

# GNSS 自适应阵列天线引入误差的分析与估算

赵宏伟<sup>1,2</sup>, 冯娟<sup>1</sup>, 廉保旺<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129;

2. 陕西烽火通信集团有限公司, 陕西 宝鸡 721006)

**摘要:** 自适应阵列天线作为全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)抗干扰应用中的重要工具, 已经得到了广泛应用。然而, 自适应阵列天线在抑制干扰的过程中, 破坏了GNSS信号的完整性, 给GNSS接收机测量引入了新的误差。首先从理论上分析测量误差的来源, 然后通过仿真分析自适应阵列天线对接收机码相关函数的影响, 最后提出一种码/载波相位偏差估算方法, 并进行了引入测量误差大小的估算。实验结果表明, 自适应阵列天线引入的测量误差具有不确定性, 主要是由码相位偏差引起的, 引入的伪距误差甚至达到几十米。在高精度应用中, 这些误差必须被消除或补偿。

**关键词:** 自适应阵列天线; 测量误差; 自相关函数; 码相位偏差

中图分类号: TN 911.72

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.08.02

## Analysis and evaluation of measure errors induced by adaptive antenna arrays for GNSS receiver

ZHAO Hong-wei<sup>1,2</sup>, FENG Juan<sup>1</sup>, LIAN Bao-wang<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Shaanxi Fiber Home Communication Group Limited, Baoji 721006, China)

**Abstract:** Adaptive antenna arrays, as effective tools for interference suppression, have been widely used in the global navigation satellite system (GNSS). However, in the processing of interference suppression, the adaptive antenna arrays destroy the integrity of GNSS signals and lead to measure errors for GNSS receivers. The sources of measure errors are derived in theory firstly. Then the effect of adaptive antenna arrays on the code correlation function of the receive is analyzed by simulation. Finally, a measure method of code phase biases is proposed and pseudo-range errors are evaluated. Simulation results show that the measure errors induced by adaptive antenna arrays are random values and mainly induced by code phase errors, and the pseudo-range errors even reach tens of meters. In precise applications, these errors must be mitigated or compensated.

**Keywords:** adaptive antenna array; measure error; correlation function; code phase error

## 0 引言

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)是一种以卫星为基础的无线电导航系统, 它通过导航卫星向全球范围的用户播发全天候、高精度、连续实时的导航、定位和授时信息, 为海陆空等领域用户提供服务。

由于GNSS卫星运行于空间轨道, 到达地面的信号功率极其微弱, 因而容易受到各种有意和无意干扰的影响。这些干扰信号降低了GNSS接收机的定位和导航精度, 严重时甚至会造成接收机无法正常工作。目前, 针对GNSS

接收机的抗干扰技术研究已经得到了广泛的关注。

自适应阵列天线作为GNSS接收机抑制干扰的主要工具, 它能够根据空间环境变化, 实时改变各阵元的增益和相位, 使阵列方向图能够在干扰方向上产生零陷, 或在期望信号方向上形成主瓣, 从而达到消除干扰的目的<sup>[1]</sup>。

然而, 自适应阵列天线在空时域抑制干扰的同时, 也破坏了GNSS信号的完整性, 给GNSS接收机引入了测量误差<sup>[2]</sup>。这主要表现在两个方面: ①GNSS接收机的相位测量是以接收机天线的相位中心为基准的, 而阵列天线中由于各阵元之间的电磁耦合、空间位置偏差, 以及生产工艺造

成的性能差异等,会使天线的相位中心发生变化,从而给接收机测量引入误差,这种误差是由于阵列天线的物理性质等原因引起的,可以通过传统的天线校准技术来补偿;②阵列天线的自适应波束形成算法随着空间入射信号的变化而实时改变阵列天线的方向图,这相当于改变了空时滤波器的传输函数,也即天线中心相位和群延迟为入射信号的函数,随着空间环境的变化而变化,因此,阵列天线采用的自适应波束形成算法不可避免地给接收机相位测量引入了误差,它们主要表现在码相位测量误差和载波相位测量误差上<sup>[3-4]</sup>,这种误差通常随空间环境变化而变化,是不确定性的误差,无法采用固定的天线相位校准技术来消除。

目前针对GNSS自适应阵列天线的研究,主要集中在阵列天线的抗干扰性能上,很少有学者去考虑阵列天线对GNSS接收机测量引入的不确定性误差。文献[5]研究GNSS阵列天线相位中心的变化及其对伪距测量的影响;文献[6]提出利用维纳滤波对失真的相关函数进行补偿来消除阵列天线引入的误差。

本文首先从理论上分析和推导自适应阵列天线给接收机测量引入的误差;然后研究阵列天线和不同自适应算法对接收机码相关函数的影响;最后通过仿真实验估算自适应阵列引入测量误差的大小。为进行误差补偿和提高导航精度提供理论依据。

## 1 自适应阵列天线模型

自适应阵列天线通常由多个天线阵元和一个自适应处理器组成。各阵元之间按照一定要求进行馈电和空间排列,根据阵元放置方式的不同,阵列天线可分为线阵和面阵。常见的线阵是各阵元中心依次等距排列在一条直线上的均匀线阵。不失一般性,本文中的建模和仿真均是建立在均匀线阵模型的基础上。

假设阵列在空间中沿y轴放置,阵列间距等于GNSS信号波长的一半。阵列中第1个阵元为参考阵元,第m个阵元的空间坐标为( $x_m, y_m, z_m$ ),阵列的几何关系如图1所示。其中,θ和φ分别为入射信号的俯仰角和方位角。

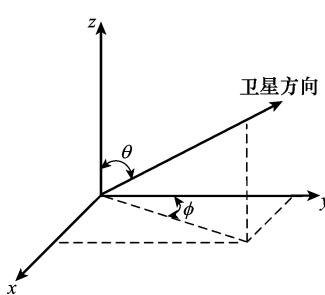


图1 阵元位置与入射信号关系图

通常,阵列天线的空间自由度由阵元个数决定,也就是说,如果自适应阵列天线的阵元个数为M,则该阵列最多能

消除M-1个干扰。为了提高阵列天线的抗干扰个数,可采用在每个阵元后接一个时域滤波器的方法,这称为空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP)。STAP阵列模型如图2所示。

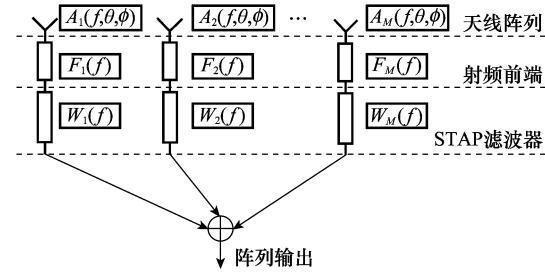


图2 STAP阵列模型

图2中, $A_m(f, \theta, \phi)$ 表示第m个阵元的传输函数,它与入射信号的频率、方向有关; $\theta$ 和 $\phi$ 分别表示入射信号的方位角和俯仰角; $F_m(f)$ 为射频前端的传输函数; $W_m(f)$ 为第m个阵元后的时域滤波器的传输函数,它只与入射信号的频率有关。其中, $W_m(f)$ 定义为

$$W_m(f) = \sum_{p=1}^P w_{mp} e^{-j2\pi f T_0 (p-1)} \quad (1)$$

式中, $T_0$ 表示抽样周期。用 $H(f, \theta, \phi)$ 表示自适应阵列的传输函数,则有

$$H(f, \theta, \phi) = \sum_{m=1}^M A_m(f, \theta, \phi) F_m(f) W_m(f) \quad (2)$$

假设天线阵元和射频前端是理想的,则卫星信号通过每个阵元和射频前端后得到的中频形式可以表示为

$$s(t) = A_0 s(t - \tau_0) e^{j\psi_0} \quad (3)$$

式中,s(t)是一个二进制的伪随机码序列; $A_0$ 是序列的幅度; $\tau_0$ 是码相位延迟; $\psi_0$ 是载波相位。

信号s(t)经过自适应阵列后输出的频域形式可表示为

$$X_s(f) = A_0 S(f) H(f, \theta, \phi) e^{j\psi_0 - j2\pi f \tau_0} \quad (4)$$

式中,S(f)为信号s(t)的傅里叶变换。

## 2 自适应阵列引入的测量误差

GNSS接收机中, $\tau_0$ 和 $\psi_0$ 是接收机测量中的两个重要参数,自适应阵列天线的引入相当于对入射信号进行空域滤波,因而不可避免地给入射信号带来畸变。下面通过推导 $\tau_0$ 和 $\psi_0$ 的变化来分析阵列天线引入的接收机测量误差。

阵列天线在自适应处理后,阵列输出信号 $x_s(t)$ 与本地参考扩频码进行相关计算,接收机通过寻找相关值的最大位置得到接收信号的码时延。在时刻 $\tau$ ,阵列输出与本地扩频码的互相关函数可表示为

$$R(\tau) = c A_0 \int_{-\infty}^{\infty} \phi_s(f) H(f, \theta, \phi) e^{j\psi_0} e^{j2\pi f (\tau - \tau_0)} df \quad (5)$$

式中c表示一个常值; $\phi_s(f)$ 是信号s(t)的功率谱密度。

求解式(5)中使  $R(\tau)$  最大的  $\tau$ , 即可得到接收机的码相位时延值

$$\tau_m = \arg \max_{\tau} |R(\tau)| \quad (6)$$

载波相位测量值  $\psi_m$  为互相关函数  $R(\tau)$  在时刻  $\tau_m$  时的角频率, 即  $\psi_m = \angle R(\tau_m)$ 。

在式(5)中, 如果  $H(f, \theta, \phi) = 1$ , 则  $R(\tau)$  在  $\tau = \tau_0$  时达到最大, 此时互相关函数的载波相位等于  $\psi_0$ , 这样得到的码时延和载波相位测量值是无偏差的。然而对于自适应阵列天线,  $H(f, \theta, \phi)$  随入射信号的方向变化而变化, 互相关函数为变量  $\theta$  和  $\phi$  的函数, 此时码时延的偏差

$$\tau_m(\theta, \phi) = \arg \max_{\tau} R(\tau) \quad (7)$$

载波相位偏差

$$\psi_m(\theta, \phi) = \angle R(\tau_m, \theta, \phi) \quad (8)$$

由式(7)和式(8)得到的码相位和载波相位偏差可以进一步估算出阵列天线给接收机测量引入的误差。

### 3 自适应阵列对接收机码相关函数的影响

#### 3.1 仿真步骤

通过仿真实验分别研究了自适应阵列中各阵元输出与接收机码相关函数的关系, 以及不同的自适应算法对接收机码相关函数的影响, 仿真过程如下。

**步骤 1** 模拟产生 GNSS 卫星信号, 这些信号来自空间不同方向, 信噪比可调。本文不考虑由天线阵列的物理原因及射频前端器件等引起的有用信号变化, 因而模拟产生的 GNSS 信号为没有畸变的中频 GNSS 信号。

**步骤 2** 根据自适应天线阵列的导向矢量, 得到各阵元输出, 分别观察各阵元输出信号与本地参考信号的互相关性能。

**步骤 3** 卫星信号中加入干扰, 采用不同的自适应波束形成算法得到阵列输出, 验证各算法对接收机码互相关函数的关系。

**步骤 4** 验证自适应天线阵列对接收机载波跟踪环的影响。

#### 3.2 不同阵元对码相关函数的影响

根据文献[7], 包含  $M$  个阵元的均匀线性阵列中, 方位角为  $\phi$ , 俯仰角为  $\theta$  的信号的导向矢量为

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta \sin \phi) d\right) \\ \vdots \\ \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta \sin \phi) (M-1)d\right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  表示入射信号波长;  $d$  表示阵元间距。当有  $N$  个信号同时到达阵列天线时, 这  $N$  个信号的导向矢量  $\mathbf{A}$  可表示为  $M \times N$  的矩阵形式

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_1 \sin \phi_1) d\right) & \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_2 \sin \phi_2) d\right) & \cdots & \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_N \sin \phi_N) d\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_1 \sin \phi_1) (M-1)d\right) & \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_2 \sin \phi_2) (M-1)d\right) & \cdots & \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_N \sin \phi_N) (M-1)d\right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

多个卫星信号通过阵列天线, 与导向矢量  $\mathbf{A}$  相乘后, 各个阵元的输出为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (11)$$

仿真实验的模拟场景中, 假设入射信号包括 3 个 GNSS 卫星信号, 信噪比为 -20 dB, 各个卫星信号的扩频码速率为 1.023 MHz, 信号入射方向如表 1 所示。

表 1 入射信号方向

卫星号	方位角/(°)	俯仰角/(°)
1	270	60
2	30	30
3	90	20

首先观察各阵元输出信号与本地码的互相关函数。采用 7 阵元天线, 本地扩频码选用与卫星 2(入射方向为  $(30^\circ, 30^\circ)$ ) 一致的扩频码, 即观察卫星 2 的信号经过阵列后与本地码的相关关系。相关过程中本地码每次滑动  $1/4$  个码片, 得到在不同码偏移情况下, 各阵元输出信号与本地码的互相关值, 如图 3 所示(仅绘出前 3 个阵元), 其中 AE 代表天线阵元。

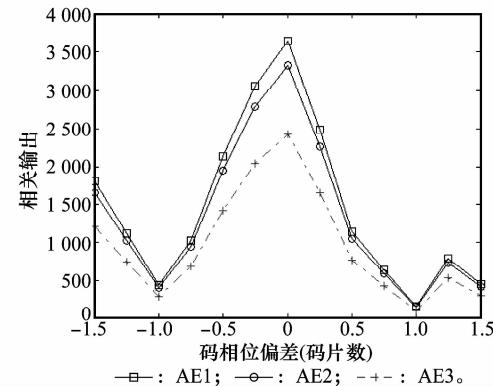


图 3 不同阵元,同一个 GNSS 信号的互相关函数

从图 3 可以看出, 各个阵元对接收信号的影响均不相同。当 GNSS 信号在没有干扰和畸变的情况下, 其互相关函数是左右对称的。接收机在进行码跟踪时, 通常使用早-中-晚延迟锁定环, 延迟锁定环实时调整早-晚相关器输出, 使其输出相等, 此时“中”相关器的输出可以看作相关函数的峰值, 从而可以得到接收信号与本地码的相对时延。当互相关函数产生如图 3 所示的变化时, 由于早-晚相关器的输出不再对称, 接收机估计得到的码时延将会产生错误。

图 4 表示在同一个阵元上(阵元 2), 不同方向上的入射信号与本地码进行相关得到的互相关函数。其中卫星 1~卫星 3 分别对应于表 1 所示的卫星信号。从图 4 可以看

出,对于不同入射方向的信号,互相关函数的变化互不相同,也即同一个天线阵元对不同入射信号的变化也不相同,从而导致天线阵列对不同信号造成的码测量误差是随着入射方向变化而变化的。

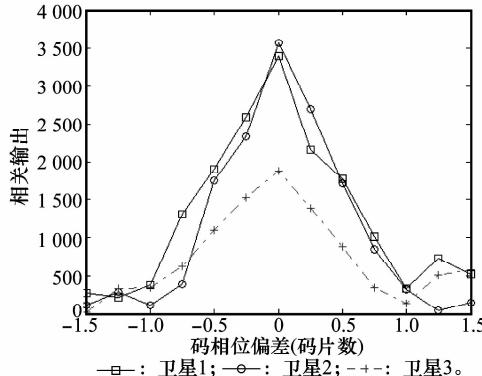


图4 同一阵元上,不同方向GNSS信号的互相关函数

### 3.3 自适应算法对码相关函数的影响

自适应算法按照一定的约束准则,根据阵列所处的空间信号环境,实时调整阵列的自适应权值,权值的变化改变了理想GNSS信号的幅度相位等信息,从而给接收机的码相位测量引入了测量误差。阵列天线采用不同的自适应算法,得到的权值一般也不同,因而对理想GNSS信号的影响也不同。

自适应阵列天线在抗干扰过程中衍生了多种自适应滤波算法,各种算法采用的约束准则<sup>[8]</sup>主要有:最小均方误差准则(minimum mean-squared error, MMSE)、线性约束最小方差准则(linearly constraint minimum variance, LCMV)、最大输出信噪比准则(maximum signal noise ratio, MSNR)、最大输出载噪比准则(maximum C/N<sub>0</sub>, MaxC/N<sub>0</sub>)等。文献[7]证明了在GNSS接收机中,MaxC/N<sub>0</sub>准则比MSNR准则具有更优的性能,因而,本节选择基于MMSE、LCMV和MaxC/N<sub>0</sub>准则的自适应算法来分析不同算法对接收信号的影响。

仿真中假设阵列接收到的信号为一个GNSS卫星信号和一个干扰信号,GNSS信号的信噪比为-20 dB,入射方向为俯仰角等于30°,方位角等于30°。干扰信号的干信比为20 dB,入射方向为俯仰角等于60°,方位角等于120°。

基于MMSE、LCMV和MaxC/N<sub>0</sub>准则的自适应权值分别可以根据文献[9]、文献[10]和文献[7]的方法得到。使用由这3种准则得到的不同权值对接收到的阵列信号进行加权处理,然后进行相关计算。

GNSS接收机的相关过程通常采用早-中-晚3组相关器,本节仿真中早-中-晚相关器的相关间隔为1/4个码片。图5表示不同码偏差下的互相关值。

从图5可以看出,不同的权矢量对互相关函数造成的影响也不同。当接收机中“早”、“晚”相关器的输出发生偏离时,GNSS信号锁定的位置也将偏离互相关函数的峰值,偏离程度与采用的自适应算法有关,是一个不确定的误差。

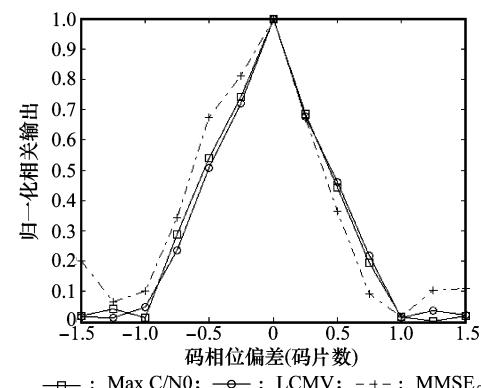


图5 采用不同自适应算法准则得到的互相关函数值

## 4 测量误差的估算

从上面的分析知道,自适应阵列天线在抑制干扰的过程中,由于自适应权值随着入射信号的变化而实时变化着,因而给接收机引入了不确定的测量误差。而采用STAP的自适应阵列天线,时域的有限冲激响应滤波器也将进一步损坏理想GNSS信号<sup>[11]</sup>。本节采用文献[7]中的自适应滤波算法,估算自适应算法引入的码相位测量和载波相位测量的误差大小,为进一步的误差补偿提供理论和实验依据。

### 4.1 实验方法

根据文献[7],自适应权值 $w_0$ 可由下式得到:

$$(\mathbf{P}_G \mathbf{P}_G^H)^{-1} \mathbf{P}_G \mathbf{R}_G \mathbf{P}_G^H w_0 = \lambda w_0 \quad (12)$$

式中, $\mathbf{P}_G$ 表示信号子空间; $\mathbf{R}_G$ 表示GNSS信号的自相关矩阵; $w_0$ 是对应于矩阵 $(\mathbf{P}_G \mathbf{P}_G^H)^{-1} \mathbf{P}_G \mathbf{R}_G \mathbf{P}_G^H$ 最大特征值的特征向量。

在实验中,首先模拟生成阵列接收信号,然后利用式(12)得到自适应权值,估计接收机跟踪环输出信号的C/N<sub>0</sub>和测量误差,具体步骤如下。

**步骤1** 模拟生成由GNSS卫星信号和干扰信号组成的混合信号,这些信号的入射方向和信号强度可调可控。

**步骤2** 混合信号通过自适应天线阵列,阵列输出被送到权值控制模块处理。

**步骤3** 保存权值,并对阵列信号进行加权合并,然后输出到接收机进行解扩和跟踪,然后再根据接收机跟踪环路的输出去估算码/载波的相位偏差,如图6表示。

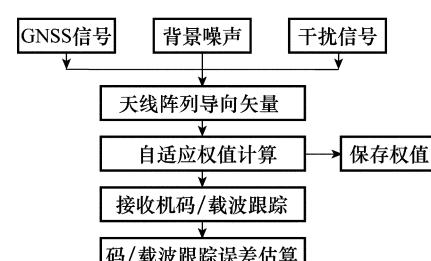


图6 码/载波相位偏差估计方法

#### 4.2 实验结果

假设信号源包括 4 个 GNSS 卫星信号和 2 个干扰信号,GNSS 信号的信噪比为 -20 dB,干信比为 30 dB,信号方位图如图 7 所示。

信号源	方位角/(°)	俯仰角/(°)
卫星1	270	60
卫星2	30	30
卫星3	90	20
卫星4	180	60
干扰1	130	30
干扰2	300	20

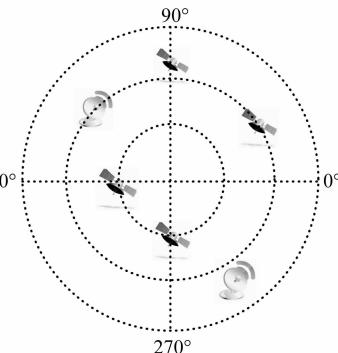


图 7 仿真场景信号方位图

首先利用式(12)得到自适应阵列的最优权值,使用最优权值对接收信号加权合并后得到干扰抑制后的信号,然后接收机对此信号进行捕获和码/载波跟踪,根据跟踪环路可以得到码相位测量误差和载波测量误差的估计值。

对图 7 中的 GNSS 信号分别进行相关运算,得到不同码偏移情况下的互相关函数值,如图 8 所示。图中只针对前 3 个卫星信号,绘出了码偏移在正负一个码片内的情况,码片每次偏移量为  $1/4$  码片。然后根据鉴相器偏差来估计接收信号的码相位偏差。

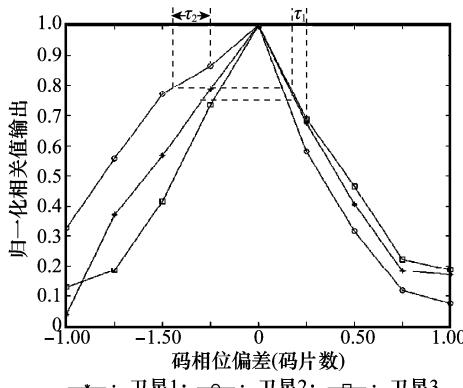


图 8 码相位偏差估计

GNSS 接收机通常采用延迟锁相环进行码相位跟踪。码环滤波器通过调整码偏移量使超前和滞后支路的互相关值趋于相等,对应于图 8 中的卫星 1,当码环滤波器调整超前、滞后支路使其相关值相等时,调整的码偏移量等于  $\tau_1$ ,相当于码相关峰值偏移了  $\tau_1$ 。同样也可以得到卫星 2 和卫星 3 的码相关峰值偏移量  $\tau_2$  和  $\tau_3$ 。

对于不同宽度的码片,不同的码相位偏差对应于不同的伪距偏差。将码片偏差转化为对应的传播时间,再乘以

光速即可得到该卫星的伪距偏差。取码速率为 1.023 MHz(GPS C/A 码速率),可以得到图 8 中卫星的伪距偏差。提高码片速率可以减少码片偏差引入的伪距误差,再取码速率为 10.23 MHz(GPS P 码速率),则此时码相位测量的误差将降低 10 倍,如表 2 所示。

表 2 码相位和载波相位偏差估计

卫星	码相位偏差		载波相位偏差	
	码片延 迟个数 (C/A 码)	距离/m (P 码)	相位 差/(°)	距离/m
1	0.06	17.6	1.76	119.8
2	0.18	52.7	5.27	16.9
3	0.03	8.8	0.88	71.7

得到码相位偏差后,对应的载波相位偏差即可由式(8)得到。取载波频率为 1 575.42 MHz,则可以得到载波相位偏差所对应的伪距偏差,也列于表 2。

从表 2 可以看出,自适应阵列引入的载波相位偏差对伪距测量的影响比较小,误差在厘米级的范围内,而码相位偏差对伪距测量的影响比较大,可能达到几十米。即使是高速扩频码,如 GPS P 码,由自适应阵列引入的伪距偏差也在数米以上,因而,高精度 GNSS 接收机在进行干扰抑制的同时,还必须要考虑自适应阵列引入的测量误差。

## 5 结 论

自适应阵列天线在抑制干扰的过程中,由自适应算法得到的最优权值随入射信号的变化而不断变化,这相当于在不断改变空时滤波器的传输函数,因而对接收信号的幅度、相位等造成失真,进而给 GNSS 接收机测量引入了不确定性的误差。本文首先从理论上分析了 GNSS 接收机的测量误差来源,然后通过实验仿真研究了自适应阵列算法对接收机自相关函数的影响,最后估算自适应算法引入的测量误差大小。实验结果表明,采用码相位测量进行伪距计算的接收机中,自适应阵列天线引入的测量误差将达到几十米,在对导航精度要求较高的场合,必须考虑对测量误差消除或补偿。

## 参考文献:

- [1] Fante R, Vaccaro J. Wideband cancellation of interference in a GPS receive array[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(4): 549–564.
- [2] Gupta I J, Church C, O'Brien A J. Prediction of antenna and antenna electronics induced biases in GNSS receivers[C]//Proc. of the 19th International Technical Meeting, 2007: 650–656.
- [3] Ung S K. Analysis of carrier phase and group delay biases introduced by CRPA hardware[C]//Proc. of the Institute of Navigation Global Navigation Satellite System, 2005: 635–642.
- [4] Church C, Gupta I, O'Brien A. Adaptive antenna induced biases in GNSS receivers[C]//Proc. of the 63rd Institute of Navigation Annual Meeting, 2007: 204–212.
- [5] Sun L. Research on anti-jamming and multipath mitigation by reduced

- distributed vector sensor in satellite navigation systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (孙莉. 卫星导航简化分布式矢量天线抗干扰和多径抑制技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2011.)
- [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 Electronics*, 2012, 34(1): 1–6. (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.)
- [7] Zhao H W, Lian B W, Feng J. Adaptive beamforming algorithm for space-time interference suppression in GNSS receivers[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(7): 1312–1317. (赵宏伟, 廉保旺, 冯娟. GNSS抗干扰接收机的自适应波束形成算法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(7): 1312–1317.)
- [8] Schreiber R. Implementation of adaptive array algorithms[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1986, 34(5): 1038–1045.
- [9] Guo D, Shamai S, Verdu S. Estimation in Gaussian noise: properties of the minimum mean-square error[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2011, 57(4): 2371–2385.
- [10] Mohamed E A, Tan Z. Adaptive antenna utilizing power inversion and linearly constrained minimum variance algorithms[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005, 18(2): 153–160.
- [11] Fante R L, Fitzgibbons M P, McDonald K F. Effect of adaptive array processing on GPS signal crosscorrelation[C]//*Proc. of the Institute of Navigation Global Navigation Satellite System*, 2004: 579–583.

## 作者简介:

赵宏伟(1980-),男,讲师,博士,主要研究方向为卫星定位导航、自适应信号处理。

E-mail:hongvi\_zhao@126.com

冯娟(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为无线通信、自适应信号处理。

E-mail:fengjuankh@hotmail.com

廉保旺(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为卫星通信、嵌入式系统设计。

E-mail:bwlian@nwpu.edu.cn

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>