

GPS 信号空时处理后码跟踪误差的补偿方法

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: 全球卫星定位系统(global position system, GPS)接收机使用空时自适应处理能够增益信号并抑制干扰,但空时自适应处理结构影响 GPS 信号的定位精度。首先推导空时自适应处理后,GPS 信号与参考信号的相关波形,分析了空时处理对码跟踪的影响。然后在码跟踪过程中改进本地参考信号以补偿相关波形的误差,减少空时自适应处理后的码跟踪精度损失。仿真和实测结果验证了算法的有效性。

关键词: 全球卫星定位系统干扰抑制; 空时自适应处理; 码跟踪

中图分类号: TN 911.7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.03

Compensation method for code tracking error of GPS induced by space-time adaptive processing

XIANG Fei, LIAO Gui-sheng, Zeng Cao

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

Abstract: Space-time adaptive processing (STAP) is applied to global position system (GPS) receiver in order to gain signal and suppress interference. But the STAP structure may distort GPS signals and affect the positioning accuracy. The correlation function between output GPS signal of STAP and the reference signal is derived, and the effect of STAP on code tracking loop is analyzed. The distortion of correlation function is corrected by using the proposed reference signal in code tracking loop, and the degradation of code tracking accuracy caused by STAP can be reduced. Simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: global position system (GPS) interference suppression; space-time adaptive processing; code tracking

0 引 言

全球卫星定位系统(global position system, GPS)具有全天候的精密全球定位能力,已经广泛应用于军事、工业和民用领域。随着 GPS 系统的普及,GPS 信号不可避免地受到外界有意和无意的干扰。为了提高接收机工作的可靠性,保证 GPS 定位精度,GPS 接收机抗干扰问题已经成为研究热点。自适应天线阵列能够增强接收机抗干扰能力,已经成为工业界和学术界的共识。常用的天线阵列自适应波束形成算法包括功率倒置阵^[1]、最小方差无畸变(minimum variance distortionless response, MVDR)波束形成等。这些算法能够有效地抑制干扰同时保留信号,从而提高接收机输入端 GPS 信号的信干噪比。但是在城市及军事应用中,GPS 接收机工作的电磁环境十分复杂,单独使用空域抑制干扰已经无法保证接收机正常工作。文献[2]最早提出空时自适应处理(space-time adaptive processing,

STAP)算法,用于消除下视雷达杂波,提高运动目标的检测性能。文献[3]提出在 GPS 接收机中使用空时自适应结构抑制干扰,极大地提高了接收机抗干扰的能力,尤其是抗宽带等复杂干扰的能力,成为接收机抗干扰的研究方向。但是空时自适应算法中引入的时域滤波结构对 GPS 信号波形产生影响,造成 GPS 系统定位精度下降^[4-7]。

空时自适应结构给 GPS 信号带来的影响及其补偿方法引起了广泛关注,已经提出了许多方法:文献[5]提出离线校准后查表补偿方法;文献[6]提出用多项式拟合相关函数估计误差方法;文献[7]提出使用相关函数泰勒展开估计误差;文献[8]提出逆滤波误差补偿方法;文献[9]提出同态滤波误差补偿方法;文献[10]提出从相关峰波形上估计误差的方法;文献[11]提出基于维纳逆滤波的误差校正方法。

上述方法能够有效地对空时处理带来的影响进行估计或者补偿,但是需要设计额外的硬件资源实现。同时,接收机接收到的 GPS 信号功率极其微弱,用接收到的 GPS 信号

收稿日期:2012-04-20; 修回日期:2012-11-15。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB707001);国家自然科学基金(61101243);中央高校基本科研业务费专项资金(K50510020028)资助课题

估计补偿参数受噪声影响较大,造成补偿结果精度不高。针对这一问题,本文改进了传统 GPS 接收机码跟踪使用的接收参考信号,设计了一种能够抑制码跟踪误差的参考信号形式,能够校正空时自适应结构产生的码跟踪误差。同时,本文所提的参考信号利用空时自适应处理结构即可获得,不需要设置额外的硬件。仿真和实测数据表明,本文方法能够校正空时自适应产生的码跟踪误差,进而提高 GPS 定位精度。

1 信号模型

GPS 接收机使用 N 元等距线阵,假设存在 P 个干扰信号,接收信号在经过下变频和采样后可写为

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}_i d_i(n) c_i(n) \cos(2\pi f_0 n + \varphi_i) + \sum_{k=1}^P \mathbf{a}_k s_k(n) + \mathbf{v}(n) \quad (1)$$

式中, \mathbf{a}_i 为第 i 颗 GPS 卫星信号的导向矢量; $d_i(n)$ 为第 i 颗卫星传送的导航电文; $c_i(n)$ 为第 i 颗卫星的扩频序列; f_0 为 GPS 信号中频; φ_i 为 GPS 信号的初相; \mathbf{a}_k 为第 k 个干扰信号的导向矢量; $s_k(n)$ 为第 k 个干扰信号; $\mathbf{v}(n)$ 为接收机热噪声。

记 $s_i(n) = d_i(n) c_i(n) \cos(2\pi f_0 n + \varphi_i)$, 得

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}_i s_i(n) + \sum_{k=1}^P \mathbf{a}_k s_k(n) + \mathbf{v}(n) \quad (2)$$

为抑制干扰信号,采用空时自适应处理增强接收机的抗干扰能力。空时自适应处理结构如图 1 所示。与空域自适应处理相比,空时自适应处理是空域时域二维结构。 N 个天线阵元后接 K 个延迟节,每个延迟节的延迟时间为 τ ($\tau < \frac{1}{B}$), B 为系统带宽^[12]。通过自适应调整 $N \times K$ 个复加权,空时处理能够抑制干扰。

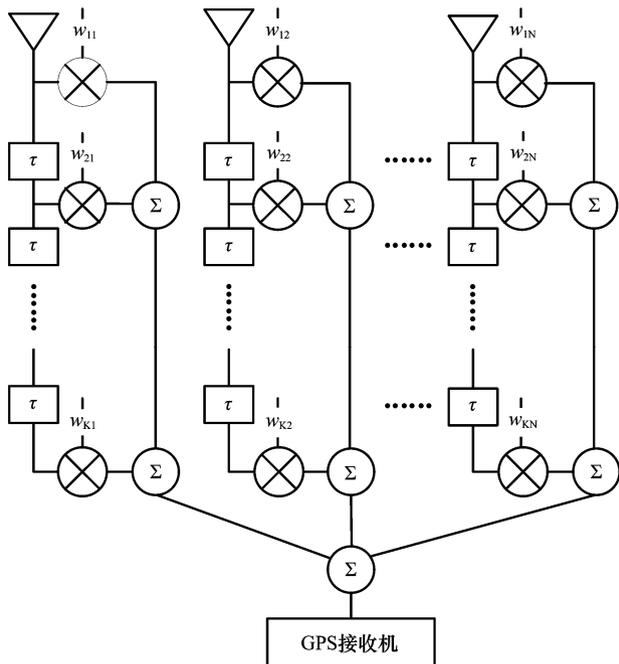


图 1 空时自适应处理结构

记 \mathbf{x}_{kn} ($k=1, 2, \dots, K; n=1, 2, \dots, N$) 为第 n 个阵元,第 $(k-1)$ 个延迟节抽头处的信号,则同一快拍的数据 x_{kn} 写成长矢量形式为

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

式中, $\mathbf{x}_n = [x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{Kn}]^T$ ($n=1, 2, \dots, N$) 为第 n 个阵元全部 K 个延迟节处信号构成的数据矢量。

2 STAP 对 GPS 信号与参考信号相关波形的影响

考虑常用的 MVDR 准则,在 MVDR 准则下,抑制干扰的最优权是式(3)优化问题的最优解

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

式中, $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}_{ST}^H \mathbf{x}_{ST}]$ 是 GPS 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 表示克罗奈克(kronecker)积。GPS 信号的空域和时域导向矢量分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_s &= [1, \exp(j \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}), \exp(j \frac{2\pi 2d \sin \theta}{\lambda}), \\ &\dots, \exp(j \frac{2\pi(N-1)d \sin \theta}{\lambda})] \\ \mathbf{a}_t &= [1, \exp(j \frac{2\pi f_0}{f_s}), \exp(j \frac{2\pi 2f_0}{f_s}), \\ &\dots, \exp(j \frac{2\pi(K-1)f_0}{f_s})] \end{aligned}$$

式中, θ 为信号方向; f_0 为 GPS 信号载频。由拉格朗日乘子法得到式(3)中空时自适应处理的最优权为

$$\mathbf{w}_{opt} = \mu \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{s} \quad (4)$$

式中, $\mu = \frac{1}{\mathbf{s}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{s}}$ 。

将最优权 \mathbf{w}_{opt} 重写为矢量形式

$$\mathbf{w}_{opt} = [\mathbf{w}_1^T, \mathbf{w}_2^T, \dots, \mathbf{w}_K^T]^T$$

式中, $\mathbf{w}_k = [\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kN}]^T$ ($k=1, 2, \dots, K$) 为第 k 级延迟节对应的 N 个复权值构成的矢量。

设阵列接收信号为

$$\mathbf{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_N(n)]^T$$

则第 k 级延迟抽头处的信号写成向量形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k(n) &= [x_{k1}(n - \tau_k), x_{k2}(n - \tau_k), \\ &\dots, x_{kN}(n - \tau_k)]^T = \mathbf{x}(n - \tau_k) \end{aligned}$$

式中, τ_k 为第 k 级延迟节对应的时延。空时自适应滤波的输出为

$$y(n) = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^H \mathbf{x}(n - \tau_k) \quad (5)$$

考虑到 STAP 后干扰被抑制到噪声电平附近,式(5)中忽略了输出中的干扰项。

不失一般性,考虑 PRN1 卫星与参考信号的相关波形。式(5)与对应 PRN1 卫星的本地参考信号 $l(n)$ 相关得到

$$\begin{aligned} r(\tau) &= y(n) l^*(n) = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^H \mathbf{a}_1 s(n - \tau_k) l^*(n) = \\ &= \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^H \mathbf{a}_1 r_s(\tau - \tau_k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $*$ 表示共轭; $r_s(\tau)$ 是 GPS 信号与参考信号的相关波形。

由式(6)可知,空时处理后 GPS 信号与参考信号的相关波形 $r(\tau)$ 是由 K 个相关波形 $r_s(n-\tau_k)$ 叠加生成的。这 K 个相关波形由 K 级延迟节分别产生,与真实相关波形在时间上存在 τ_k 的延时,其幅度分别为 $w_k^H a_1$ ($k=1, 2, \dots, K$)。显然,这些相关波形叠加后造成 GPS 接收机相关器输出的相关值 $r(\tau)$ 偏离真实值 $r_s(\tau)$ 。在码跟踪过程中,相关波形的峰值决定了延迟锁定环鉴相结果。由于多个相关波形的叠加,导致相关峰偏离真实位置,并且产生相关峰形变,造成鉴别器过零点误差,进而导致码跟踪误差。

3 补偿空时自适应处理影响的码跟踪环

为了减小码跟踪误差,需要校正 STAP 对接收 GPS 信号的影响。由式(6)可知,STAP 后相关波形会受到影响。在码跟踪环中,相关波形的峰值形状和位置决定了码跟踪的精度。如果能够得到不失真的相关波形峰值就能抑制空时自适应产生的伪距估计误差。本文在码跟踪过程中使用一种改进的本地参考信号,能够校正相关函数主瓣的失真。

假设载波频率和相位估计准确,则卫星 PRN1 的参考信号可写为

$$l(n) = c_1(n) \cos(2\pi f_0 n + \theta_0) \quad (7)$$

用 GPS 信号的导向矢量 a_1 对参考信号进行加权,则参考信号式(7)变为 N 维矢量,即

$$l_{in}(n) = a_1 c_1(n) \cos(2\pi f_0 n + \theta_0) \quad (8)$$

然后把式(8)代入 STAP 结构,对这 N 维矢量使用式(4)中得到的空时自适应进行空时二维加权,得到

$$l_p(n) = \sum_{k=1}^K w_k^H l_{in}(n) = \sum_{k=1}^K w_k^H a_1 c_1(n) \cos(2\pi f_0 n + \theta_0) \quad (9)$$

式(9)与空时处理后的信号(即式(5))相关可得

$$r_p(\tau) = y(n) l_p^*(n - \tau) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K w_n^H a_1 r_s(\tau - \tau_n + \tau_k) a_1^H w_k = \sum_{n=1}^N (w_n^H a_1)^2 r_s(\tau) + \sum_{n=1}^N \sum_{k=n+1}^K w_n^H a_1 a_1^H w_k r_s(\tau - \tau_n + \tau_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{n=k+1}^N w_n^H a_1 a_1^H w_k r_s(\tau - \tau_n + \tau_k) \quad (10)$$

式中, $r_s(\tau)$ 为 GPS 信号的自相关函数。

由式(10)可知,相关函数 $r_p(\tau)$ 中的 $\sum_{n=1}^N (w_n^H a_1)^2 r(\tau)$ 是无误差的 GPS 信号与参考信号的相关波形。第 2 项 $\sum_{n=1}^N \sum_{k=n+1}^K w_n^H a_1 a_1^H w_k r_s(\tau - \tau_n + \tau_k)$ 和第 3 项 $\sum_{k=1}^K \sum_{n=k+1}^N w_n^H a_1 a_1^H w_k r_s(\tau - \tau_n + \tau_k)$ 是时域移位的相关波形。对于给定的 n 和 k ,相关峰值幅度相等并关于真实峰值位置 $\tau=0$ 对称。这两个相关函数的相关峰叠加将产生中心在 $\tau=0$ 的等腰梯形。因此合成后相关波形 $r_p(\tau)$ 的相关峰是关于 $\tau=0$ 的对称图形,其形状为对称的三角形。 $r_p(\tau)$ 的峰值位置在 $\tau=0$ 处,如图 2 所示。

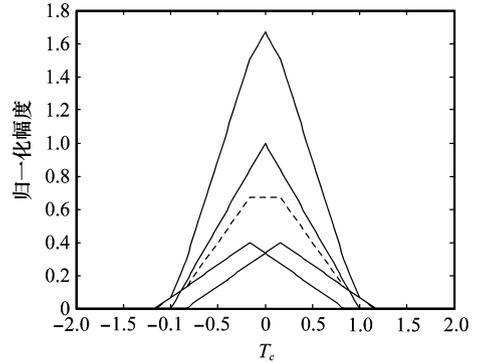


图 2 相关峰示意图

在图 2 中,式(10)中第 2 项和第 3 项产生偏移的两个相关峰,这两个相关峰的合成为图 2 中的虚线。与无误差的相关峰(即式(10)中第 1 项)叠加后得到的最终相关峰是关于 $\tau=0$ 对称的三角形波形。所以在码跟踪时,使用式(9)作为本地参考信号能够校正空时处理后相关函数的形变。但是,由于叠加的影响,造成最终相关波形的相关峰相对无误差的相关峰有所展宽。下面考虑展宽对码跟踪延迟锁定环的影响。

考察延迟锁定环零跟踪中常用的迟早相关器^[13],假设超前相关器和滞后相关器的时间间隔为 T_c , T_c 为扩频序列的码片宽度。超前相关器输出为

$$E = y(n) l_p^* \left(n - \tau + \frac{T_c}{2} \right)$$

滞后相关器输出为

$$L = y(n) l_p^* \left(n - \tau - \frac{T_c}{2} \right)$$

相干延迟锁定环的鉴相器函数为

$$D = E - L = \sum_{n=1}^N (w_n^H a_1)^2 \left[r \left(\tau - \frac{d}{2} \right) - r \left(\tau + \frac{d}{2} \right) \right] + \sum_{n=1}^N \sum_{k=n+1}^K w_n^H a_1 a_1^H w_k \left[r \left(\tau - \tau_n + \tau_k - \frac{d}{2} \right) - r \left(\tau - \tau_n + \tau_n + \frac{d}{2} \right) \right] + \sum_{k=1}^K \sum_{n=k+1}^N w_n^H a_1 a_1^H w_k \left[r \left(\tau - \tau_n + \tau_k - \frac{d}{2} \right) - r \left(\tau - \tau_k + \tau_n + \frac{d}{2} \right) \right] \quad (11)$$

为了同步本地参考信号和接收信号,延迟锁定环使鉴相器函数等于零。显然从式(11)可得当 $\tau=0$ 时, $D=0$ 。此时延迟锁定环能够无误差地同步本地参考信号和接收信号。所以所提参考信号与接收的 GPS 信号相关后,虽然相关峰展宽,但是能够校正空时处理导致的码跟踪误差。

与传统算法相比,本文所提参考信号可通过空时自适应结构获得(见图 3),不需要额外的运算复杂度估计校正参数,同时不需要额外设计校正处理结构,因而不会增加接收机的硬件规模,可节省接收机的硬件资源。

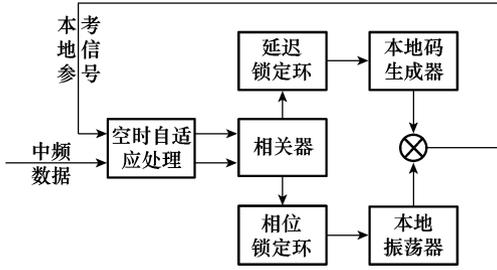


图 3 本文算法的 GPS 接收机处理框图

4 仿真和实测结果

4.1 仿真实验

使用 Matlab 软件作为仿真平台,天线阵列采用 4 元等距阵,阵元间距为 $\frac{\lambda}{2}$,如图 4 所示。仿真信号为 GPS L1 上的 C/A 码信号,中频为 5 MHz,采样频率为 30 MHz,信噪比为 -15 dB,来波方向为俯仰角 $\phi=90^\circ$,方位角 $\theta=0^\circ$ 。假设存在一个点频连续波干扰信号,频率为 30.5 MHz,来波方向为俯仰角 $\phi=30^\circ$,方位角 $\theta=30^\circ$ 。干扰的信噪比为 10 dB。

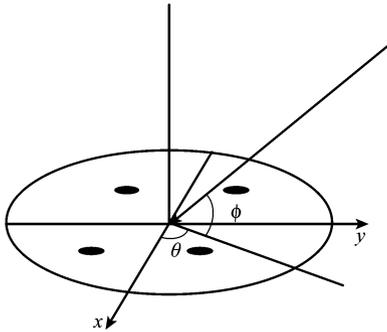
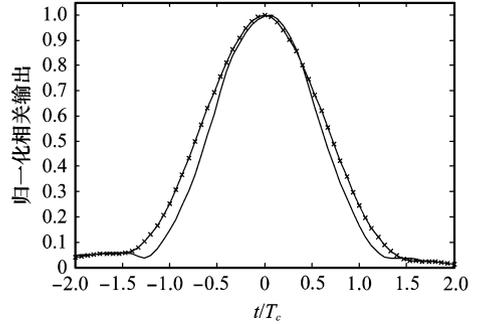


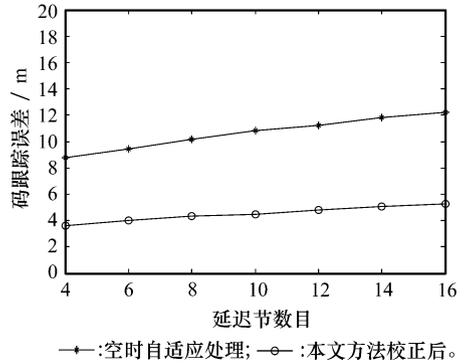
图 4 天线阵列模型

空时处理后,相关峰如图 5 所示。图中横坐标为以 T_c (码片时宽)为单位的时间。经过空时处理后,GPS 信号与参考信号相关波形的主峰不再是关于 $\tau=0$ 对称的三角形,同时其峰值位置偏离了真实点,进而产生码跟踪误差。使用所提参考信号与空时处理后 GPS 信号的相关如图 5 所示,相关峰的对称性得到恢复,与未处理的相关峰相比,主瓣有一定展宽,但是校正了相关峰的位置,因而提高了码跟踪精度。图 6 所示为不同延迟节数目下的码跟踪性能,横坐标为延迟节数目,纵坐标为码跟踪误差。空时自适应包含时域滤波,其中的延迟节会影响相关函数的形状,如图 5 所示。从式(6)可知,延迟节数目越多对相关峰的影响越大,结合图 6 中的码跟踪误差随延迟节数目的增加而增加的现象,与这一结论吻合。文献[14]中指出增加延迟节数目不能提高信干噪比,因而在空时处理中延迟节的数目不是越多越好。而本文方法校正了相关峰形状和位置,能够减小码跟踪误差,而且当延迟节数目增加时,伪距估计误差的增幅减小。



—:空时处理后的相关函数;—+—:本文方法校正后。

图 5 相关峰比较

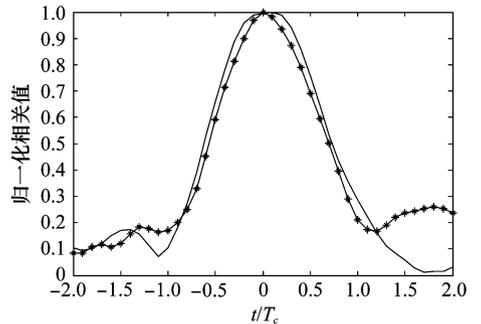


—+—:空时自适应处理;—o—:本文方法校正后。

图 6 码跟踪误差

4.2 实测数据

GPS 接收天线阵列为半波长排列的 4 元方阵,相邻阵元间距为半波长,如图 4 所示。接收 L1=1 575.42 MHz 上的 C/A 码 GPS 信号。中频为 7.5 MHz,采样率为 10 MHz。实测天线接收到的 GPS 信号加噪声功率约为 -90 dBm。实验中的干扰信号由 Agilent E4438C 信号发生器产生后通过天线发射。干扰的来波方向在图 7 所示的坐标系下为方位角 $\theta=0^\circ$,俯仰角 $\phi=30^\circ$ 。干扰信号功率设为 -50 dBm。空时自适应处理的延迟节数目设为 3。



—:空时处理后的相关波形;—+—:本文方法校正后。

图 7 实测数据的相关峰

图 7 中横坐标为时间,单位为 T_c ,纵坐标为归一化的相关值。相关波形的相关峰因为空时处理产生了严重变形,因而会带来极大误差。通过本文方法的处理后,相关峰

的形状得到明显改善,其峰值位置得到校正,同时相关峰形状基本恢复。

5 结束语

GPS接收机使用STAP能够极大地提高接收机的抗干扰能力,但是GPS信号会受到空时自适应结构的影响。通过推导空时处理后GPS信号的相关波形,本文分析了空时处理对码跟踪的影响。针对STAP带来的问题,设计了一种能够抑制码跟踪误差的参考信号形式,仿真和实测结果表明,本文所提算法能够补偿STAP引起的码跟踪误差,提高GPS接收机伪距估计精度。

参考文献:

- [1] Compton R T. The power-inversion adaptive array: concept and performance[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, 15(6): 803-814.
- [2] Brennan L E, Reed L S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237-252.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] De L D S. Navigation accuracy and interference rejection for GPS adaptive antenna arrays[D]. Stanford:Stanford University, 2007.
- [6] 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.
- [7] Church C M. Estimation of adaptive antenna induced phase biases in global navigation satellite systems receiver measurements[D]. Columbus, OH:Ohio State University, 2009.
- [8] 李双勋,程翥,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 Z, et al. The method of compensating the signal distorted by STAP[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(2): 223-226.)
- [9] 吴仁彪,徐如兰,卢丹. 基于同态滤波的GPS空时自适应处理补偿技术[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 554-559. (Wu R B, Xu R L, Lu D. Homomorphic filtering based compensation technique for space-time adaptive processing in GPS[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2010, 40(5): 554-559.)
- [10] 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.
- [11] 相飞,廖桂生,曾操. 空时自适应处理对GPS信号影响与补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(1): 1-6. (Xiang F, Liao G S, Zeng C. Effect of space-time adaptive processing on GPS signals and its compensation method[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2012, 34(1): 1-6.)
- [12] Vook F W, Compton R T. Bandwidth performance of linear adaptive arrays with tapped delay-line processing [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(3): 901-908.
- [13] Betz J W, Kolodziejewski K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator—part II: noncoherent processing and numerical results[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(4): 1557-1564.
- [14] O'Brien A J, Gupta I J. Comparison of output SINR and receiver C/N₀ for GNSS adaptive antennas[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(4): 1630-1640.

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

廖桂生(1963-),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理。

E-mail: gsliao@xidian.edu.cn

曾操(1979-),男,副教授,博士,主要研究方向为阵列信号处理、信号检测与估计。

E-mail: czeng@mail.xidian.edu.cn