

文章编号: 1001-2486(2011)05-0128-06

## 窄带假设对 GNSS 天线阵抗干扰性能评估的影响分析\*

聂俊伟, 葛锐, 李敏, 王飞雪

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**传统方法基于窄带假设条件下的模型对天线阵抗干扰性能进行评估, 存在分析精度低的问题。新一代全球卫星导航信号带宽的增加使得宽带效应更为明显, 影响将更为严重。因此, 窄带假设所造成的影响需要重新审视。论文结合当前普遍采用的数字域加权处理方式, 推导出天线阵处理频率响应的精确模型, 得出阵列处理响应在频域上可表示为空域导向矢量与时间矢量的 Kroneck 积与阵列加权值的内积。并分析了多种条件下窄带假设引入的阵列增益评估误差, 分析表明, 窄带假设条件下对阵列处理频率响应描述失真 是其对阵列增益评估引入误差的根本原因。在干信比 70dBc 时, 最大误差可达 5dB 以上, 干扰强度增加时, 误差进一步 加大。而采用上述推导的精确模型, 误差约为 0.5dB。

**关键词:** GNSS; 变频处理; 抗干扰天线阵; 窄带假设; 性能评估

**中图分类号:** TN921.7 **文献标识码:** A

## The Influence Analysis of Narrowband Hypothesis to GNSS Array Anti-jamming Performance Evaluation

NIE Jun-wei, GE Rui, LI Min, WANG Fei-xue

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The traditional method analyzes the anti-jamming biases by using narrow-band model Hypothesis. On the other hand, next-generation GNSS signals using wider bandwidth make the broadband effect more obviously. Therefore, the impact of narrow-band assumptions needs to be re-examined. This research derives the precise model under the case of DBF processing, and the conclusion is that the array response equals to the inner product of spatial steer vector and the Kroneck product of time steer vector and weights of taps. The research also analyzes the array anti-jam performance biases by narrowband assumption under the multiple factors. The results show that the main reason is the distortion of array response. When JSR is 70dBc, the maximum error introduced by narrow-band approximation model is about 5dB. The intenser the jamming, the bigger the error. At the same time, the error introduced by the above precise model is about 0.5dB.

**Key words:** Global Navigation Satellite Systems (GNSS); freq down conversion; anti-jam antenna array; narrowband assumption; performance evaluation

随着导航技术的不断发展, 卫星导航系统逐步成为了关系国家经济和军队安全的核心基础设施。由于其重要性, 要求不断提高干扰环境下的生存能力。GPS 现代化建设中, 诸多用户设备及系统设备均开始引入天线阵来提升其抗干扰能力。而阵列处理不可避免地会对导航接收设备的载噪比、测距等指标产生影响。新一代 GNSS (Global Navigation Satellite Systems) 信号带宽进一步加大, Galileo 的 AltBoc 信号带宽达 90MHz, 相对带宽为 7.5%, 宽带效应<sup>[1]</sup>将更为明显。传统的采用窄带假设(在信号相对带宽较小时, 各阵元接收信号差异仅考虑相位变化而忽略包络变化)条件下的模型分析阵列处理引入的载噪比损

耗及时延变化, 存在仅对中心频率处严格成立的问题, 分析精度较低。可以预见, 窄带假设条件将对阵列增益、伪码时延、载波相位等参量的分析结果均有影响, 本文着重分析了对阵列增益评估方面的影响, 对伪码时延、载波相位的影响分析将在后续工作中进行。

文献[2]中采用等效 FIR 滤波器来描述阵列处理响应, 但其仍然采用的是窄带假设条件, 所得到的等效 FIR 滤波器仅在中心频率处严格成立。文献[3]中对均匀线阵进行了分析, 得到了经过阵列处理后信号的频域表达式, 但没有进一步推导出阵列响应的显式表达式。文献[4-6]采用频率-波束响应函数、阵列处理传输函数等来描

\* 收稿日期: 2010-12-20

作者简介: 聂俊伟(1983—), 男, 博士生。

述阵列响应,建立了阵列处理响应与各阵元后时域滤波器频率响应、通道滤波器频率响应及阵元特性之间的关系。上述文献对阵列响应的分析有所涉及,但分析时没有结合目前普遍采用的数字域加权处理方式,未考虑变频环节的影响,对频率不加区分。文献[7]基于阵列输出端的信干噪比对信号带宽的影响进行了分析,指出整个信号带宽内对干扰的最小抑制电平加大,仅对特定信号干扰场景下的线阵进行了分析。此外,上述文献也没有进一步分析窄带假设对抗干扰性能评估的影响。

本文立足于理想通道条件,基于无近似假设的宽带模型,对阵列处理响应重新进行了推导,建立了阵列处理响应与空域导向矢量、时域矢量及阵列权值之间的关系,并指出了空域导向矢量与时域矢量在频率取值方面的差异。通过数值计算方法分析了窄带假设对抗干扰性能评估的影响,结果表明,窄带模型下结果偏乐观,部分信号干扰布局下在阵列增益方面可造成达10dB以上的误差。对于非理想通道情形,分析推导方法与本文方法类似。

## 1 理论分析

### 1.1 GNSS 抗干扰天线阵阵列处理响应理论推导

天线阵由  $N$  个全向阵元组成,阵元  $n$  的位置坐标为  $(x_n, y_n, z_n)$ 。信源  $s_k(t)$  从空间远场以平面波入射到天线阵列上,入射角为  $(\varphi_k, \theta_k)$ ,  $\varphi_k$  表示方位角,  $\theta_k$  表示仰角。参考点接收的入射信号为

$$x_{k0}(t) = a_k(t) e^{j(\omega_0 t + \beta_k)} \quad (1)$$

其中,  $a_k(t)$  为振幅调制信号,  $\omega_0$  为载波角频率,  $\beta_k$  为随机相位。

信源  $s_k(t)$  的信号传播到第  $n$  个阵元与到参考点的距离差为  $\Delta d_n$ , 对应的电磁波传播时间差为

$$\tau_n(\varphi_k, \theta_k) = \frac{\Delta d_n}{c} \quad (2)$$

其中,  $c$  为光速。

第  $n$  个阵元接收到的信号为

$$x_{kn}(t) = x_{k0}(t - \tau_n(\varphi_k, \theta_k)) \quad (3)$$

$N$  个阵元接收到的信号可用矢量表示为<sup>[2]</sup>

$$\begin{bmatrix} x_{k1}(t) \\ \vdots \\ x_{kN}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k0}(t - \tau_1(\varphi_k, \theta_k)) \\ \vdots \\ x_{k0}(t - \tau_N(\varphi_k, \theta_k)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设天线阵有  $N$  个阵元,每个阵元后接  $M$  个时域抽头,抽头时间间隔为采样间隔  $T$ , 构成空时滤波结构后可有效抑制各种宽带、窄带干扰,增加

了阵列自由度。

本振角频率为  $\omega_L$ , 则变频处理后,有

$$\begin{bmatrix} x'_{k1}(t) \\ \vdots \\ x'_{kN}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k0}(t - \tau_1(\varphi_k, \theta_k)) \\ \vdots \\ x_{k0}(t - \tau_N(\varphi_k, \theta_k)) \end{bmatrix} e^{-j\omega_L t} \quad (5)$$

阵列输出信号为

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x'_{kn} [t - (m-1)T] w_{nm}^* \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{ x_{k0} [t - \tau_n(\varphi_k, \theta_k) - (m-1)T] \\ &\quad \cdot e^{-j\omega_L(t - (m-1)T)} w_{nm}^* \} \end{aligned} \quad (6)$$

下面推导阵列处理响应的频域表达式。

对式(6)进行傅立叶变换,可得

$$Y(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [X(\omega + \omega_L) \cdot e^{-j(\omega + \omega_L)\tau_n(\varphi_k, \theta_k)} e^{-j\omega(m-1)T} w_{nm}^*] \quad (7)$$

则阵列处理响应在频域可表示为

$$H(\omega, \varphi_k, \theta_k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (e^{-j(\omega + \omega_L)\tau_n(\varphi_k, \theta_k)} \cdot e^{-j\omega(m-1)T} w_{nm}^*) \quad (8)$$

其中:  $v^s(\omega + \omega_L, \varphi_k, \theta_k) = [e^{-j(\omega + \omega_L)\tau_1(\varphi_k, \theta_k)} \dots e^{-j(\omega + \omega_L)\tau_N(\varphi_k, \theta_k)}]^T$  为空域导向矢量。  $v^l(\omega) = [1, \dots, e^{-j\omega(M-1)T}]^T$  为时域矢量。

则式(8)可表示为

$$H(\omega, \varphi_k, \theta_k) = w^H [v^l(\omega) \otimes v^s(\omega + \omega_L, \varphi_k, \theta_k)] \quad (9)$$

可见,阵列处理响应在频域上可表示为空域导向矢量与时域矢量的 Kronecker 积与阵列加权值的内积。

### 1.2 适用性分析

前一小节中得到的结论为阵列处理频率响应的精确模型,适用于空域、空时处理。在此模型下,空域导向矢量与时域矢量是频率的函数,不同频率分量处,结果不同。另外需要强调的是,空域导向矢量需采用射频频率,而时域矢量则采用相对应的变频后的中频频率。在窄带假设条件下可以进行适当简化。

在窄带假设条件下,空域导向矢量中相位项忽略了其随频率的变化,取为数字域处理中心频率  $\omega_B$ 。即空时处理窄带模型下,阵列处理响应频域表示为

$$H(\omega, \varphi_k, \theta_k) = w^H [v^l(\omega) \otimes v^s(\omega_B + \omega_L, \varphi_k, \theta_k)] \quad (10)$$

当时域抽头数为1时,即简单空域处理,时域矢量退化为标量1。则空域处理宽带模型下,阵

列处理响应频域表示为

$$H(\omega, \varphi_k, \theta_k) = w^H v^s(\omega + \omega_L, \varphi_k, \theta_k) \quad (11)$$

同理可得,空域处理窄带模型下,阵列处理响应频域表示为

$$H(\omega, \varphi_k, \theta_k) = w^H v^s(\omega_B + \omega_L, \varphi_k, \theta_k) \quad (12)$$

## 2 窄带模型对天线阵抗干扰性能评估影响分析

天线阵抗干扰性能通常由阵列增益来衡量。阵列增益<sup>[8]</sup>定义如式(13)所示。

$$G = \frac{SINR}{SNR} \quad (13)$$

式中, SINR 为阵列输出信噪比, SNR 为单个通道的接收信噪比。

传统方法在窄带假设条件下分析阵列处理对系统性能的影响,对阵列增益评估结果会产生一定的误差。但误差量的大小,需要深入分析。理论上讲,只需要获得阵列处理的频率响应,即可获得其对后端信号处理的影响。根据前文分析结果,通过数值计算方法来分析窄带模型相对于宽带模型对抗干扰性能评估所引入的误差。

### 2.1 干扰数、阵元数、具体算法的影响分析

数值计算时采用圆阵,半径为信号中心频率

对应波长的一半。信号为扩频信号,码率 10Mcps,相对带宽 1.58%。载噪比 44dBHz,干扰为带宽 20MHz 的宽带干扰,干信比 60dBc。干扰数分别为 0、1、2、3 共四种情况,阵元数取 4 元、6 元两种情况,每个阵元后时域抽头数取 1 与 15 两种情况,算法取 PI 准则与最大 SINR 准则,相应的权值确定方法如下<sup>[9]</sup>:

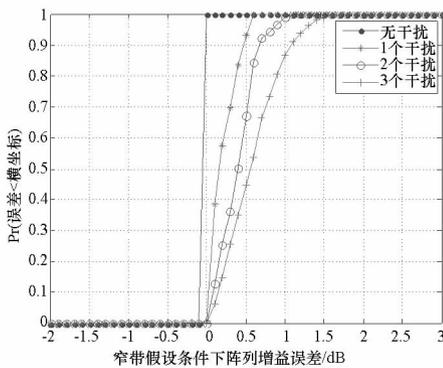
$$w_{PI} = \frac{R_{xx}^{-1}b}{b^H R_{xx}^{-1}b}, b = [1, 0, \dots, 0]^T \quad (14)$$

其中,  $R_{xx}$  为信号、干扰、噪声相关矩阵之和,  $b$  为约束矢量。

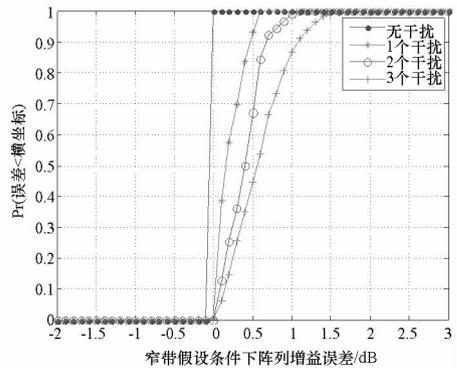
$$w_{SINR} = \mu(R_{jj} + R_{nn})^{-1}S \quad (15)$$

其中,  $\mu$  为任意常数,  $R_{jj}$  为干扰自相关矩阵,  $R_{nn}$  为噪声自相关矩阵, 为单位阵。  $S = v^i(\omega_0) \otimes v^s(\omega_0 + \omega_L, \varphi_0, \theta_0)$ , 为有用信号的空时导向矢量。

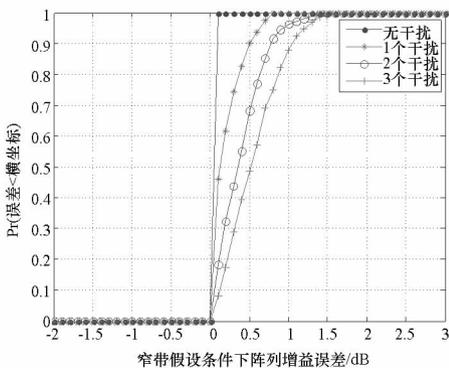
由于阵列增益误差与信号干扰布局密切相关,所以每种情况下随机设置 500 组信号干扰布局,其中信号、干扰来波方向服从上半球面的均匀分布。对 500 组场景下的抗干扰性能评估差异的统计性能进行分析,采用累积概率曲线来表征,如图 1 所示,横轴为等效阵列增益误差,即窄带近似条件下阵列增益与宽带模型下的阵列增益之差,纵轴为误差小于横坐标值的概率。



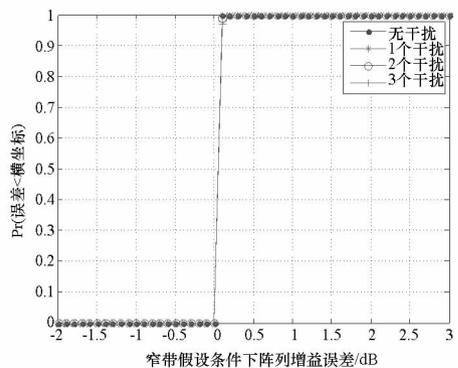
(a) 空域 PI 准则



(b) 空时 PI 准则



(c) 空域 SINR 准则



(d) 空时 SINR 准则

图 1 窄带假设条件下 4 元圆阵对等效阵列增益的影响

Fig. 1 The influence of equivalent array gain evaluation by narrowband model under 4 antennas circle array

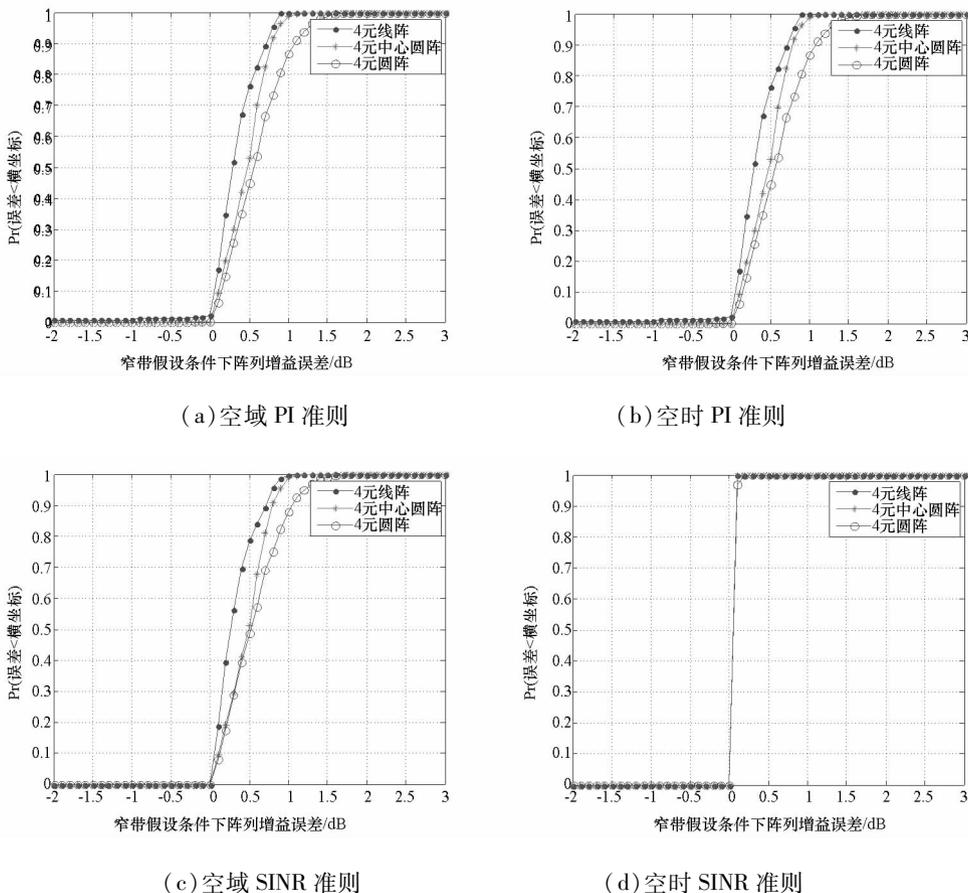


图 2 窄带假设条件下不同阵型对等效阵列增益的影响

Fig. 2 The influence of equivalent array gain evaluation by narrowband model under different arrays

从上述结果可知:

- (1) 无干扰时,窄带假设条件引入的误差很小,几乎可以忽略;
- (2) 在空域 PI 准则、空时 PI 准则、空域 SINR 准则条件下,窄带模型下等效阵列增益均偏大,且干扰数越大,窄带假设条件引入的误差越大,3 个干扰条件下,50% 概率误差约为 0.5 dB,90% 概率误差约为 1dB,最大误差达 1.5 dB;
- (3) 空时 SINR 准则下,窄带假设引入的误差较小。

在阵元数改变时,与 4 元圆阵结论类似,具体数值略有差异。

### 2.2 阵型的影响分析

改变阵型,分析窄带假设条件的影响。所分析的阵型有 4 元线阵、4 元中心圆阵、4 元圆阵,干扰数均为 3。其它条件不变。结果如图 2 所示

从分析结果可知:

- (1) 在改变阵型条件下,与 4 圆阵结论类似,具体数值略有差异;
- (2) 与圆阵相比,线阵影响相对较小。

### 2.3 干扰强度影响分析

改变干扰强度,分析窄带模型相对于宽带模

型评估天线阵抗干扰性能时的差异。

对窄带模型与宽带模型下抗干扰性能评估结果差异较大的场景进行理论计算,载噪比 44dBHz,各场景下干扰数均为 3,3 个干扰的强度均相同。每种场景下,干信比分别取 60、70、80dBc 三种情况。分析结果图 3 所示。

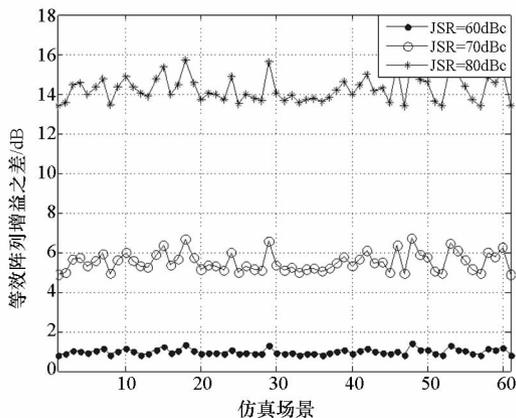


图 3 不同场景下窄带模型与宽带模型对天线阵抗干扰性能评估结果的差异

Fig. 3 The difference of antijam performance of multiple scenes between narrowband model and wideband model

由分析结果可知,干扰强度越大,窄带模型下结果于宽带模型下结果差异越大,在干信比

80dBc 时,等效阵列增益的差异高达 14dB 左右不难预测,干扰强度进一步增加时,误差将进一步加大。参考 G-STAR 的抗干扰指标(干信比 120dBc)要求<sup>[10]</sup>,采用窄带模型分析阵列处理的抗干扰性能将严重失真。

### 3 机理分析与仿真验证

#### 3.1 机理分析

在给定场景下,采用四元圆阵,给定加权准则下得到阵列处理加权值后,分别使用窄带模型与精确的宽带模型分析空域/空时阵列处理响应的幅频特性。结果如图 4 所示。

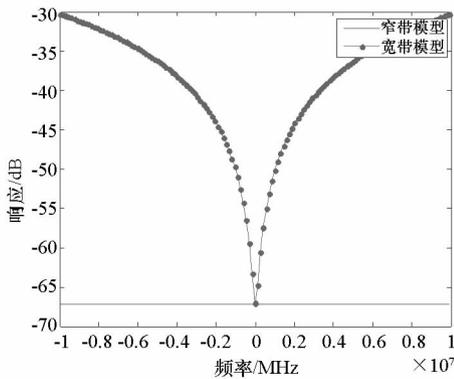
由分析结果可知,空域处理及 PI 准则下的空时处理,窄带假设的阵列处理响应的幅频特性偏乐观,整个信号带宽内干扰抑制度较为平坦,没有准确描述实际的物理响应。同宽带模型相比,两端的抑制度偏大,相差多达近 30dB。导致对残余干扰的影响描述不准确,干扰数目越多,强度越大,影响越严重。在空时 SINR 准则下,存在同样

问题,但干扰抑制度都比较大,残余干扰的问题影响较小。这正是前文中空时 SINR 下窄带假设对抗干扰性能影响较小的原因。

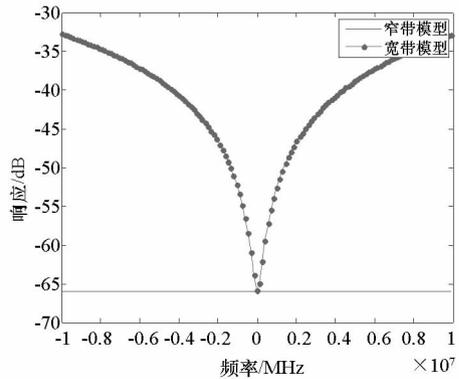
#### 3.2 仿真验证

数值计算时采用圆阵,半径为信号中心频率对应波长的一半。信号为扩频信号,码率 10.23Mcps,相对带宽 1.58%。载噪比 44dBHz,干扰带宽 20MHz,干信比分别取 70、80dBc。干扰数为 3,采用 4 元方阵,每个阵元后时域抽头数为 1,采用最大 SINR 算法。对部分窄带模型与宽带模型下等效阵列增益计算结果相差较大的场景进行仿真验证,如图 5 所示,纵轴为采用宽带、窄带模型的理论计算结果与软件接收机仿真结果之差。

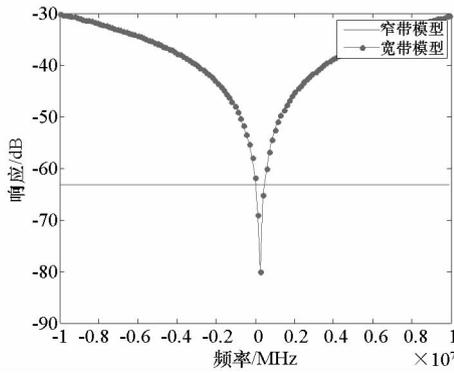
从上述仿真结果可以验证采用宽带模型分析时误差约为 0.5dB,在载噪比估计精度范围内,可忽略。而采用窄带模型分析天线阵抗干扰性能时与实际性能相差较远,干扰越强,相差越大。干信比 80dBc 时已多达 14dB。



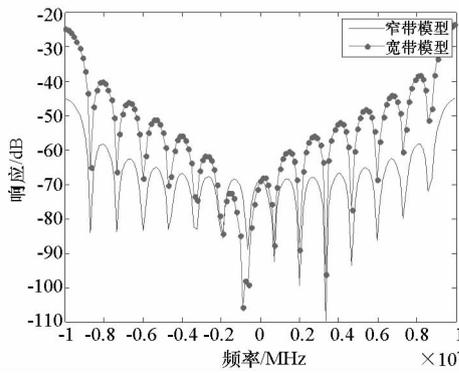
(a) PI 准则空域处理干扰方向



(b) PI 准则空时处理干扰方向

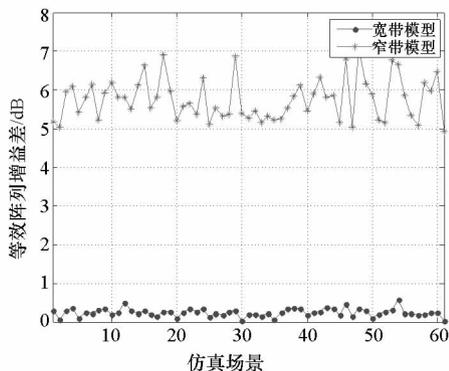


(c) SINR 准则空域处理干扰方向

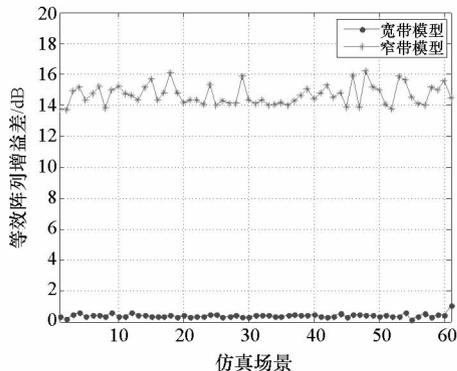


(d) SINR 准则空时处理干扰方向

图 4 干扰数为 3 窄带模型与宽带模型下干扰方向等效滤波器响应  
Fig.4 The equivalent filter response of jammer DOA under different model with 3 jammers



(a) 干信比 70dBc



(b) 干信比 80dBc

图 5 不同场景下理论计算与仿真结果等效阵列增益之差

Fig. 5 The difference of antijam performance of multiple scenes between theoretic value and simulation result

### 4 结束语

本文对理想通道下的阵列处理进行了分析,指出采用传统的窄带模型进行分析阵列处理对整机性能影响时,已不能满足高精度应用的需求。并推导了阵列处理响应的频域表达式,建立了阵列响应与空域导向矢量、时域矢量及阵列权值的关系。并通过数值计算方法,分析了窄带模型与本文推导的宽带模型分析阵列处理对系统性能影响的差异。理论计算与仿真结果均表明,采用窄带模型分析所得结果总体上偏乐观,具体数值与信号干扰场景及阵列加权值等因素密切相关。其中,干扰数目与干扰强度影响较大,主要原因是窄带模型对残余干扰的影响描述不准确。在干信比 70dBc 时,窄带模型分析误差达到 5dB 以上,干扰强度进一步增加时,分析误差加大,可达 10dB 以上。

### 参考文献:

[1] Guillaume C, Francois V, et al. Optimal STAP Algorithms to

GNSS Receivers [C]//ENC 2006.

[2] 王瑛. 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, 2008.

[3] 郭艺. GPS 接收机空时抗干扰理论与实现关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2007.

[4] Van Trees H L. Optimum Array Processing[M]. New York: Jon Wiley & Sons, 2002.

[5] Fante R L. Performance Measures for GPS Anti-Jam Antenna Arrays [R]. MITRE Corporation, 2006.

[6] Andrew J. B, Inder J. G. Optimum Adaptive Filtering for GNSS Antenna Arrays [C]//ION GNSS 21st, International Technical Meeting of the Satellite Division. 2008; Savannah, GA: 2796 - 2805.

[7] Monzingo R A, Miller T W. Introduction to Adaptive Arrays [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.

[8] 龚耀寰. 自适应滤波 [M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社, 2003.

[9] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2000.

[10] Naylor J, Sorber S. G-STAR™ Lockheed Martin's Advanced GPS Anti-jam Technology [EB/OL]. <http://www.lockheedmartin.com/news/symposium/AntiJam.pdf>, Lockheed Martin, 2000.