DOI: 10.12265/j.gnss.2021020401

基于动态聚类的卫星导航信号多波束抗干扰方法

郑雅萍[1,2], 赵璐璐[1], 龚文斌[1], 邵丰伟[1], 常家超[1]
(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 200120;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘　要: 针对卫星导航抗干扰需求, 研究了基于自适应波束形成的多波束抗干扰技术. 为了解决传统固定多波束抗干扰方法在波束数目受限时无法兼顾所有导航卫星信号导致接收性能下降的问题, 提出了一种基于 K-means 聚类算法的动态指向多波束抗干扰方法. 建立天线阵列进行仿真, 结果表明, 该方法在接收的北斗卫星信号数目多于波束数目时, 抗干扰性能优于传统方法.

关键词: 卫星导航; 阵列信号处理; 多波束; 抗干扰; 聚类分析
中图分类号: P228.4; TN973.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1008-9268(2021)02-0032-05

0　引　言

卫星导航系统是人类导航史上的重要突破. 它能连续提供高精度和高速度的导航、定位和授时信息. 然而由于导航信号到达地面时非常微弱, 极易受到外界射频信号的干扰, 因此研究导航信号的抗干扰方法具有重要意义. 自适应波束形成[1] 是一种利用阵列天线方向图特性实施的空域抗干扰技术, 既能在干扰方向形成零陷, 又能对卫星信号进行增强, 使整体输出具有最大的信干噪比 (SINR), 可提高导航接收机的抗干扰性能[2-4].

导航通常需要同时接收多颗卫星信号, 多波束抗干扰技术能针对不同卫星信号形成多个波束. 在波束指向上, 传统方案一般采用固定波束指向. 文献 [5] 提出一种固定一个波束指向法线方向, 其余波束均匀分布的指向方法; 文献 [6] 将信号空间分为多个子空间, 通过最优分配策略选取多个子空间分别实现固定波束指向; 文献 [7] 对多波束固定指向的方位角和俯仰角的数目进行了分析; 文献 [8] 在改进 STAP[9] 算法的基础上, 对多波束的指向角的角度做了分析. 由于通常情况下导航接收机可以同时接收的导航卫星信号较多, 为了减轻导航接收机的处理压力和降低硬件资源开销, 通常难以做到波束数大于等于接收信号数. 因此在多数情况下, 接收信号数要多于波束数, 此时传统固定指向角的方法一般无法兼顾所有卫星信号[5-8].

针对传统方法的缺陷, 本文提出一种基于最小方差无失真响应 (MVDR)[10] 的动态指向多波束抗干扰方法. 该方案通过获取卫星信号来向的先验信息, 利用 K-means 聚类算法, 提取信号来向的聚类中心, 以该中心为波束形成的约束方向, 保证每颗卫星拥有较高输出的 SINR, 提高整体的抗干扰性能.

1　多波束抗干扰技术

1.1　自适应波束形成

自适应波束形成技术是一种有效的干扰抑制技术, 它克服了时域、频域信号处理的局限性, 在空域对干扰进行处理. 其原理图如图 1 所示.

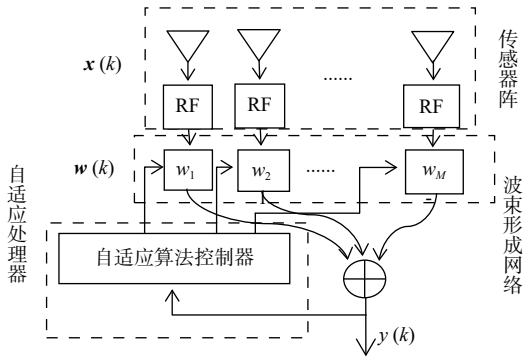

图 1　自适应波束形成技术原理图[11]

收稿日期: 2021-02-04
资助项目: 上海市启明星计划(18QA1404000); 上海市科研计划项目(18DZ1112001); 国防科技创新特区项目(17-H863-01-ZT-001-005-05)
通信作者: 龚文斌 E-mail: Spg3@163.com

假设阵元数为 M, 则 k 时刻一组接收信号为

$$\boldsymbol{x}(k) = [x_1(k),\ x_2(k),\ \cdots,\ x_M(k)]^{\mathrm{T}}. \tag{1}$$

若自适应处理器输出的加权矢量为

$$\boldsymbol{w} = [w_1,\ w_2,\ \cdots,\ w_M]^{\mathrm{T}}\ . \tag{2}$$

则对应的输出信号可以表示为

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}(k). \tag{3}$$

在波束形成算法中, MVDR 通过约束权矢量, 可以使输出信号拥有最大 SINR, 且无需期望信号序列的先验信息. MVDR 目标函数可表示为:

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{w}}\{\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}\boldsymbol{w}\},\\&\mathrm{s.t.}\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta,\varphi) = 1.\end{aligned} \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}=\mathrm{E}\{\boldsymbol{x}(k)\boldsymbol{x}^{\mathrm{H}}(k)\}$为阵列接收信号的自相关矩阵; $\boldsymbol{a}(\theta, \varphi)$ 为波束导向矢量, θ 和φ分别表示目标波束指向的俯仰角和方位角. M 个阵元组成的平面阵的导向矢量 $\boldsymbol{a}(\theta, \varphi)$ 可以表示为[12]

$$\boldsymbol{a}(\theta,\varphi) = [e^{-j\boldsymbol{k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}_1}, e^{-j\boldsymbol{k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}_2}, \cdots, e^{-j\boldsymbol{k}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}_M}]^{\mathrm{T}}. \tag{5}$$

式中: $\boldsymbol{k}=-\omega/c[\sin\varphi\cos\theta,\ \sin\varphi\sin\theta,\ \cos\varphi]^{\mathrm{T}}$ 是对应于方向 (θ, φ) 的波数向量; ω 为信号圆频率; c 为光速; $\boldsymbol{p}_m=[p_{xm}, p_{ym}, p_{zm}]^{\mathrm{T}}$ 是第 m 个阵元的位置坐标向量.

根据式 (4) 建立拉格朗日函数, 可求得最优权值如下:

$$\boldsymbol{w}_{\mathrm{opt}} = \frac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta,\varphi)}{\boldsymbol{a}(\theta,\varphi)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta,\varphi)}. \tag{6}$$

图 2 为七元均匀线阵 MVDR 的波束方向图, 由图 2 所示波束, 方向在干扰方向 (20°和 60°) 处均形成了较深的零陷, 起到抑制干扰的作用, 同时波束主瓣对准信号方向 (40°), 对有用信号产生增益, 从而实现空域滤波的目的.

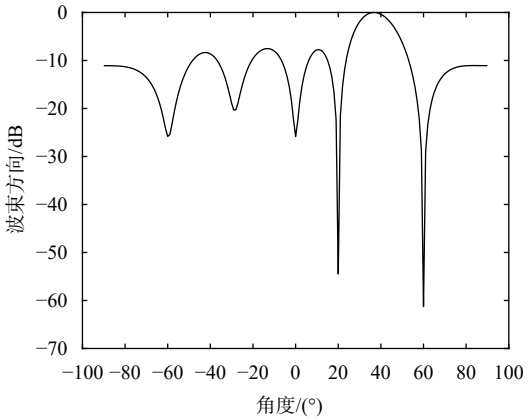

图 2　MVDR 波束方向图

1.2　多波束技术

由 1.1 节可知, 自适应波束形成技术能较好地实现信号的抗干扰. 但在实际导航中, 往往需要同时接收多颗卫星信号, 多波束技术可以针对不同卫星自适应地形成多个波束.

多波束抗干扰的原理框图如图 3 所示, 当波束数目为 N, 卫星数目为N_{S}, 干扰数目为N_{J}时, 第 n_{s} 个信号的来向为 $(\theta_{n_{\mathrm{s}}},\varphi_{n_{\mathrm{s}}})$, 第 n_{J} 个干扰的来向为 $(\theta_{n_{\mathrm{J}}},\varphi_{n_{\mathrm{J}}})$, 则 k 时刻接收信号可表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}(k) = &\sum_{n_{\mathrm{s}}=1}^{N_{\mathrm{S}}}\boldsymbol{a}(\theta_{n_{\mathrm{s}}},\varphi_{n_{\mathrm{s}}})\boldsymbol{s}_{n_{\mathrm{s}}}(k)+\\&\sum_{n_{\mathrm{J}}=1}^{N_{\mathrm{J}}}\boldsymbol{a}(\theta_{n_{\mathrm{J}}},\varphi_{n_{\mathrm{J}}})\boldsymbol{j}_{n_{\mathrm{J}}}(k)+\boldsymbol{n}_0(k).\end{aligned} \tag{7}$$

式中, $\boldsymbol{s}_{n_{\mathrm{s}}}(k)$、$\boldsymbol{j}_{n_{\mathrm{s}}}(k)$、$\boldsymbol{n}_0(k)$分别表示 k 时刻第 n_{s} 个卫星信号, 第 n_{J} 个干扰以及阵列天线的噪声矢量.

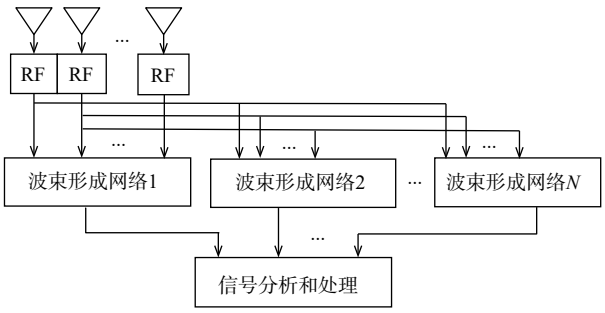

图 3　多波束抗干扰原理框图

第 n 个波束的目标函数可以表示为:

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{w}_n}\{\boldsymbol{w}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}\boldsymbol{w}_n\},\\&\mathrm{s.t.}\boldsymbol{w}_n{}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta_n,\varphi_n) = 1.\end{aligned} \tag{8}$$

其中, $1\leqslant n\leqslant N$, (θ_n, φ_n) 为第 n 个波束的指向, 根据式 (6) 可求得第 n 个波束的最优加权矢量为: $\boldsymbol{w}_n = \dfrac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_n,\varphi_n)}{\boldsymbol{a}(\theta_n,\varphi_n)^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{XX}}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_n,\varphi_n)}$.

来向为 $(\theta_{\mathrm{S}}, \varphi_{\mathrm{S}})$ 的卫星信号的波束响应为

$$\boldsymbol{F}(\theta_{\mathrm{S}},\varphi_{\mathrm{S}}) = \boldsymbol{w}_n{}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta_{\mathrm{S}},\varphi_{\mathrm{S}}). \tag{9}$$

来向为 $(\theta_{\mathrm{J}},\varphi_{\mathrm{J}})$ 的干扰信号的波束响应为

$$\boldsymbol{F}(\theta_{\mathrm{J}},\varphi_{\mathrm{J}}) = \boldsymbol{w}_n{}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta_{\mathrm{J}},\varphi_{\mathrm{J}}). \tag{10}$$

设输入信号功率为 P_{S}, 干扰功率为 P_{J}, 噪声功率为 P_n, 则经过多波束抗干扰后, 输出 SINR 为

$$\mathrm{SINR} = \frac{\left|\boldsymbol{F}(\theta_{\mathrm{S}},\varphi_{\mathrm{S}})\right|^2\cdot P_{\mathrm{S}}}{\left|\boldsymbol{F}(\theta_{\mathrm{J}},\varphi_{\mathrm{J}})\right|^2\cdot P_{\mathrm{J}}+\|\boldsymbol{w}_n\|^2\cdot P_n}. \tag{11}$$

化简后, 可得

$$\mathrm{SINR}=\frac{\left|\boldsymbol{F}(\theta_{\mathrm{S}},\varphi_{\mathrm{S}})\right|^2\cdot\mathrm{SNR}}{\left|\boldsymbol{F}(\theta_{\mathrm{J}},\varphi_{\mathrm{J}})\right|^2\cdot\mathrm{JNR}+\|\boldsymbol{w}_n\|^2}. \tag{12}$$

式中: SNR 等于 P_{S}/P_n, 表示输入 SNR; JNR 等于 P_{J}/P_n, 表示输入 JNR.

2 波束指向方向

在多波束抗干扰技术中, 波束指向 (θ_n, φ_n) 的选择决定了波束主瓣的方向. 当条件受限, 无法形成与卫星数相等的波束, 即 $N<N_{\mathrm{S}}$ 时, 传统方法通常确定若干 θ 和 φ 产生固定指向的波束. 文献 [4]提出了一种固定波束约束方案, 该方案固定一个波束于法线方向, 其余波束的俯仰角 θ 为 10°～80°的一个固定值, 方位角 φ 在空间范围内均匀分布. 该方法能较好地实现抗干扰, 但仍存在一定缺陷, 即无法兼顾全部卫星信号.

根据卫星星历数据, 可以估计卫星信号大致来向, 据此提出一种新的动态波束约束方式. 该方法根据卫星信号来向的先验信息, 利用 K-means 聚类算法, 将卫星信号来向分成 N 类, 提取信号来向 (θ, φ) 的聚类中心, 以该中心为波束形成算法的约束方向.

具体步骤如下: 1) 设定波束数目为 N, 读取卫星信号来向数据 (θ, φ); 2) 初始化聚类中心, 在数据长度范围内随机产生 N 个不同的值, 以此为下标提取对应的卫星信号方向, 作为聚类中心; 3) 分配信号来向数据点, 将信号来向数据分配到与各初始聚类中心欧氏距离最近的聚类, 产生列表, 并计算平均误差; 4) 以每一类所有点的平均值作为新的聚类中心, 更新聚类中心, 再次将数据分配到与各个新的聚类中心欧氏距离最短的聚类, 产生新的列表, 计算误差; 5) 比较前后两次误差, 若不相等则继续重复步骤 4), 否则终止循环. 流程图如图 4 所示.

通过该算法产生 N 个聚类中心, 以此作为 N 个波束的约束方向 (θ_n, φ_n), 代入多波束的数学模型, 即式 (8), 最终实现多波束抗干扰.

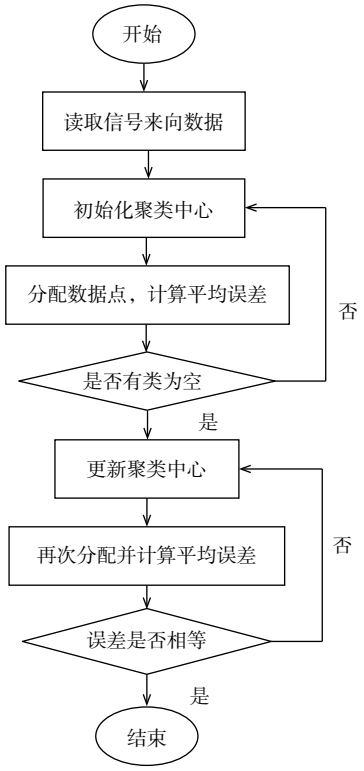

图 4 聚类算法流程图

3 仿真实验及结果分析

建立一个八元均匀圆阵, 半径 R 等于半波长. 图 5 为均匀圆阵的布阵模型, 以参考地为原点, 正北为 x 轴, 正东为 y 轴, 垂直 xoy 平面的法线为 z 轴, 建立坐标系.

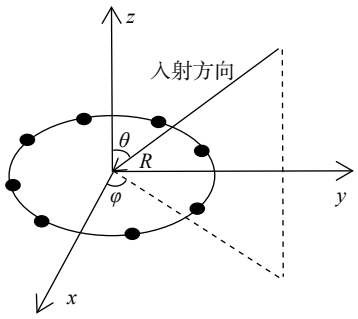

图 5 均匀圆阵布阵图

假设波束数目为 6, 干扰来向 (40°, 90°), 输入 JNR 为 40 dB; 卫星信号参考: 时间 2020-12-30 T 20: 08: 00, 地点 31°12′N, 121°36′E 处可见的 14 颗北斗卫星信号, 输入 SNR 为−20 dB. 卫星实时分布图如图 6 所示, 信号来向 (θ, φ) 如表 1 所示.

基于该天线传感器阵模型, 对以下三种约束方案进行仿真分析:

方案一, 随机选取 6 颗卫星信号来向作为波束指向, 本文以 1～6 颗卫星为例; 方案二, 据文献 [4] 所

述, 固定一个波束于法线方向, 其余五个波束的俯仰角 θ 固定为 45°, 方位角 φ 在空间范围内均匀分布; 方案三, 对卫星信号来向数据采用 K-means 聚类算法分析, 获取 6 个信号来向的聚类中心作为波束指向. 聚类分析结果如图 7 所示, 其中红星代表各个聚类中心. 以上三种方案的波束指向角如表 2 所示.

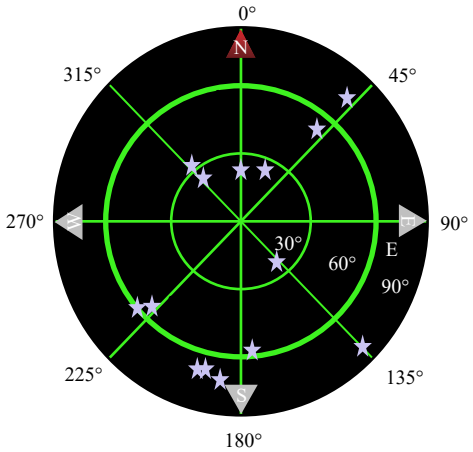

图 6　卫星实时分布图

表 1　卫星信号来向　(°)

编号	方向(θ, φ)	编号	方向(θ, φ)
1	(72, 196)	8	(76, 190)
2	(23, 358)	9	(71, 199)
3	(59, 174)	10	(31, 318)
4	(59, 225)	11	(81, 135)
5	(37, 316)	12	(26, 136)
6	(26, 29)	13	(60, 230)
7	(77, 42)	14	(51, 40)

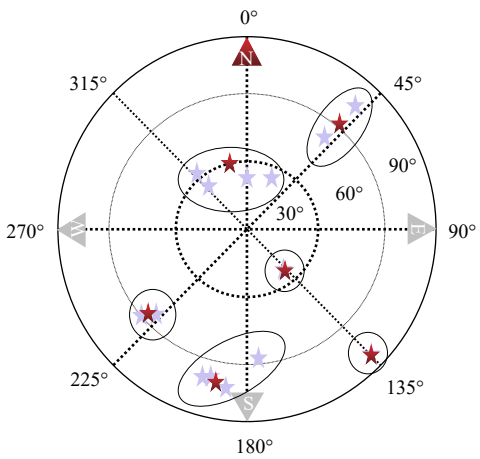

图 7　卫星分类及聚类中心示意图

表 2　波束约束角度　(°)

波束	方案一	方案二	方案三
波束1	(72, 196)	(0, 0)	(69.6, 190.2)
波束2	(23, 358)	(45, 0)	(81, 135)
波束3	(59, 174)	(45, 72)	(26, 136)
波束4	(59, 225)	(45, 144)	(59.5, 227.5)
波束5	(37, 316)	(45, 216)	(29.7, 340.5)
波束6	(26, 29)	(45, 288)	(64.7, 41.1)

图 8 为方案三的其中一个波束的方向图, 约束方向为第一个聚类中心 (69.6°, 190.2°). 由图可知, 方向图在干扰方向 (40°, 90°) 处产生了较深的零陷, 在约束方向处拥有最高增益, 从而使附近的卫星信号也拥有高增益.

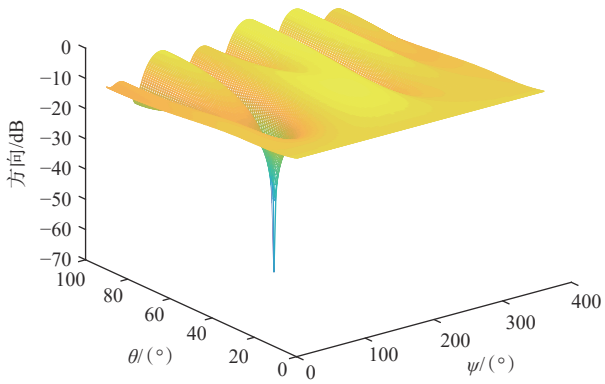

图 8　圆阵方向图

图 9 为三种方案的输出 SINR 对比图. 由图可知, 方案一除了 1～6 颗卫星, 其余卫星的输出 SINR 较差, 且参差不齐. 方案二即固定约束方向角, 相较方案一总体性能有所提升, 但仍有部分卫星信号的输出 SINR 较低. 可见当卫星信号数目大于波束数目时, 传统的约束方向并不能实现对全部卫星信号的高质量接收. 而本文采用 K-means 聚类算法将聚类中心作为约束方向, 能够有效地兼顾每一颗卫星的信号, 使 14 颗卫星信号均拥有高增益, 从而使整体的输出 SINR 保持在一个较高的水平.

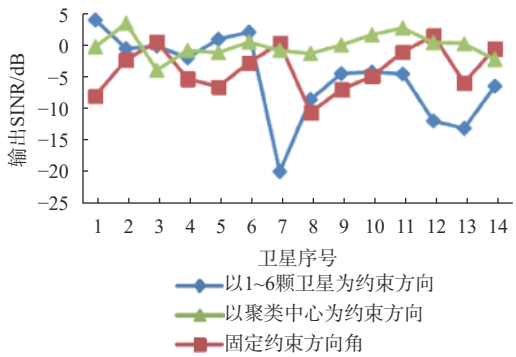

图 9　信号输出 SINR 对比图

4 结束语

针对导航信号抗干扰的问题，提出了一种基于 K-means 聚类算法的动态指向多波束抗干扰方案. 该方案将卫星信号来向数据 (θ,φ) 通过 K-means 聚类算法进行聚类分析，获取聚类中心作为多波束的指向. 以实际接收到的 14 颗北斗卫星信号的方位信息为参考，建立天线阵模型进行仿真，结果表明当卫星信号数目大于波束数目时，本文提出的方案较传统固定波束的方法有更优的性能，能有效地保障每颗卫星的输出 SINR，提高了整体的抗干扰性能.

参考文献

[1] ADAMIDIS G A, VARDIAMBASIS I O, IOANNIDOU M P, et al. Design and implementation of an adaptive beamformer for phased array antenna applications[J]. Microwave and optical technology letters, 2020(1): 1-5. DOI: 10.1002/mop.32231

[2] 潘高峰, 王李军, 华军. 卫星导航接收机抗干扰技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 182-211.

[3] 鲁祖坤. 卫星导航天线阵抗干扰关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.

[4] 齐志强, 穆仕博. 自适应波束形成技术在GNSS抗干扰中的应用[J]. 电光与控制, 2014, 21(10): 110-113.

[5] 张星, 张昆, 毕彦博, 等. 卫星导航接收机中多波束抗干扰技术[J]. 全球定位系统, 2012, 37(5): 46-51.

[6] 马衍秀, 马忠志, 李晓东, 等. 一种卫星导航接收机固定多波束抗干扰方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 104-112.

[7] 唐庆辉, 戴鑫志, 张辉. 一种盲多波束形成GNSS天线阵抗干扰算法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 132-138.

[8] 王艺, 段哲民, ABIDEEN Z U, 等. 基于空时自适应处理的多波束抗干扰改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(17): 221-225,249.

[9] DANESHMAND S, JAHROMI A J, BROUMANDAN A, et al. GNSS space-time interference mitigation and attitude determination in the presence of interference signals[J]. Sensors, 2015, 15(6): 12180-12204. DOI: 10.3390/s150612180

[10] DAI X Z, NIE J W, CHEN F Q, et al. A distortionless space-time adaptive processor based on MVDR beamformer for GNSS receiver[J]. IET radar sonar and navigation, 2017, 11(10): 1488-1494. DOI: 10.1049/iet-rsn.2017.0168

[11] 王沛. 基于自适应天线的导航抗干扰算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[12] CAO K J, LUO Z W, MA H C, et al. Phase analysis and error compensation of anti-jamming nulling algorithm for satellite navigation array antenna[J]. International journal of wireless and mobile computing, 2020, 19(3): 249-255. DOI: 10.1504/IJWMC.2020.111210

作者简介

郑雅萍 (1995—)，女，硕士研究生，研究方向为导航信号的抗干扰研究.

赵璐璐 (1988—)，男，博士，副研究员，主要研究方向为卫星通信系统设计与星载相控阵天线研究.

龚文斌 (1975—)，男，博士生导师，研究员，主要研究方向为卫星通信、卫星导航和相控阵天线技术研究.

Multi-beam anti-jamming method for satellite navigation signals based on dynamic clustering

ZHENG Yaping[1,2], ZHAO Lulu[1], GONG Wenbin[1], SHAO Fengwei[1], CHANG Jiachao[1]

(1. *Innovation Academy for Microsatellites of CAS*, *Shanghai* 200120, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In response to the anti-jamming requirements of satellite navigation, multi-beam anti-jamming technology based on adaptive beam forming is studied. In order to solve the problem that the traditional fixed multi-beam anti-jamming method cannot consider all the navigation satellite signals to reduce the receiving performance when the number of beams is limited, a dynamic multi-beam anti-jamming method based on the K-means clustering algorithm is proposed. The antenna array is established for simulation, and the results show that the anti-jamming performance of this method is better than the traditional method when the number of Beidou satellite signals received is more than the number of beams.

Keywords: satellite navigation; array signal processing; multi-beam; anti-jamming; cluster analysis