次蒙特卡罗试验对第 k 个干扰源的估计值。

4.1 阵元数及空间维数等因素的影响分析

观测空间维数 N 决定了估计结果的精度。当采用较小的空间维数构造原子库时,空间间隔较大,无法区分一个间隔内的不同信号。当采用较大的维数时,可以有效地提高估计精度,但是增加了计算量;对于两个足够靠近的单元,相应原子的相关性会增大,导致无法有效区分这两个单元。压缩感知理论要求, $2K < \text{spark}(\Theta) < N$, $\text{spark}(\Theta)$ 代表感知矩阵 Θ 的列向量达到线性相关的最小列数。通过仿真验证,对于观测空间 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 中的 5 个干扰目标,空间维数为 41 ~ 201 时,算法具有较高的稳健性。

在稀疏目标个数 K 、空间维数 N 一定的情况下,OMP 算法要以极大概率进行准确的信号重构,阵元数 M 、压缩维数 P 应满足 $K \times \text{lb}(N/K) \leq P \leq M$ 。图 1 给出了 DOA 估计误差随压缩维数的变化曲线,其中阵元数为 50,干噪比 (Interference to Noise Ratio, INR) 为 10 dB,快拍数为 10。随着压缩维数的增加,DOA 估计的误差逐渐变小。当压缩维数大于 30 时,误差已经相对稳定。

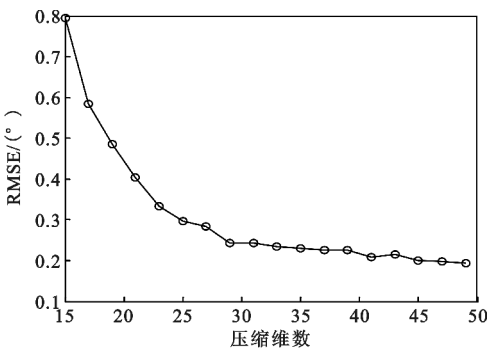


图 1 非相干干扰 DOA 估计误差随压缩维数变化曲线
Fig. 1 RMSE of noncoherent interferences DOA estimation versus compressed dimension

4.2 非相干与相干干扰源估计性能

假设干扰 1 和干扰 2 为相干信号,干噪比 10 dB、快拍数为 10 时,基于压缩感知的 DOA 估计结果如图 2 所示。压缩感知对于信号的相关性不敏感,估计结果与对独立信号的估计结果一致,这是由于算法是将阵列接收信号分解到各个方向向量张成的空间上来考察其能量分布,而非分解到正交的噪声子空间和信号子空间。

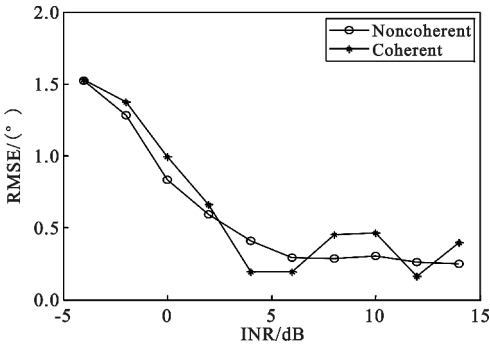


图 2 DOA 估计误差随干噪比变化曲线
Fig. 2 RMSE of DOA estimation versus INR

4.3 快速变化干扰信号估计性能

对于快速变化的干扰目标定位,要求在小快拍数甚至单快拍下实现目标角度的良好估计。图 3 为不同快拍下,MUSIC 算法和 CS 算法的 DOA 估计误差随干噪比的变化曲线。CS 算法和 MUSIC 算法都随干噪比增大,估计误差变小,成功概率变大。对于 CS 算法,快拍数从 1 变到 5 的时候,算法性能有较大改善;快拍数增至 10,算法性能趋于稳定;随着快拍数继续增加至 100,算法只是对低于干噪比 5 dB 的情况有较大改善。而 MUSIC 算法需要较高干噪比、足够大的快拍数才能正确划分信号和噪声子空间,获得精确的角度估计结果。

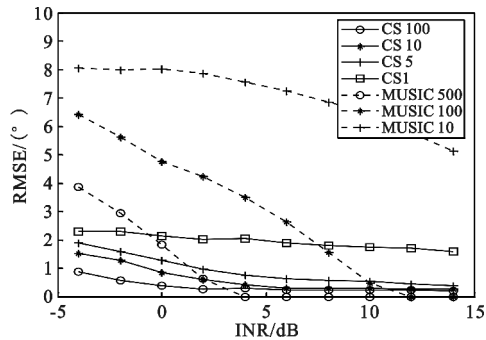


图 3 不同快拍数,非相干干扰 DOA 估计误差随干噪比变化曲线
Fig. 3 RMSE of noncoherent interferences DOA estimation versus INR in different numbers of snaps

4.4 干扰源角度与强度的估计性能

假设 5 个干扰源的干噪比分别为 20、10、10、10 和 20 dB,快拍数为 10。如图 4 所示,MUSIC 曲线中谱峰位置对应信号的角度,谱峰的大小没有任何物理含义,只是用于谱峰搜索;而压缩感知理论的本质是重构来波的功率强度,因此在得到方位角度的同时,能够比较准确地重构信号强度,对抗干扰时有助于形成不同深度的零陷方向图。

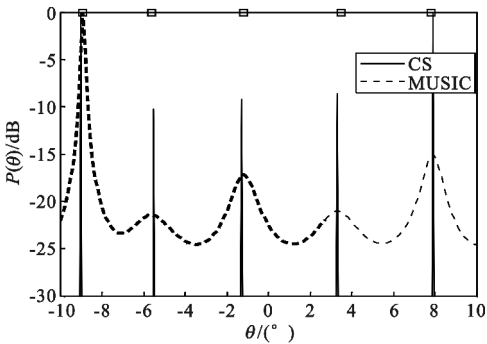


图 4 非相干干扰的空域谱估计图
Fig. 4 Spatial spectra of noncoherent interferences

5 结束语

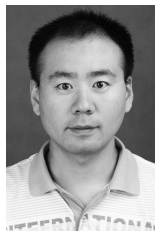
本文研究了基于压缩感知理论的卫星干扰目标 DOA 估计方法,该方法不依赖谱峰搜索,对独立信号和相干信号的处理结果基本一致,在 5 ~ 10 小快拍数甚至单快拍下,能实现信号强度和角度的良好估计,特别适用于快速变化的干扰目标定位。同时,选择合适的测量矩阵压缩维数,有助于降低算法的计算复杂度。后续工作将主要研究二维 DOA 参数(方位角和仰角)的提取,以及测量矩阵的易实现性、重构算法的抗噪性和精确性等问题改进。

参考文献:

[1] 徐烽,陈鹏. 国外卫星移动通信新进展与发展趋势[J]. 电讯技术,2011,51(6): 156-161.
XU Feng, CHEN Peng. Development progress and trends of foreign mobile satellite communication[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(6): 156-161. (in Chinese)
[2] James H G. High-frequency direction finding in space[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(7): 3478-3486.
[3] 程安启,王华力. 基于卫星平面阵列多波束天线波束空间的自适应调零和干扰源定位技术[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1279-1283.

- CHENG Anqi, WANG Huali. The adaptive nulling and interference localization based on beam-space of satellite planar array multi-beam antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1279-1283. (in Chinese)
- [4] Romberg J. Imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 14-20.
- [5] 吴凌华, 张小川. 压缩感知的发展与应用[J]. 电讯技术, 2011, 51(1): 120-124.
- WU Linghua, ZHANG Xiaochuan. Development and application of compressed sensing[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(1): 120-124. (in Chinese)
- [6] Malioutov D, Getin M, Willsky S A. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 3010-3022.
- [7] 王超宇, 朱晓华, 李洪涛, 等. 一种鲁棒的压缩感知高分辨率 DOA 估计方法[J]. 宇航学报, 2014, 35(5): 590-596.
- WANG Chaoyu, ZHU Xiaohua, LI Hongtao, et al. A robust high-resolution DOA estimation algorithm based on compressive sensing[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(5): 590-596. (in Chinese)
- [8] 黄传禄, 晁坤, 毛云志. 基于压缩感知的空间谱估计[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 150-157.
- HUANG Chuanlu, CHAO Kun, MAO Yunzhi. The spatial spectrum estimation based on compressive sensing[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(2): 150-157. (in Chinese)
- [9] 王园园, 刘峥, 曹运合. 基于压缩感知的米波雷达低空测角算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 667-671.
- WANG Yuanyuan, LIU Zheng, CAO Yunhe. Low-angle estimation method based on compressed-sensing for meter-wave radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 667-671. (in Chinese)
- [10] Yu Y, Petropulu A P, Poor H V. MIMO radar using compressive sampling[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1): 146-162.
- [11] 付金山, 李秀坤. 声矢量阵 DOA 估计的稀疏分解理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(3): 281-286.
- FU Jinshan, LI Xiukun. DOA estimation of acoustic vector array based on the sparse decomposition theory[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(3): 281-286. (in Chinese)

作者简介:



赵宏伟(1982—),男,山东潍坊人,2008年于东北大学获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为 DOA 估计与智能算法;

ZHAO Hongwei was born in Weifang, Shandong Province, in 1982. He received the M. S. degree from Northeastern University in 2008. He is currently working toward the Ph. D. degree.

His research concerns DOA estimation and smart method.

Email: honv88@163.com

刘波(1963—),男,湖南汉寿人,研究员、博士生导师,主要研究方向为卫星总体设计;

LIU Bo was born in Hanshou, Hunan Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns satellite system design.

谢广钱(1983—),男,江苏泰州人,博士研究生,主要研究方向为航天器设计;

XIE Guangqian was born in Taizhou, Jiangsu Province, in 1983. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns spacecraft design.

刘恒(1986—),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要研究方向为相控阵天线设计。

LIU Heng was born in Hengyang, Hunan Province, in 1986. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns phased-array antenna design.