

# 空时自适应处理对 GPS 信号影响与补偿方法

相 飞, 廖桂生, 曾 操

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 通过推导 C/A 码全球定位系统(global positioning system, GPS)信号分别经空域自适应处理和空时自适应处理的相关函数,研究了阵列信号处理对 C/A 码 GPS 信号捕获性能的影响。理论分析表明,空域自适应处理不影响捕获;而空时自适应处理在抑制干扰的同时使信号产生了畸变,降低了同步和码跟踪精度。针对空时自适应处理造成的信号失真,利用维纳滤波对失真的相关函数进行补偿。仿真结果表明补偿后相关函数的波形有了明显改善,空时自适应处理带来的信号失真也得到有效校正。

**关键词:** 全球定位系统; 空域自适应处理; 空时自适应处理; C/A 码捕获

**中图分类号:** TN911.7

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.01.01

## Effect of space-time adaptive processing on GPS signals and its compensation method

XIANG Fei, LIAO Gui-sheng, ZENG Cao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The correlation function of the C/A code global positioning system (GPS) signal is derived through spatial and space-time adaptive processing respectively. The effect of array signal processing techniques on the signal acquisition for C/A code GPS is analyzed. Theoretical results show that the spatial adaptive processing has no effect on the signal acquisition, and the space-time adaptive processing arises distortion while suppressing interference, which degrade the synchronization and code tracking performance. In order to mitigate the distortion induced by the space-time adaptive processing, a Wiener filter is adopted to compensate the distorted correlation function. Simulation results show that, after compensating the correlation function, the resulting waveform is well corrected and the distortion of signals is also corrected effectively.

**Keywords:** global positioning system (GPS); spatial adaptive processing; space-time adaptive processing; C/A code acquisition

## 0 引 言

全球定位系统(global positioning system, GPS)以其全天候不间断的全球定位能力发挥了重要作用。然而 GPS 卫星运行于空间轨道,到达地面的信号功率极其微弱,低于接收机热噪声,易受到各种有意或无意干扰的影响。这些干扰降低了 GPS 接收机的定位精度甚至使 GPS 接收机无法工作,因此提高 GPS 系统的抗干扰能力成为 GPS 系统的重要研究内容。

阵列处理利用导航信号与干扰信号的来波方向差异,通过空域自适应处理能够抑制干扰增强信号,从而改善输出信干噪比,成为 GPS 抗干扰的主要手段之一。但空域处理在

面对宽带等复杂形式干扰时性能严重下降<sup>[1]</sup>。文献[1]提出将空时自适应处理用于 GPS 信号抗干扰,通过联合空域与时域自由度能够极大改善自适应阵列的抗干扰能力。空时自适应处理抑制干扰已有大量研究,文献[2-7]提出了不同的空时自适应处理干扰抑制算法;文献[8-11]提出了基于多级维纳滤波的空时自适应降维处理方法。

自适应处理在抑制干扰的同时对信号也会产生影响,尤其是对信号波形的影响,若不对这种影响进行补偿会降低捕获性能和定位精度。在 GPS 系统中,接收信号携带了用于定位的导航电文,阵列加权对 GPS 信号的影响需要具体分析。文献[1,12]讨论了空时自适应处理对 P(Y)码 GPS 信号的影响,认为 P(Y)码基本不受影响。文献[13]研

收稿日期:2011-01-24; 修回日期:2011-09-29。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB70700);国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AA12Z303);国家杰出青年科学基金(60825104);中央高校基本科研业务费专项资金(K50510020028)资助课题

作者简介:相飞(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理、导航信号处理。E-mail:fxiang@mail.xidian.edu.cn

究了自适应阵列中阵元响应非理想情况及自适应处理带来的码元误差和相位误差,并提出了离线校准方法。文献[14]提出了多项式拟合方法估计空时自适应处理的影响。文献[15]使用泰勒级数展开估计误差。文献[16]提出了时域的最小二乘补偿方法,可以补偿相关峰的展宽问题。文献[17]讨论了不同自适应准则下的空时自适应处理对 GPS 信号的影响。文献[18]提出了从相关峰波形估计误差的方法。

本文首先分别推导了阵列空域自适应处理和空时自适应处理后 GPS 信号的相关函数,然后研究了阵列处理对 C/A 码 GPS 信号的影响,结果表明空域自适应处理不产生影响;而空时自适应处理后相关峰展宽,其能量有一定损失,并且引入了一定的峰值偏移。这将影响 C/A 码 GPS 信号的同步和码跟踪精度,进而带来伪距误差。最后,针对空时自适应处理带来的影响,本文使用维纳滤波器对失真的相关函数进行补偿,基本校正了空时处理带来的信号波形失真。

### 1 阵列信号模型

阵元数目为  $N$ ,阵元以间距  $d = \frac{\lambda}{2}$  等间隔排列, $\lambda$  为信号波长。设存在  $M$  个干扰信号,阵列接收的信号可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_0 s(t) + \sum_{m=1}^M \mathbf{a}_m i_m(t) + \mathbf{v}(t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{a}_0$  为信号的导向矢量;GPS 信号为  $s(t) = \sqrt{2P}d(t) \cdot PN(t) \exp(j\omega_0 t)$ , $P$  为信号功率, $d(t)$  为导航电文, $PN(t)$  为扩频序列, $\omega_0 = 2\pi f_0$ , $f_0$  为信号的载频; $i_m(t)$  为第  $m$  个干扰信号; $\mathbf{a}_m$  为第  $m$  个干扰信号的导向矢量, $m=1,2,\dots,M$ ; $\mathbf{v}(t)$  为接收机热噪声。 $s(t)$ , $i_m(t)$  和  $\mathbf{v}(t)$  统计独立。

### 2 空域自适应处理

空域自适应处理利用复增益传感器阵列,根据信号的空域相关性对信号进行抑制或增强。当干扰信号和 GPS 信号的来波方向不同时,空域自适应处理能保留信号,抑制干扰。阵列自适应处理模型为

$$y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}_0 s(t) + \sum_{m=1}^M \mathbf{w}^H \mathbf{a}_m i_m(t) + \mathbf{w}^H \mathbf{v}(t) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{w}$  是阵列自适应权值。

由最小方差无畸变(minimum variance distortionless response, MVDR)准则

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} & \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \\ \text{s. t.} & \mathbf{w}^H \mathbf{a}_0 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

可得 MVDR 准则下最优权  $\mathbf{w}$  为

$$\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}_0 \quad (4)$$

式中, $\mu = \mathbf{a}_0^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}_0$ ; $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{x}^H(t)]$  为阵列信号自相关矩阵; $\mathbf{a}_0$  为 GPS 信号导向矢量。

空域自适应处理等效的系统函数为

$$H(\omega) = \sum_{n=1}^N \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) \omega_n \cdot \exp\left(-j\omega \frac{\xi_n}{c}\right) \quad (5)$$

式中, $\omega_n$  为阵列所加权值; $\xi_n$  为 GPS 信号方向上第  $n$  个阵元相对于参考阵元的波程差。

取长度为  $T_B$  ( $T_B$  为基带信号的时宽)的阵列接收信号为

$$y_{T_B}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) a(\theta_0) S_{T_B}(\omega) d\omega \quad (6)$$

用长度为  $T_B$  的本地参考信号  $s_{T_B}(t)$ ,并假设参考信号与接收信号之间的时延为  $\tau$ ,则

$$s_{\text{ref}}(t + \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{T_B}(\omega) \exp[j\omega(t + \tau)] d\omega \quad (7)$$

相关函数定义为

$$C(\tau) = y_{T_B}(t) s_{\text{ref}}^*(t + \tau) \quad (8)$$

将式(6)和式(7)代入式(8),可得

$$C(\tau) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^N \omega_n \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} R_s(\omega) \exp\left[j\omega\left(\tau - \frac{\xi_n}{c}\right)\right] d\omega = \sum_{n=1}^N \omega_n \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) R_s\left(\tau - \frac{\xi_n}{c}\right) \quad (9)$$

式中, $R_s(\tau)$  为 GPS 信号未经过阵列处理时与参考信号的相关函数,以下称为标准相关函数。

由式(9)可知,在阵列自适应抑制干扰后,输出信号为  $N$  个标准相关函数的移位加权求和形式。每个分量相对于标准相关函数在时间上滞后  $\frac{\xi_n}{c}$ 。由于  $\frac{\xi_n}{c} \ll T_s < T_c$  ( $T_s$  为中频采样周期, $T_c$  为 C/A 码片时宽),所以这  $N$  个相关函数几乎重合,于是有

$$C(\tau) \approx R_s(\tau) \sum_{n=1}^N \omega_n \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) = R_s(\tau) \mathbf{w}^H \mathbf{a}_0 \quad (10)$$

考虑到  $\mathbf{w}^H \cdot \mathbf{a}_0 = 1$ ,则

$$C(\tau) = R_s(\tau) \quad (11)$$

由式(11)可知信号经过空域自适应处理后,GPS 接收信号与参考信号的相关函数未受到影响,所以阵列空域自适应处理不影响 GPS 信号。

### 3 空时自适应处理

文献[19]在雷达信号处理中提出空时自适应处理,设计了最优滤波器,对空时域联合进行自适应处理。空时自适应处理的结构框图如图 1 所示。

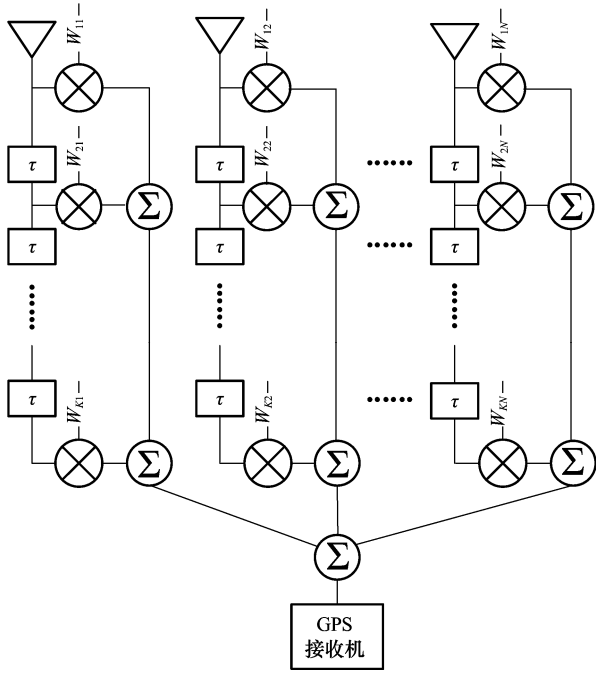


图 1 空时自适应处理框图

阵列共  $N$  个阵元,每个阵元后有  $K-1$  个延迟节,其延迟时间为  $\tau_D$  ( $\tau_D < \frac{1}{B}$ ,  $B$  为 GPS 信号带宽)。

空时信号矩阵  $\mathbf{x}_{ST}$  为

$$\mathbf{x}_{ST} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_N^T]^T =$$

$$[x_{11}, x_{21}, \dots, x_{K1}, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{K2}, \dots, x_{1N}, x_{2N}, \dots, x_{KN}]^T$$

式中,  $x_{kn}$  为第  $k-1$  个延迟节,阵元  $n$  处的信号 ( $k=1, 2, \dots, K; n=1, 2, \dots, N$ ), MVDR 准则下空时自适应处理的最优权为

$$\mathbf{w}_{opt} = \rho \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{s} \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}_{ST}(t) \cdot \mathbf{x}_{ST}^H(t)]$  是空时信号的自相关矩阵;  $\mathbf{s} = \mathbf{a}_s \otimes \mathbf{a}_t$  为空时导向矢量,  $\otimes$  表示 Kronecker 积。

信号的空域导向矢量为

$$\mathbf{a}_s = \left[ 1, \exp\left(j \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}\right), \exp\left(j \frac{2\pi \cdot 2d \sin \theta}{\lambda}\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi (N-1)d \sin \theta}{\lambda}\right) \right]^T$$

时域导向矢量为

$$\mathbf{a}_t = \left[ 1, \exp\left(j \frac{2\pi f_0}{f_s}\right), \exp\left(j \frac{2\pi \cdot 2f_0}{f_s}\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi (K-1)f_0}{f_s}\right) \right]^T$$

式中,  $f_0$  为信号中频。

将空时自适应处理看作一个线性系统,其系统响应可表示为<sup>[1]</sup>

$$H(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{K-1} \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) \omega_{kn} \exp\left[-j\omega\left(k\tau_D + \frac{\xi_n}{c}\right)\right] \quad (13)$$

式中,  $\omega_{kn}$  为空时加权;  $\xi_n$  为 GPS 信号方向上第  $n$  个阵元的波程差。与空域自适应处理的推导过程类似,空时自适应处理后的相关函数为

$$C(\tau) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{K-1} \omega_{kn} \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) R_s\left(\tau - k\tau_D - \frac{\xi_n}{c}\right) \quad (14)$$

由式(14)可得,经空时处理后的信号与参考信号的相关函数为  $N \times K$  个标准相关函数的延迟加权求和,每一个分量的延迟为  $k\tau_D + \frac{\xi_n}{c}$ 。

GPS 信号接收机在信号捕获和码跟踪时主要使用相关峰,所以需要考虑相关函数的相关峰 ( $|\tau| \leq T_c$ )。利用文献[20]的结果,当  $mT_c < \tau < (m+1)T_c$  ( $m$  为整数)时

$$R_s(\tau) = R_s(mT_c) \left(m + 1 - \frac{\tau}{T_c}\right) + R_s((m+1)T_c) \left(\frac{\tau}{T_c} - m\right) \quad (15)$$

相关峰内  $m$  应取  $-1$  和  $0$ , 所以

$$R_s(\tau) = R_s(0) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_c}\right) + \frac{|\tau|}{T_c} \cdot R_s(T_c) = R_s(0) + \frac{|\tau|}{T_c} [R_s(T_c) - R_s(0)] \quad (16)$$

式中,  $|\tau| \leq T_c$ 。记  $\omega'_{kn} = \omega_{kn} \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right)$ , 将式(16)代入式(14)可得

$$C(\tau) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{K-1} \omega'_{kn} \left\{ R_s(0) + \frac{\left|\tau - k\tau_D - \frac{\xi_n}{c}\right|}{T_c} [R_s(T_c) - R_s(0)] \right\}, \quad |\tau| \leq T_c \quad (17)$$

由式(17)可知,各个相关峰位置产生了偏移,偏移量为  $k\tau_D + \frac{\xi_n}{c}$ , 这些错位的相关峰再由  $\omega'_{kn}$  加权后叠加产生最终相关峰。与式(16)相比可知,经过空时自适应处理后,相关峰  $C(\tau)$  的形状不再是关于  $\tau=0$  对称的三角峰,同时不能在  $\tau=0$  处取得最大值,所以空时处理将引起 C/A 码 GPS 信号捕获和码跟踪误差。

相关峰的畸变由  $\omega'_{kn}$ ,  $k\tau_D$  和  $\frac{\xi_n}{c}$  决定。由于  $\frac{\xi_n}{c} \ll T_s$ , 当  $n$  增加时,  $\frac{\xi_n}{c}$  变化不明显,所以阵元数变化对相关峰波形的

影响不明显。而当延迟节的数目较多时,  $\frac{k\tau_D}{T_c}$  较大,其对应的的相关峰较原始相关峰延迟很大。实际中  $\tau_D$  常取  $T_s$ , 对于 C/A 码,  $T_c \approx 1 \mu s$ ,  $\frac{k\tau_D}{T_c}$  可接近于 1, 所以当延迟节的数目较大时,相关峰的位置严重偏离真实位置,与标准相关峰的叠加最终使相关峰产生畸变。若  $K$  和  $N$  不变,式(17)中  $k$  和  $n$  较小时相关峰靠近理论位置,  $\omega'_{kn}$  加权叠加后对相关峰值处的波形影响较大,可导致相关峰的展宽;而  $k$  和  $n$  较大时

距真实位置较远,  $w'_{kn}$  的加权叠加导致相关峰波形畸变。所以应该使  $w'_{kn}$  在  $n=1, k=0$  时最大, 而其他情况下尽量小。

为了减轻  $C(\tau)$  的畸变, 在保证干扰抑制能力足够的前提下, 应该使得空时处理的延迟节数  $K$  和阵元数  $N$  尽量小。进而可以减少各相关峰的偏移, 同时减少相关峰的叠加次数。使相关峰形状尽量接近对称的三角形, 以减轻捕获和码跟踪误差。

每个延迟节的输出可以看作信号的一个多径分量, GPS 使用的伪随机码能够抑制延迟大于  $1.5T_c$  的多径分量<sup>[20]</sup>, 而延迟节的  $\tau_D < 1.5T_c$ , 无法被相关过程抑制因而对 GPS 信号造成严重影响。为了减轻延迟节输出的“类多径”信号的影响, 同样要求减少空时处理的  $K$  和  $N$ 。

### 4 补偿方法

空时自适应处理使 GPS 信号产生了畸变, 失真的信号会带来捕获误差和码跟踪误差, 必须对 GPS 信号进行补偿以校正信号。文献[13]提出的离线校准方法要求预先测定空时自适应处理带来的 GPS 信号定位误差并建立用于校正的查找表, 需要大量的存储空间, 补偿精度有限。文献[14-15]提出的估计方法属于近似方法。文献[16]提出了最小二乘逆滤波的补偿方法, 在时域对阵列输出信号进行补偿处理。但是 GPS 信号是信噪比极低的扩频信号, 在 -19 dB 以下, 最小二乘逆滤波无法得到用于校正的强 GPS 信号, 因而性能不理想。

对式(14)两边做傅里叶变换, 可得

$$FT[C(\tau)] = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{K-1} w_{kn} \exp\left(j\omega_0 \frac{\xi_n}{c}\right) \cdot$$

$$\exp\left[-j\omega\left(k\tau_D + \frac{\xi_n}{c}\right)\right] \cdot$$

$$FT[R_s(\tau)] = H(\omega) \cdot FT[R_s(\tau)] \quad (18)$$

式中,  $FT[\cdot]$  表示傅里叶变换。由式(18)可知, 空时自适应处理后的相关函数与标准相关函数存在确定的已知关系, 可以通过校正  $C(\tau)$  恢复无失真的相关函数  $R_s(\tau)$ 。

由式(13), 则  $H(\omega)$  精确可知, 维纳滤波<sup>[21]</sup> 给出  $\hat{R}_s(\tau)$  的估计  $\hat{R}_s(\tau)$  为

$$\hat{R}_s(\tau) = IFT \left[ \frac{H^*(\omega) \cdot FT[C(\tau)]}{|H(\omega)|^2 + \gamma} \right] \quad (19)$$

式中,  $IFT[\cdot]$  表示傅里叶逆变换;  $\gamma$  是与信噪比有关的常量, 通常取信噪比的倒数。

### 5 仿真实验

仿真条件: GPS 信号中频为 5.115 MHz,  $d = \frac{\lambda}{2}$  的等距阵线阵, 采样率为 30.69 MHz。考虑阵列接收一个 C/A 码 GPS 信号的情况, 输入信噪比为 -25 dB, 信号方向为 90° 垂直入射。存在 3 个干扰信号, 2 个宽带干扰, 中心频率为 5.115 MHz, 相对带宽  $\Delta B$  (干扰带宽与 GPS 信号带宽之比) 分别为 1 和 0.5, 干信比分别为 55 dB 和 58 dB, 方向为 60° 和 120°。一个点频干扰, 频率为 5.2 MHz, 干信比为 60 dB, 方向为 80°。

仿真 1 阵元数为 4 不变, 延迟节数目从 3 增加到 31,

仿真结果如图 2~图 5 所示。

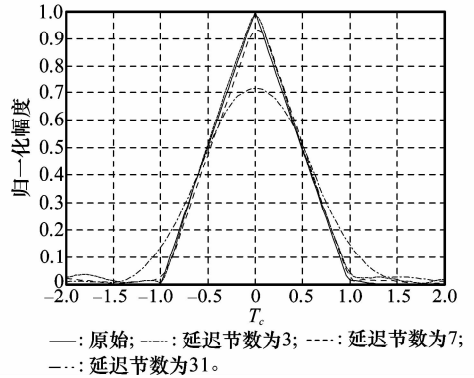


图 2 不同延迟节数相关峰比较

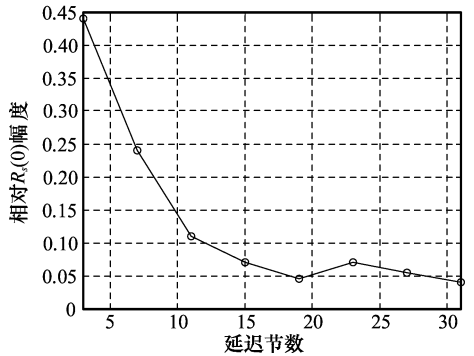


图 3 不同延迟节数的相关峰值  $C(0)$

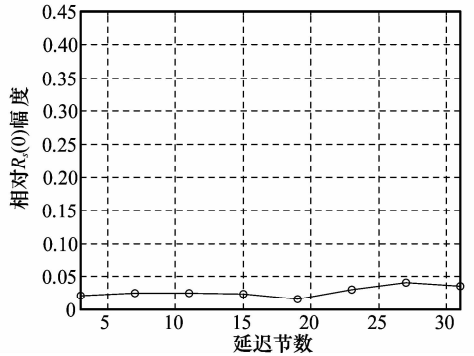


图 4 不同延迟节数的相关旁瓣  $C(T_c)$

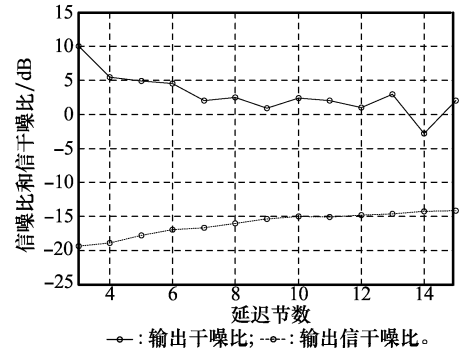


图 5 不同延迟节数的空时处理性能

由图 2 可知, GPS 信号相关峰随延迟节数目增加而展宽, 相关峰逐渐平坦, 同时相关峰有一定的偏移。其偏移量对不同方向的信号不相等, 因而会产生伪距估计误差。由式(17)可知, 空时自适应处理后, 相关函数  $C(\tau)$  由不同延迟的标准相关函数  $R_c(\tau)$  加权合成, 多个滞后的  $R_c(\tau)$  叠加造成了  $C(\tau)$  的主瓣(相关峰)展宽和畸变。对比图 3 和图 4 可看出, 当延迟节数增加时, 相关峰  $C(0)$  严重下降, 而旁瓣  $C(T_c)$  变化不明显, 造成对相关峰的捕获能力减弱。

由图 5 可知, 延迟节数增加到 7 时, 干扰已经被抑制到 0 dB 附近。当延迟节继续增加时, 干扰抑制性能改善不明显。对于仿真 1 的信号环境, 选择 7 个延迟节比较合适, 延迟节数继续增加对干扰抑制能力基本无改善, 而过多的延迟节会带来相关峰畸变, 同时增加了运算复杂度。

**仿真 2** 延迟节数为 7 保持不变, 阵元数从 4 增加到 16, 仿真结果如图 6~图 8 所示。

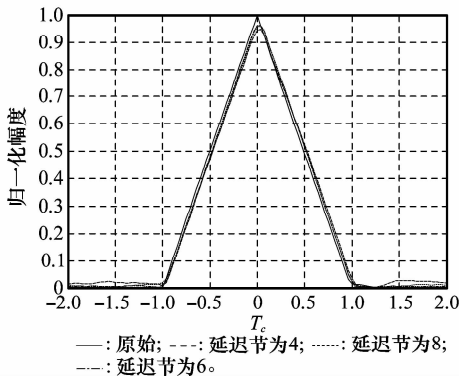


图 6 不同阵元数相关峰比较

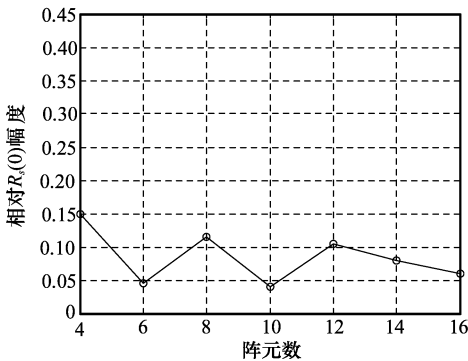


图 7 不同阵元数的相关峰值  $C(0)$

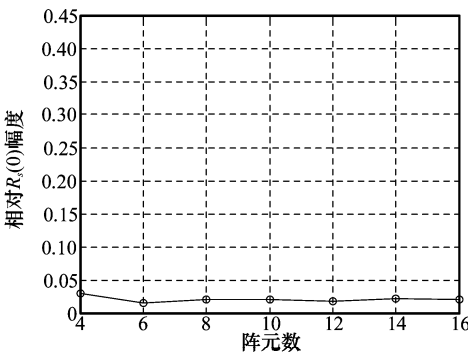


图 8 不同阵元数的相关旁瓣  $C(T_c)$

由图 6 可知, 信号相关峰与标准峰值相比大幅下降。结合图 7, 不同阵元的相关峰基本不变, 因为  $\frac{\xi_m}{c} \ll T_c$ , 不同的  $\frac{\xi_m}{c}$  近乎相等, 这些相关峰位置基本重合。从图 8 可知, 旁瓣幅度不随阵元数变化。因此, 阵元数变化基本不影响相关峰形状。

**仿真 3** 阵元数为 4, 延迟节数目为 15, 仿真结果如图 9 所示。

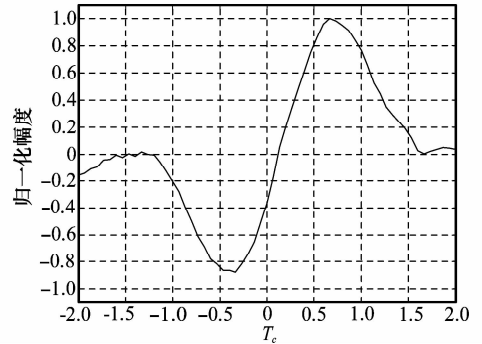


图 9 DLL 环鉴相曲线

图 9 为空时处理后码跟踪环的迟早相关器输出曲线, 由于空时处理后导致相关峰位移并且形状不对称, 使码跟踪环的鉴相曲线未经过坐标原点, 导致码跟踪环将信号锁定到错误的延迟上, 产生码跟踪误差。

**仿真 4** 阵元数为 4, 延迟节数目为 15, 经过维纳滤波仿真结果如图 10~图 11 所示。

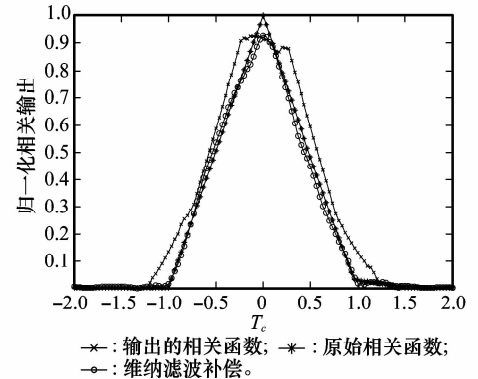


图 10 维纳滤波补偿相关函数

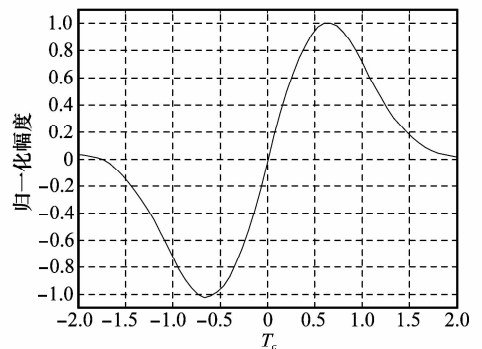


图 11 维纳滤波修正后的鉴相曲线

可以看出,经过维纳滤波后,相关峰的展宽得到了校正,其形状非常接近标准相关峰,同时相关峰的位置得到了修正,基本消除了空时自适应处理带来的相关峰畸变。

由式(17)可知,为了减少空时自适应滤波引入的相关函数叠加对相关峰的影响,应该减少叠加数目,即减小  $N$  和  $K$  以减轻对相关函数的影响。但是降  $N$  和  $K$  意味着降低了自适应系统自由度,这将降低空时自适应处理的性能。所以在空时自适应处理时需要权衡系统抗干扰能力和空时自适应带来的相关峰畸变。

## 6 结束语

本文通过推导得到了阵列自适应处理后的相关函数,能够定量地分析阵列处理对相关峰的影响。通过分析可知,空域自适应处理不会影响信号,而空时自适应处理虽然能够有效地抑制干扰,但会使相关函数产生畸变,展宽主瓣,降低相关峰主旁瓣比,造成捕获和码跟踪误差。采用空时自适应处理需要权衡抗干扰性能与定位精度。但由于空时响应已知,对相关函数做维纳滤波能够很好地校正空时自适应引入的失真,仿真结果验证了该方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] Fante R L, Vaccaro J J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 549 - 564.
- [2] Myrick W L, Goldstein J S, Zoltowski M D. Low complexity anti-jam space-time processing for GPS[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001: 2233 - 2236.
- [3] 卢丹, 冯青, 吴仁彪. 基于空时自适应处理的 GPS 宽带干扰抑制技术[J]. *中国民航大学学报*, 2007, 25(4): 1 - 4. (Lu D, Feng Q, Wu R B. Space-time adaptive processing technique for GPS wideband interference suppression[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2007, 25(4): 1 - 4.)
- [4] 任超, 吴嗣亮, 王菊. 一种新的 GPS 接收机宽带干扰抑制方法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(8): 1977 - 1980. (Ren C, Wu S L, Wang J. A novel wideband interference cancellation method for GPS receiver[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1977 - 1980.)
- [5] 项建弘, 郭黎利, 陈立明. GPS 空时自适应抗干扰系统性能研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(5): 1022 - 1025. (Xiang J H, Guo L L, Chen L M. Study of performance of GPS space-time adaptive anti-jam system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(5): 1022 - 1025.)
- [6] Au W, Chen L, Loo K, et al. Simulation study of wideband interference rejection using STAP[C]// *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, 2006.
- [7] De Lorenzo D S, Gautier J, Rife J, et al. Adaptive array processing for GPS interference rejection[C]// *Proc. of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2005: 618 - 627.
- [8] Goldstein J S, Reed I S, Scharf L L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998, 44(7): 2943 - 2959.
- [9] Myrick W L, Zoltowski M D, Goldstein J S. Anti-jam space-time preprocessor for GPS based on multistage nested Wiener filter[C]// *Proc. of the IEEE Military Communications Conference*, 1999: 675 - 681.
- [10] Cagley R E, Suk-seung H, Shynk J J. A multistage interference rejection system for GPS[C]// *Proc. of the Thirty-sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2002: 1674 - 1679.
- [11] 孙晓昶, 皇甫堪, 陈强, 等. GPS 接收机抗干扰空时自适应滤波方法[J]. *通信学报*, 2004, 25(8): 168 - 173. (Sun X C, Huangfu K, Chen Q, et al. Joint space-time adaptive filtering for GPS anti-jamming receiver[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2004, 25(8): 168 - 173.)
- [12] Fante R L, Fitzgibbons M P, McDonald K F. Effect of adaptive array processing on GPS signal cross correlation[C]// *Proc. of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, 2004: 579 - 583.
- [13] De Lorenzo D S. Navigation accuracy and interference rejection for GPS adaptive antenna arrays[D]. Stanford: Stanford University, 2007.
- [14] Kim U S. Mitigation of signal biases introduced by controlled reception pattern antennas in a high integrity carrier phase differential GPS system[D]. Stanford: Stanford University, 2007.
- [15] Church C M. Estimation of adaptive antenna induced phase biases in global navigation satellite systems receiver measurements [D]. Columbus: Ohio State University, 2009.
- [16] 李双勋, 程霖, 王展, 等. 空时处理信号失真的一种补偿方法[J]. *信号处理*, 2008, 24(2): 223 - 226. (Li S X, Cheng Z, Wang J, et al. The method of compensating the signal distorted by STAP[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(2): 223 - 226.)
- [17] 郭艺, 樊明. 空时处理对导航信号影响分析[J]. *航天电子对抗*, 2009, 25(4): 27 - 29. (Guo Y, Fan M. Analysis of the influence on navigation signals induced by space-time adaptive processing [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2009, 25(4): 27 - 29.)
- [18] O'Brien A J, Gupta I J. Mitigation of adaptive antenna induced bias errors in GNSS receivers[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 524 - 538.
- [19] Brennan L E, Reed L S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237 - 252.
- [20] Misra P, Enge P. *Global positioning system: signals, measurements, and performance* [M]. 2nd ed. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [21] Haykin S. *Adaptive filter theory* [M]. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall Press, 2002.