

文章编号: 2095-4980(2020)01-0043-07

GNSS 中的脉冲干扰自适应空域抑制算法

张家连, 郎荣玲, 赵辰乾, 杨燕梅, 李武涛, 路 辉

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 脉冲干扰对卫星导航是一种有效的干扰形式, 它不是一种连续的干扰形式, 这使得协方差矩阵产生剧烈变化, 从而影响抗干扰算法的性能。以功率反演(PI)和多信号归类(MUSIC)算法为例, 分析了脉冲干扰对空域抗干扰算法性能的影响。在此基础上提出了脉冲干扰自适应抑制方法, 将PI算法与脉冲信号盲识别相结合, 在盲识别脉冲干扰周期的前提下, PI算法以周期的采样点数为快拍数可以有效抑制脉冲干扰。对于多信号归类算法而言, 以最小特征值对应的特征向量为权值, 此方法不需要知道脉冲周期等参数, 只要计算协方差矩阵的点内有高电平点, 该算法就能有效抑制干扰。

关键词: 脉冲干扰; 协方差矩阵; 功率反演; 多信号归类

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018165

Pulsed interference adaptive spatial processing algorithm in GNSS

ZHANG Jialian, LANG Rongling, ZHAO Chenqian, YANG Yanmei, LI Wutao, LU Hui

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper mainly studies the effective spatial domain suppression algorithm for pulse interference. Pulse interference is an effective form of interference for Global Navigation Satellite System (GNSS). Pulsed interference is not a continuous form of interference, which causes dramatic changes in the covariance matrix, therefore affects the performance of the anti-jamming algorithm. Power Inversion(PI) and Multiple Signal Classification(MUSIC) algorithms are used as examples to analyze the impact of pulsed interference on performance of spatial anti-jamming algorithm. Combining PI with the blind identification of pulse signals, under the premise of blindly identifying the pulse interference period, the PI algorithm can effectively suppress the pulse interference by taking the number of sampling points of the cycle as the number of snapshots. For MUSIC, eigenvector corresponding to the smallest eigenvalue is used as the weight. It is unnecessary to know the parameters such as the pulse period. As long as the point of high level is calculated in the points of the covariance matrix, the algorithm can effectively suppress interference.

Keywords: pulsed interference; covariance matrix; Power Inversion; Multiple Signal Classification

全球卫星导航系统(GNSS)利用地球中轨卫星对地面物体进行定位、测速、授时等。因其具有实时、全球、全天候、高精度等优点, 自问世以来就受到各国科学家的青睐, 但导航信号因其固有的脆弱性很容易被干扰^[1]。脉冲干扰是生活中较常见的一种干扰形式, 如雷达或测距信号、汽车和飞机启动及行驶过程中的打火、雷电等都会产生脉冲干扰。其中雷达和测距信号的工作频率分别为 1 215~1 385 MHz 和 960~1 215 MHz, 部分卫星导航系统的工作频率也在这个范围^[2-3], 比如 GPS 系统的民用频段 L5 频段就工作在这个范围^[4], 这就对卫星导航的电磁兼容性提出了挑战^[5]。脉冲干扰会严重影响接收机的捕获、跟踪、同步与解算, 从而影响定位效果。因此对抗脉冲干扰的研究有其必要性。目前在抗脉冲干扰使用最多的方法是数字自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC), 该方法是控制对信号的增益, 使有脉冲干扰时的增益变小从而达到抑制脉冲的效果。但是该方法对 AGC 的收敛速度和动态范围要求过高^[6-7], 而且对导航信号的影响较大且只能抑制脉冲干扰, 有一定的局限性。本文提出的自适应空域滤波方法能有效抑制脉冲干扰。自适应空域滤波是通过阵列天线阵元加权来实现滤波的方法, 其中权值是根据输入自适应变化的^[8]。相比 AGC 而言, 自适应空域滤波的使用范围更广^[9], 能有效抑制空

收稿日期: 2018-08-17; 修回日期: 2019-01-08

作者简介: 张家连(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航抗干扰。email:1311913149@qq.com

间干扰, 增强可靠性^[10], 具有灵活的波束控制、较高的信号增益、较强的抗干扰能力以及很好的空间分辨能力等。

1 脉冲干扰对导航信号的影响分析

脉冲干扰主要有 2 个参数, 即占空比与脉冲周期, 因此将主要讨论这 2 个参数对信号载噪比的影响^[11]。脉冲干扰时域表达式为:

$$I(t) = Jp(t)\sqrt{2}\cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (1)$$

式中: J 为脉冲信号的幅度; f_i 为脉冲信号的载波频率; θ_i 为载波相位; $p(t)$ 为周期脉冲, 设脉冲周期为 T_p , 占空比为 D 。因为 $p(t)$ 是周期脉冲信号, 所以其频谱是一系列间隔为 $\frac{1}{T_p}$ 的谱线, 可以写为:

$$P(f) = \sum_m p_m \delta\left(f - \frac{m}{T_p}\right) \quad (2)$$

对于功率为单位 1 的矩形脉冲 $p_m = \sqrt{D} \text{sinc}(\pi D m)$, 其中 m 为第 m 根谱线, 当不考虑导航电文时, 卫星导航信号的时域表达式为:

$$I(t) = \sqrt{2A}c(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (3)$$

式中: A 为卫星导航信号的功率; f_c 为信号的载波频率; φ 为载波相位; $c(t)$ 为伪码信号, 设伪码周期为 T_c 。 $c(t)$ 的频谱是一系列间隔为 $\frac{1}{T_c}$ 的谱线, 可表示为:

$$C(f) = \sum_k C_k \delta\left(f - \frac{k}{T_c}\right) \quad (4)$$

设脉冲干扰的载波频率与卫星导航信号第 n 个谱线频率之差为 Δf , 则 $\Delta f = f_i - \left(f_c + \frac{n}{T_c}\right)$, 并且 $|\Delta f| < \frac{1}{2T_c}$ 。

设相关积分时间为 T_d , 当脉冲干扰经过解扩和相关积分之后, 其能量为^[12]:

$$Z = \sum_m \sum_k T_d J p_m C_k \text{sinc}\left[T_d \left(\frac{n-k}{T_c} + \frac{m}{T_p} - \Delta f\right)\right] \quad (5)$$

为简化分析上式, 本文分 3 种情况进行讨论:

1) 脉冲干扰的周期远小于信号的伪码周期 ($T_p \ll T_c$)

设卫星导航信号的伪码速率为 f_{code} , 当 $\frac{1}{T_p} > f_{\text{code}}$ 时, 符合 $T_p \ll T_c$ 。在此情形下, 只能有一条脉冲干扰的谱线落在积分器带宽内。只有 $m=0, n=k$ 的谱线在积分器主瓣内, 此时相关后的干扰能量为:

$$Z = T_d J p_0 C_n \text{sinc}(\Delta f T_d) \quad (6)$$

通过上文结论可知, 若脉冲干扰是矩形脉冲, 那么 $p_0 = \sqrt{D}$, 所以从理论推导可得, 当脉冲干扰功率恒定时, 占空比越大, 相关后的干扰能量越大, 当占空比 $D=1$ 时, 脉冲干扰成为连续单频干扰, 此时干扰效果最好。 p_0 与脉冲周期 T_p 无关, 所以当 $T_p \ll T_c$ 时, 脉冲周期 T_p 基本不会影响信号有效载噪比。

2) 脉冲干扰的周期远大于信号的伪码周期 ($T_p \gg T_c$)

在此情形下, 脉冲干扰的大部分谱线都落在相关积分器带宽内, 此时 $n=k$, 相关后的干扰能量为:

$$Z = \sum_{m=-M}^M T_d J p_m C_n \text{sinc}\left[T_d \left(\Delta f + \frac{m}{T_p}\right)\right] \approx T_d J C_n \left(\sum_{m=-M}^M p_m\right) \text{sinc}(T_d \Delta f) \quad (7)$$

此时脉冲干扰趋近于连续单频信号, 其相关积分后的能量是许多谱线能量之和, 而 $T_p \ll T_c$ 的情形只有一个谱线能量, 因此当 $T_p \ll T_c$ 时, 脉冲干扰的干扰效果更好, 信号有效载噪比更低。并且这种情况下, 占空比对信号有效载噪比影响大。

3) 脉冲干扰的周期与信号伪码周期接近 ($T_p \approx T_c$)

在此情形下, 脉冲干扰的谱线间隔与导航信号谱线间隔接近, 因此所有脉冲干扰的所有谱线都会影响相关后的干扰能量。所以符合 $k=n-m$ 的谱线会落在相关积分器带宽内, 此时相关积分后的干扰能量为:

$$Z = \sum_{m=-M}^M T_d J p_m C_{n-m} \operatorname{sinc} \left[T_d \left(\frac{m}{T_p} - \frac{m}{T_c} - \Delta f \right) \right] \quad (8)$$

通过上述公式，可以很容易发现，当 T_p 越接近于 T_c ，干扰能量越大，且干扰能量要大于 $T_p \ll T_c$ 的情形。

综上所述，脉冲干扰对导航信号影响的程度取决于脉冲周期 T_p 及占空比 D ，因此如果抗干扰算法能对不同周期及占空比的脉冲干扰都有有效抑制，则该抗干扰算法就能够有效抑制脉冲干扰。下面针对周期和占空比，讨论脉冲干扰对抗干扰算法的影响。

2 脉冲干扰对抗干扰算法的影响分析

2.1 脉冲干扰对协方差矩阵的影响

假设阵列有 N 个阵元，有 Q 个人射信号，则第 k 个阵元接收到的信号为：

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^Q e^{j\lambda_{ik}} s_i(t) + n_k(t) \quad (9)$$

式中： λ_{ik} 为第 i 个信号 $s_i(t)$ 入射到第 k 个阵元时相对于参考点的相位差； $s_i(t)$ 为干扰信号； $n_k(t)$ 为第 k 个阵元的热噪声。设 N 个阵元的接收信号向量为： $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 。

空域抗干扰算法就是利用阵列的方向选择性，计算一个向量 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ ，使得当 $y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(t)$ 时，在干扰方向形成零陷，同时保持导航信号的能量不变。在计算 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 的过程中，协方差矩阵 $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)]$ 是一个至关重要的量。下面分析脉冲干扰对协方差矩阵的影响。

以连续波(Continuous Wave, CW)脉冲信号为例，设其周期为 T_p ，占空比为 D ，时域波形见图 1^[13]。

从图 1 可明显看出，计算协方差矩阵时，如果所用的快拍数不是刚好覆盖脉冲信号的整周期，协方差矩阵 $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)]$

变化很大。本文将依照图 2 的仿真实验方案进行实验分析脉冲干扰对空域抗干扰算法的影响。

协方差矩阵的这种不稳定性，必然造成抗干扰算法的不收敛，从而使抗干扰算法失效。下面以功率反演(PI)算法为例，分析协方差矩阵的不稳定性对空域抗干扰算法的影响。

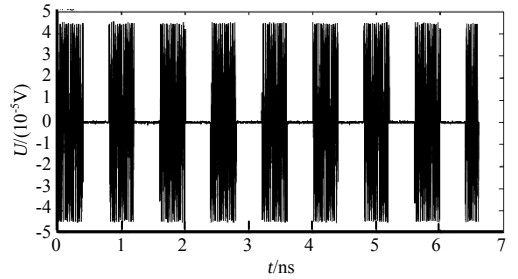


Fig.1 Time domain waveform of pulse interference
图 1 脉冲干扰的时域波形

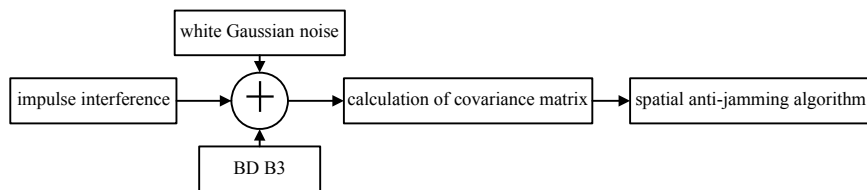


Fig.2 Simulation experiment
图 2 仿真实验方案

2.2 脉冲干扰对 PI 算法的影响分析

2.2.1 理论分析

PI 算法是利用输出功率最小的准则求加权矢量 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 。经过抗干扰处理后，输出功率可表示为：

$$P_{\text{out}} = E[y(t)^2] = E[\mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t) \mathbf{w}] = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (10)$$

因此，问题就变成求解使得 P_{out} 最小的 $\mathbf{w}$ 的值。解得式(10)的最优解 $\mathbf{w}_{\text{opt}}$ 的解析形式为^[14]：

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}}{\mathbf{s}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{s} = [1, 0, \dots, 0]^T$ 为约束条件。式(11)中需要求 $\mathbf{R}^{-1}$ ，当 $\mathbf{R}$ 的维数较高时，计算比较大，因此实际应用中采取迭代的方式求 $\mathbf{w}_{\text{opt}}$ ，迭代公式为^[14]：

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu [\mathbf{I} - \mathbf{s} \mathbf{s}^T] \mathbf{R} \mathbf{w}(n) = [\mathbf{I} - \mu \mathbf{P} \mathbf{R}] \mathbf{w}(n) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为 L 维单位矩阵; μ 为迭代步长; $\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{s}\mathbf{s}^T$ 为 $L \times L$ 维约束矩阵。由式(12)可以看出协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 是迭代算法中的关键变量, 协方差矩阵的不稳定性必然造成迭代过程的不收敛, 从而使抗干扰算法失效。

2.2.2 实验分析

实际中协方差的计算是利用平均来估计期望, 因此快拍数的选取会影响协方差矩阵的估计, 特别是对于脉冲干扰下的情况。在这部分实验中, 按照图 2 的方案, 分析在脉冲干扰的环境中快拍数对抗干扰效果的影响。

1) 脉冲干扰的占空比 1/3, 一个周期的采样点数为 186, 快拍数为 124 时, 实验结果见图 3, 图中 w_2 为第 2 个阵元的权值的幅值。

2) 脉冲干扰的占空比为 1/3, 一个周期的采样点数为 186, 快拍数为 186 时, 仿真结果见图 4。此时, 快拍数等于一个周期的采样点数, 算法收敛, 算法可以抑制干扰。

3) 脉冲干扰的占空比为 1/3, 一个周期的采样点数为 186, 快拍数为 200 时, 实验结果见图 5。

通过实验分析可以看出, 利用 PI 算法抗脉冲干扰时, 快拍数应该接近于一个周期的采样点数, 也就是说需要根据脉冲周期以及采样率确定每次迭代利用的快拍数。

3 自适应抗脉冲干扰算法

3.1 自适应 PI 抗脉冲干扰算法

由第 2、3 节的理论和实验分析可知, 脉冲干扰是通过影响协方差矩阵的计算来影响抗干扰算法, 由于不同参数(占空比、周期)的脉冲干扰对协方差矩阵的影响不同, 因此需要在计算协方差矩阵之前估计出脉冲干扰的参数, 这就是下面提出的改进的 PI 抗脉冲干扰算法核心思想。

3.1.1 改进的 PI 抗脉冲干扰算法

PI 迭代算法的关键之处是计算协方差矩阵, 实际中计算协方差矩阵是用统计平均来估计期望, 所以用来计算协方差矩阵的点数越多, 其估计就越趋近于无偏估计, 所以增加快拍数能够让 PI 算法更有效地抑制脉冲干扰。但这会增加计算量, 增加系统的复杂度, 不能实时计算。如果要以小的计算量发挥 PI 的功能, 就得预先知道脉冲干扰的周期。所以在 PI 算法之前加一个识别系统, 检测出脉冲干扰的参数, 然后以脉冲干扰的周期点数为快拍数, 再进行 PI 算法的计算, 改进的算法流程见图 6。

图 6 中, 中间圆内的三角符号代表四阵元天线阵列, 高斯白噪声、脉冲干扰、北斗信号都通过该阵列天线进入系统; 脉冲信号检测能够检测出脉冲信号和脉冲信号的周期点数, 空域抗干扰算法根据脉冲信号检测输出的周期点数选择快拍数, 执行抗干扰算法^[15]。

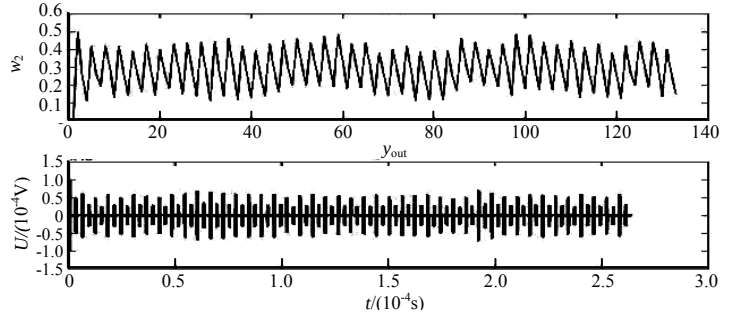


Fig.3 When the duty ratio is 1/3, the snapshot is 124, the convergence of w_2 and the algorithm output waveform y_{out}

图 3 占空比为 1/3, 快拍数为 124 时, w_2 的收敛情况及算法输出波形 y_{out}

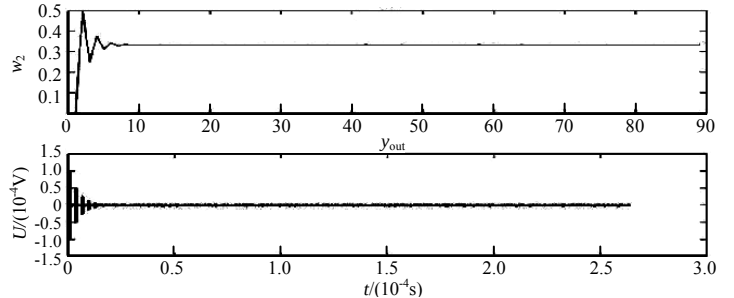


Fig.4 When the duty ratio is 1/3, the snapshot is 186, the convergence of w_2 and the algorithm output waveform y_{out}

图 4 占空比为 1/3, 快拍数为 186 时, w_2 的收敛情况及算法输出波形 y_{out}

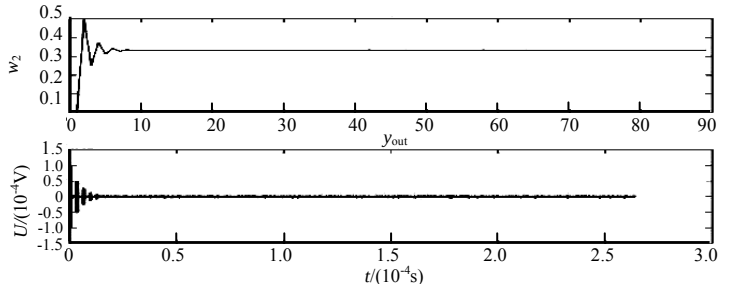


Fig.5 When the duty ratio is 1/3, the snapshot is 200, the convergence of w_2 and the algorithm output waveform y_{out}

图 5 占空比为 1/3, 快拍数为 200 时, w_2 的收敛情况及算法输出波形 y_{out}

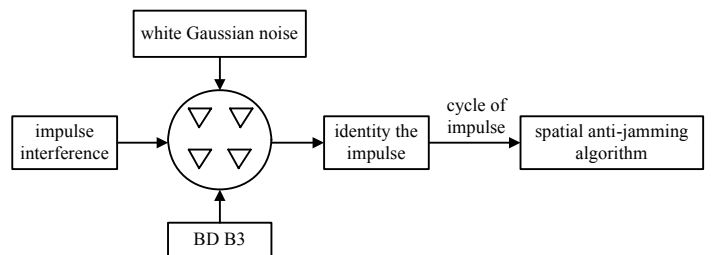


Fig.6 System block diagram of improved PI algorithm

图 6 改进的 PI 算法系统框图

数, 执行抗干扰算法^[15]。

由式(2)可知, 脉冲信号的频谱是以 $\frac{1}{T_p}$ 为间隔的谱线, 即频谱的最大值和次大值的间隔为脉冲的频率。脉冲信号检测模块就是利用最大值与次大值之间的频率差来估计周期 T_p 。

3.1.2 改进的 PI 算法实现结果

按照图 6 的信号流程测试改进算法, 对于任意脉冲干扰都可使用上述改进方法抑制掉, 不失一般性这里仅举出 2 种情况加以说明改进算法的效果。

1) 脉冲干扰的参数为下占空比 1/3, 一个周期的采样点数为 186, 实验结果见图 7。可看到该结果和图 4、图 5 的抗干扰效果相同, 达到了预期结果。

2) 脉冲干扰的参数为下占空比 1/5, 一个周期的采样点数为 310, 实验结果见图 8。可看到最终算法收敛, 达到了预期结果。

3.2 自适应 MUSIC 抗脉冲干扰算法

3.2.1 MUSIC 算法

MUSIC 算法是利用特征空间分解的办法将信号分解为噪声空间和干扰空间, 并且在干扰空间引入零限的算法。这里直接给出 MUSIC 的协方差矩阵^[16]:

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)\} = \mathbf{A} \bullet E\{\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)\} \bullet \mathbf{A}^H + E\{\mathbf{N}(t)\mathbf{N}^H(t)\} = \mathbf{A} \bullet \mathbf{P}_s \bullet \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{R}_{xx}$ 为阵列的信号协方差矩阵; $\mathbf{X}(t)$ 为阵列的输入矢量; $\mathbf{S}(t)$ 为干扰信号矢量; $\mathbf{N}(t)$ 为噪声矢量; $\mathbf{P}_s = E\{\mathbf{S}(t)\mathbf{S}^H(t)\}$ 为干扰功率矩阵; $\mathbf{A}$ 为方向矢量矩阵; σ^2 为噪声功率; $\mathbf{I}$ 为 $L \times L$ 维的单位向量; L 为阵元个数。

易证 $\mathbf{R}_{xx}$ 为厄米特矩阵, 所以其一定能被对角化, 设

$$\mathbf{U}\mathbf{R}_{xx}\mathbf{U}^H = \mathbf{A} \quad (14)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为对角阵。将式(13)代入式(14)可得^[10]

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{R}_{xx}\mathbf{U}^H = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{P}_s\mathbf{A}^H\mathbf{U}^H + \sigma^2\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{P}_s\mathbf{A}^H\mathbf{U}^H + \sigma^2\mathbf{I} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N) \quad (15)$$

则:

$$\mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{P}_s\mathbf{A}^H\mathbf{U}^H = \text{diag}(\lambda_1 - \sigma^2, \lambda_2 - \sigma^2, \dots, \lambda_N - \sigma^2) \quad (16)$$

设有 Q 个干扰, 则有 $\text{rank}(\mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{P}_s\mathbf{A}^H\mathbf{U}^H) = Q$, 设 $\mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{P}_s\mathbf{A}^H\mathbf{U}^H = \text{diag}(\mu_1^2, \mu_2^2, \dots, \mu_Q^2, 0, \dots, 0)$, 所以 $\mathbf{R}_{xx}$ 的特征值为:

$$\lambda_i = \begin{cases} \mu_i^2 + \sigma^2, & i = 1, 2, \dots, Q \\ \sigma^2, & i = Q+1, Q+2, \dots, N \end{cases} \quad (17)$$

由此可以看出, $\mathbf{R}_{xx}$ 的特征值由干扰功率与噪声功率之和 $\mu_i^2 + \sigma^2$ 以及噪声功率 σ^2 组成, $\mu_i^2 + \sigma^2$ 对应的特征向量是干扰空间, σ^2 对应的特征向量是噪声空间, 又由于 $\mathbf{R}_{xx}$ 为厄米特矩阵, 不同特征值对应的特征向量相互垂直, 所以取 σ^2 对应的特征向量为权值就能达到抑制干扰的效果。

3.2.2 自适应 MUSIC 算法

由上面的分析可知, 脉冲干扰影响协方差矩阵的计算, 对于 MUSIC 而言, 脉冲干扰会影响协方差矩阵的特征值分布, 当脉冲干扰处于高电平时有大特征值, 当没有高电平时就是小特征值, 这会为选权值带来麻烦, 需要界定大小特征值的界限。所以, 这里提出可以利用最小特征值所对应的特征向量。结果表明, 这样也会很大程度上提高系统的稳定性。

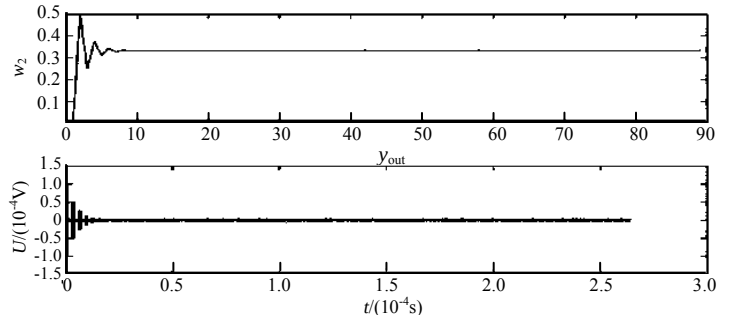


Fig.7 When the duty ratio is 1/3, the convergence of w_2 and the algorithm output waveform y_{out}

图 7 占空比为 1/3 时 w_2 的收敛情况及算法输出波形 y_{out}

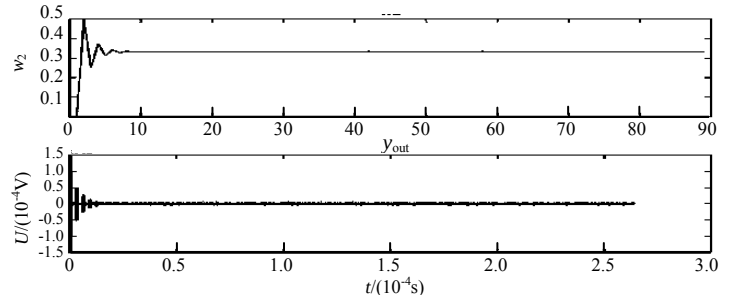


Fig.8 When the duty ratio is 1/5, the convergence of w_2 and the algorithm output waveform y_{out}

图 8 占空比为 1/5 时 w_2 的收敛情况及算法输出波形 y_{out}

3.2.3 自适应 MUSIC 算法抑制脉冲干扰实验分析

下面给出 MUSIC 算法不同快拍数的仿真结果, 从中分析脉冲干扰对 MUSIC 算法的影响。

1) MUSIC 实验用的脉冲干扰仍为 $1/3$ 占空比, 周期点数仍为 186, 快拍数为 186 时, 最终的方向图见图 9, 该图所用的点中高电平点占快拍数的 $1/3$ 。

2) MUSIC 实验用的脉冲干扰仍为 $1/3$ 占空比, 周期点数仍为 186, 快拍数为 123 时, 最终的方向图见图 10, 该图所用的点中高电平点占快拍数的 $62/123$, 约为 $1/2$ 。

3) MUSIC 实验用的脉冲干扰仍为 $1/3$ 占空比, 周期点数仍为 186, 快拍数为 30 时, 最终的方向图见图 11, 该图所用的点中高电平点占快拍数的 $1/5$ 。

4 结论

由上面的实验结果可知, 即使快拍数取得非常小也能画出正确的方向图。这是因为上面 3 个实验计算的点数中都含有高电平的点, 这样计算的协方差矩阵也会有一个较大的特征值, 这同样可以有效抑制脉冲干扰。即便是所计算的点中没有高电平的点, 最终输出的信号只是四路信号的加权, 也不会影响导航系统的定位。因此 MUSIC 算法对脉冲干扰的影响更强。

参考文献:

- [1] 陈于平, 周志江. GPS 抗干扰技术综述[J]. 数字技术与应用, 2013(11):220. (CHEN Yuping, ZHOU Zhijiang. Survey of GPS anti-jamming technology[J]. Digital Technology and Application, 2013(11):220).
- [2] YIN T. Simulator of pulsed interference environment of an airborne GNSS receiver[EB/OL]. (2007-01)[2018-07-07]. https://elib.dlr.de/50819/1/Thesis_Final_DLR.pdf.
- [3] 宋文佳. 连续波雷达强脉冲干扰剔除的算法[J]. 电子技术与软件工程, 2017(15):99. (SONG Wenjia. Algorithm for strong pulse interference rejection of continuous wave radar[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017(15):99).
- [4] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [5] 方伟. GNSS 中的脉冲干扰抑制方法研究[D]. 天津:天津大学, 2013. (FANG Wei. Research on pulse interference suppression for Global Navigation Satellite System[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2013.)
- [6] APPLEBAUM S. Adaptive arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1976, 24(5):585-598.
- [7] 包晓安, 郭铭, 胡国亨, 等. 基于自适应阈值的脉冲抑制迭代算法研究[J]. 浙江理工大学学报, 2017, 37(5):676-680. (BAO Xiaolan, GUO Ming, HU Guoheng, et al. Research on impulse suppression iterative algorithm based on adaptive threshold[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2017, 37(5):676-680.)
- [8] DAI X, NIE J, LI B, et al. Performance of GNSS receivers with AGC in noise pulse interference[C]// International Conference on Computer Science and Network Technology. Changchun, China: [s.n.], 2016:735-740.
- [9] LIU Hongbo, MENG Jin, GE Songhu, et al. Identification and simulation of interference cancellation system self adaptive filtering[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1986, 34(3):276-280.
- [10] 朱峰, 张友益. 对自适应空域滤波的干扰研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(11):67-69. (ZHU Feng, ZHANG Youyi. Research on interference of adaptive spatial filtering[J]. Modern Electronic Technology, 2013, 36(11):67-69.)
- [11] 丁梦羽, 许睿, 刘建业, 等. 脉冲干扰对软件接收机的影响分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3):58-65. (DING Mengyu, XU Rui, LIU Jianye, et al. Analysis of the influence of pulse interference on software receiver[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(3):58-65.)

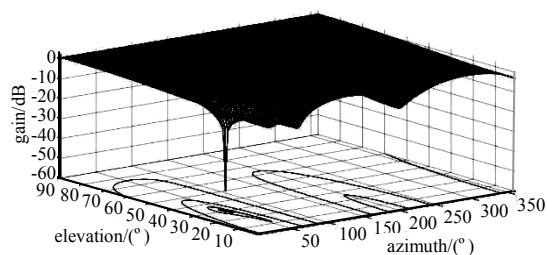


Fig.9 When the snapshot is 186, the pattern of antenna of MUSIC
图 9 快拍数为 186, MUSIC 算法方向图

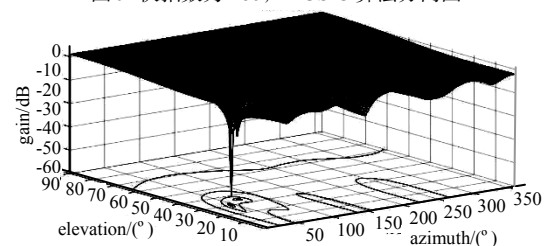


Fig.10 When the snapshot is 123, the pattern of antenna of MUSIC
图 10 快拍数为 123, MUSIC 算法方向图

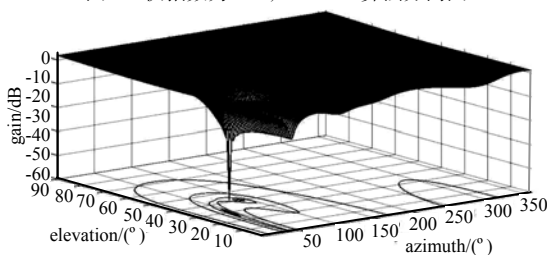


Fig.11 When the snapshot is 30, the pattern of antenna of MUSIC
图 11 快拍数为 30, MUSIC 算法方向图

- [12] BALAEI A T,DEMPSTER A G,PRESITI L L. Characterization of the effects of CW and pulse CW interference on the GPS signal quality[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009,45(4):1418–1485.
- [13] 陈敏德,唐丹,邓君,等. 精密长延迟纳秒高压脉冲源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2003,1(4):300–303. (CHEN Minde,TANG Dan,DENG Jun,et al. Precision long delay nanosecond high voltage pulse source[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2003,1(4):300–303.)
- [14] 王永芳. 卫导用户机抗干扰天线自适应算法和系统仿真研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2006. (WANG Yongfang. Research on adaptive algorithm and system simulation of anti-jamming antenna for satellite user[D]. Beijing:Beihang University, 2006.)
- [15] 何瑞珠,刘彦明. 通用导航接收机的脉冲干扰评估方法[J]. 移动通信, 2017,41(11):40–43. (HE Ruizhu,LIU Yanming. Pulse interference assessment method for universal navigation receiver[J]. Mobile Communication, 2017,41(11):40–43.)
- [16] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1986,34(3):276–280.

(上接第 35 页)

- [6] 崔伟,杨承志,李云鹏. 箔条弹干扰主动雷达多普勒导引头建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2014,26(2):419–424. (CUI Wei, YANG Chengzhi,LI Yunpeng. Modeling and simulation of research on jamming of chaff car–tridge for active Doppler radar seeker[J]. Journal of System Simulation, 2014,26(2):419–424.)
- [7] WU Xianli,QI Zizhong,LONG Teng. Research on application of chaff[C]// IEEE the 8th International Conference of Signal Processing. Beijing,China:IEEE, 2006.
- [8] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007. (CHEN Jing. Principle of radar chaff jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.)
- [9] SHERMAN W M. Dynamics and radar cross section density of chaff clouds[J]. IEEE Transactions on AES, 2004,40(1):93–102.
- [10] PELOSI G,RAHMAT-SAMII Y,VOLAKIS J L. High-frequency techniques in diffraction theory:50 years of achievements in GTD,PTD,and related approaches[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013,55(3):16–17.
- [11] 吕萌萌. 箔条云的运动模型及雷达电磁散射特性[J]. 电子元器件应用, 2012,14(9):30–33. (LYU Mengmeng. Motion characteristics of chaff cloud in the air[J]. Electronic Component & Device Applications, 2012,14(9):30–33.)
- [12] 张群,罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. (ZHANG Qun,LUO Ying. Micro Doppler effect of radar targets[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2013.)
- [13] 陈宁宁. 箔条云对脉冲多普勒探测系统的干扰机理[D]. 南京:南京理工大学, 2013. (CHEN Ningning. Interference mechanism of chaff cloud on pulse Doppler detection system[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science, 2013.)
- [14] 唐济远,袁春珊. 基于 STFT 的信道化接收系统研究及设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):380–385. (TANG Jiyuan,YUAN Chunshan. Design of channelized receiver based on STFT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):380–385.)