

# 水下超声成像观察阵的随机尖峰旁瓣问题

袁 易 全

(南京工学院)

张 仲 平

(无锡721厂)

**摘要:** 本文叙述了相控线列阵(等加权和非等加权)用于水下超声成像观察阵时的波束特性。根据随机误差理论。本文给出了在阵元相位、振幅随机起伏时,相控线列阵的尖峰旁瓣的估计。

此外,本文对声图像点进行了模拟观察。并将某些计算机模拟到的随机旁瓣特性与通过随机误差理论估算获得的结果进行了比较,两者基本一致。本文还详细地研究了影响尖峰旁瓣特性的诸因素:并根据随机相位、振幅误差和阵元失灵,提出了相控线列阵的设计指标。

本文可供设计其他超声成像阵列时参考。

## 一、引 言

近年来,随着电子技术飞速发展。水下超声成像首先在医疗界获得成功应用<sup>[1]</sup>;并正在推广应用于海洋开发事业,成为发展国民经济不可缺少的最新科学技术之一。

不久前。我们研究了相位、振幅的随机起伏对声成像波束的平均功率图、阵增益、平均旁瓣以及主瓣声轴方向偏离等带来的影响<sup>[2]</sup>。但就实际水下超声成像的图象质量而言。最终并不决定于波束的平均特性,而是取决于观察阵(包括电子通道)的随机尖峰旁瓣级的状况。本文以目前最广泛应用的相控线列阵为例,叙述了图像波束形成的一般规律(包括等加权和非等加权线阵)。如图象横向分辨率和图象信噪比。同时,着重系统地研究了阵的相位和振幅出现随机起伏时,原波束图会产生多大的随机尖峰旁瓣级。本文最后将通过随机理论分析估算和计算机模拟

观察相结合的办法。指明了如何压低随机尖峰旁瓣级和决定设计指标。这样可达到既保证改善其图象信噪比。又便于工艺制备能够实现。

## 二、相控线列阵无误差时波束特性

### 1. 相控扫描等加权周期线列阵

等加权周期线列阵远场声压图函数为<sup>[3]</sup>

$$f(u) = \frac{\sin [\pi L(u - u_0)/\lambda]}{\pi L(u - u_0)/\lambda} \quad (1)$$

式中:  $L = N \cdot d$  是等效于连续线阵的孔径总长度;  $N$  是离散阵元总数;  $d$  是相邻阵元间隔;  $u = \sin\theta$ ,  $u_0 = \sin\theta_0$ ;  $\theta$  是声波入射方向与线阵法线方向的夹角;  $\theta_0$  是相控扫描方位(亦是以线阵法线方向为参考度量的);  $\lambda$  是声波在水中传播的波长。

#### 1) 波束横向分辨力

由式(1)可知,  $3dB$ 束宽  $\Delta u$  (即声图象横

向分辨率)为

$$\Delta u |_{\theta_0=0} = \frac{0.88\lambda}{L} \approx \frac{\lambda}{L} \quad (2)$$

当波束轴向转动其它任一  $\theta_0$ 。方位的 3 dB 束宽  $\Delta u$  为<sup>[4]</sup>

$$\Delta u |_{\theta_0} = \frac{0.88\lambda}{L} \sec\theta_0 \quad (\text{垂射方向附近}) \quad (3)$$

$$\Delta u |_{\theta_0} = 1.9 \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \quad (\text{端射方向附近}) \quad (4)$$

以上由式(3)、(4)可知:当波束声轴随着相控扫描偏离垂射方位时,其横向分辨率会变差,但至端射方向附近其横向分辨率突然变尖。相比而言通常均匀加权的相控线列阵横向分辨率为最高,它往往是工作在垂射方向附近。

### 2) 波束图的第一旁瓣级

常规阵的波束图的第一旁瓣级(包括线列阵)在诸旁瓣中是最大的。因而它的大小反映了发射或接收波束的空间增益即图像信噪比的大小(未计及背景噪声)。对等加权阵由式(1)计算,当  $\theta_0$  在垂射方向时。第一旁瓣位置为  $3\lambda/2L$ , 此旁瓣级为  $-13.4\text{dB}$  (相对于主瓣); 其余旁瓣级位置分别为  $5\lambda/2L$ 、 $7\lambda/2L$ 、 $9\lambda/2L$ ……相应的旁瓣级分别为  $-17.9\text{dB}$ 、 $-20.8\text{dB}$ 、 $-23.1\text{dB}$ ……。它相当于每倍频程下降  $6\text{dB}$  的规律递降。并由式(1)、(2)可推知。随着相控扫描角偏离垂射方向,诸旁瓣级略有下降,但横向分辨率亦必略有下降。

### 2. 相控扫描非等加权周期线列阵

为了提高波束空间增益同时适当兼顾波束横向分辨率,线阵设计师进行了各种形式的束控技术。道尔夫——切比雪夫加权周期线列阵具有以下特点:在给定旁瓣抑制条件下,它具有最窄的波束宽度(即最佳的横向分辨率);或在给定的波束宽度条件下,它具有最低的抑制旁瓣级<sup>[5]</sup>。

但必须指出,切比雪夫束控技术亦存在二个问题:一是它牺牲了扫描角的独立性。

即阵元权系数必须随扫描角变化而变化,因而固定一组权系数就只适用于扫描角范围不大的场合,否则将引起较大的偏差;二是随着阵元数  $N$  增加,波束图对线列阵两端通道权系数值将愈加敏感。这样势必限制实际总阵元数,因之亦限定了横向分辨率的最小可能值。目前发展了一种称之为泰劳束控,它是切比雪夫束控的改进方法。它的特点是:等高旁瓣仅分布在主瓣邻近区域,在特定角度以外,波束图中的旁瓣就下降了。从而克服了原切比雪夫束控应用于长阵时的困难。

## 三、随机尖峰旁瓣理论及应用

所谓随机尖峰旁瓣是指:随机过程的时间常数比波束形成积分时间大得多,故必然出现单独可能的随机实时方向性图形。所谓尖峰旁瓣级是指:随机尖峰旁瓣功率级与主瓣功率级之比。显然,随机尖峰旁瓣级与所估计给定的概率程度有关。它的统计特性是通过逐个“实现”的随机图形集合。对系统作统计分析获得的。而这些随机图形的分布状况又直接取决于阵元的振幅、相位起伏(阵元数目增大时,起伏量可作为随机变量加以研究)的大小程度。

### 1. 各向同性周期线阵的尖峰旁瓣级

#### 1. 随机阵的尖峰旁瓣理论

当各向同性随机阵波束扫描角离开主瓣足够大时,旁瓣图形的随机取样大小是遵循瑞利分布,其概率密度函数为<sup>[6]</sup>

$$w_1(|f|) = \frac{2|f|}{\sigma^2} \exp(-|f|^2/\sigma^2) \quad (5)$$

式中:  $|f|$  为旁瓣幅值,  $\sigma^2$  为扫描角离开主瓣足够大时,阵因子的方差。

必须指出,阵元布设的概率密度函数并不影响阵因子的旁瓣幅值的概率密度函数。但在物理图形上,本征的常规阵旁瓣变化规律可能淹没在随机的尖峰旁瓣图形之中。

文献<sup>[9]</sup>已推导出,在各向同性阵元随机

线列阵情况下, 最大尖峰估计量 $B_P$ 为

$$B_P = B + 1 + \frac{2}{B} (B > 3) \quad (6)$$

$$B = \ln n - \ln \frac{1}{\beta} (\beta \geq 0.5) \quad (7)$$

$$n = \frac{L}{\lambda} (1 + |u_0|) \quad (8)$$

式中:  $B = A_0^2/N$  是某选定阈值级 ( $A_0^2$ ) 与理论平均旁瓣级 ( $N$ ) 之功率比 (求  $B$  值的简单办法可查图 1);  $n$  称阵参数, 它是整个旁瓣区独立样本取样数;  $\beta$  是  $n$  个独立的旁瓣取样值都不超过  $B$  的概率;  $L$  是阵的孔径长度;  $\lambda$  是波长;  $u_0 (u_0 = \sin \theta_0)$  是扫描控制方位。

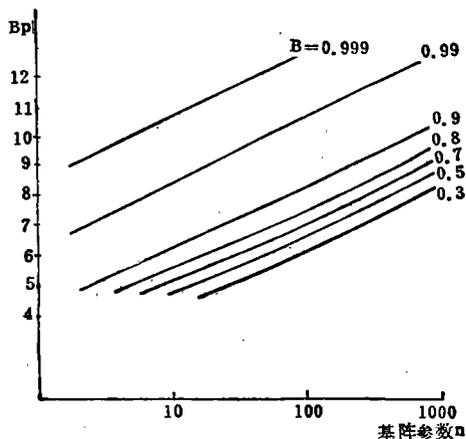


图1 随机阵的尖峰旁瓣概率估计

## 2. 尖峰旁瓣理论在周期阵误差分析中应用

对各向同性阵元周期线列阵, 阵元数增大时, 阵元的振幅和相位起伏可以看成符合某种概率密度分布的随机事件。它所具有的统计特性为: 在任何给定角度上的旁瓣级是由两部份组成。一部份是原设计的阵元在无起伏的线阵的旁瓣级; 另一部份是由于振幅和相位随机起伏所产生的附加随机旁瓣级。这两部份并不是简单地叠加, 倘后者较前者大则前者旁瓣就会被淹没, 只有后者旁瓣存在<sup>[8]</sup>。

对于等加权线列周期阵, 由于振幅和相位的起伏而造成的随机旁瓣部份, 可以利用上述随机阵的尖峰旁瓣估计理论来估计它,

即通过随机旁瓣的平均旁瓣级的增量和尖峰旁瓣无偏估计值来计算它。

1) 随机旁瓣的平均旁瓣级的提高:

$$\frac{a^2(1 - |e^{j\delta\phi}|^2) + \sigma_a^2 L^2}{N} \quad (9)$$

因为主瓣增益为

$$a^2 |e^{j\delta\phi}|^2 \quad (10)$$

故平均旁瓣相对于主瓣的比值为:

$$\frac{(1 - |e^{j\delta\phi}|^2 + \Delta^2) |e^{j\delta\phi}|^{-2}}{N} \quad (11)$$

当  $\sigma_a \leq \frac{1}{2}$  弧度时, 则(11)式可简化为

$$\frac{\sigma_a^2 + \Delta^2}{N} \quad (12)$$

式中:  $a$  为振幅权系数;  $\sigma_a^2$  是振幅起伏的方差;  $e^{j\delta\phi}$  是相位偏离;  $\sigma_\phi^2$  是相位相对偏离的方差;  $\Delta^2 = \sigma_a^2/a^2$  是振幅相对起伏的方差;  $N$  是阵元总数。

2) 随机尖峰旁瓣估计量  $B_P$

$B_P$  的物理意义实际上是最大尖峰旁瓣级高出期望旁瓣级的估计量。它决定于阵参数  $n$  以及概率  $\beta$  ( $\beta$  为一种置信级, 它通常取 0.9)。

$$B_P = \frac{\text{尖峰旁瓣}}{\text{平均旁瓣}}$$

3) 尖峰旁瓣级

按尖峰旁瓣级定义为

$$\begin{aligned} \frac{\text{尖峰旁瓣}}{\text{主瓣}} &= \frac{\text{尖峰旁瓣}}{\text{平均旁瓣}} \cdot \frac{\text{平均旁瓣}}{\text{主瓣}} \\ &= B_P \cdot \frac{\sigma_a^2 + \Delta^2}{N} \end{aligned} \quad (13)$$

对于非等加权线列周期阵 (如切比雪夫加权阵、泰劳加权阵等) 的尖峰旁瓣级为

$$B_P \cdot \frac{\sigma_a^2 + \Delta^2}{L_{eff}} \quad (14)$$

式中  $L_{eff}$  决定于加权形式的权系数, 为<sup>[2]</sup>:

$$L_{eff} = \left( \sum_{n=1}^N W_n \right)^2 / \sum_{n=1}^N W_n^2 \quad (15)$$

式中:  $W_n$  是非等加权周期线列阵, 在无误差时的权系数。

## 2. 非各向同性阵元对随机尖峰旁瓣级的影响

### 1) 非各向同性阵元的设计考虑

水下超声成像线列阵的各阵元方向特性,须设计成同样大小的“窗口函数”,以满足视角(40°左右)范围内摄取物像的需要。如在(2)中,已介绍了多波束合成孔径平面阵的原理。但是,采用正交十字线列阵(即发射线列阵与接收线列阵相互垂直正交)就可大量减少阵元总数目。因而亦相应减少了信号处理的总通道数目。当然这种好处是以牺牲实时性为代价的。不管是面阵还是线阵,阵元是有方向性的。一般指标是-10dB开角为42°~32°。

### 2) 非各向同性阵元的影响

对一个等间隔的周期阵,倘实际阵元的各方向特性均相同,则它的增益可看作阵元增益与理想的各向同性阵元的阵增益之积。因此,阵元自身的增益越高,就越能使阵因子方向特性图中那些原来较高的旁瓣数值降下来,起到平滑旁瓣作用。从随机线阵概念理解,这种平滑作用反映了阵参数  $n$  的减少,即

$$n \cong \frac{L}{2\lambda SB^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

式中:  $S=l/\lambda$ ;  $l$  为阵元孔径长度;其余符号同前。

式(16)表明,非各向同性阵元的随机阵,其阵参数总是比在同样情况下换成各向同性阵元的随机阵的阵参数要小。 $n$  越小,则尖峰旁瓣级越低。换言之,非各向同性阵元带来的影响是使尖峰旁瓣级降下来,整个旁瓣区趋向平滑。这一特性对阵设计师极为有用。

### 3. 波束扫描对随机尖峰旁瓣的影响

波束扫描对随机尖峰旁瓣级的影响亦可通过对阵参数  $n$  的分析而获得。当主波束扫描角移至  $u_0$  时,则有<sup>[8]</sup>

$$n \cong \left(\frac{L}{\lambda}\right) \left(\frac{1}{2SB^{\frac{1}{2}}} + |u_0|\right) \quad (17)$$

由式(17)可知,随着扫描角  $u_0 = \sin\theta_0$  的增加,阵参数  $n$  会适当取大。亦即尖峰旁瓣级会有所增大。但应着重指出:由于  $n$  对  $B_p$  的关系是经过对数运算的(见式(6)、(7))。故  $n$  对  $B_p$  的影响是不太敏感的。所以,扫描角的增大对尖峰旁瓣级影响是不太显著的。

### 4. 阵元失灵对随机尖峰旁瓣级的影响

在阵元数量巨大的阵中,阵元失灵是经常碰到的。甚至以100%的概率出现。实际上,对周期线列阵,阵元失灵后,它的发射图为

$$f(\theta) = \sum_{n=j}^N a_n \exp[jkx_n(u-u_0)] - \sum_{m=j}^M a_m \exp[jkx_m(u-u_0)] \quad (18)$$

式中:  $a_n$ 、 $a_m$  和  $x_n$ 、 $x_m$  分别为阵中第  $n$ 、 $m$  号阵元的幅度和坐标;  $k$  为波数。

式(18)中第一项是填满  $N$  个阵元。完全没有失灵的发射图形;第二项是  $N$  个阵元中,共有  $M$  个不起作用(即失灵)的阵中数。因此按式(18)求波束功率图。则

$$E_f \cdot f^* = E f_0 \cdot f_0^* + E f_i \cdot f_i^* - 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_n a_m \cos[k(u-u_0)(\bar{x}_n - x_m)] \quad (19)$$

式中:  $E f_0 \cdot f_0^*$  是满阵波束功率图,  $E f_i \cdot f_i^*$  是失灵阵元组成的波束功率图,第三项是二者的交叉项。

如果忽略交叉项的影响,仅仅是第  $i$  号阵元失灵,则功率图近似为

$$E_f \cdot f^* = E f_0 \cdot f_0^* + a_i^2 \quad (20)$$

式(20)的物理意义为:首先,在单个阵元失灵时,会在功率图形上出现一个与扫描方位无关的背景噪声旁瓣级电平。其次,倘失灵的阵元数越多,与扫描角无关的背景噪声旁瓣级电平就越高。

( $E f_i \cdot f_i^* = \sum_{m=1}^M a_m^2$ )。它们都会抬高随机旁瓣的平均旁瓣级。因为,阵元失灵时,有<sup>[9]</sup>

$$E f f^* = P_0^2 |e^{j\theta_0}|^2 f_0 \cdot f_0^* + [(1 + \Delta^2) P_0]$$

$$-P_e^2 |e^{j\phi}|^2 / L_{eff} \quad (21)$$

式中： $P_e$ 为维持阵元起作用的概率值。其余符号同前。故阵元失灵时的尖峰旁瓣级为 ( $\sigma_e < 1/2$  弧度时)

$$\frac{\text{尖峰旁瓣}}{\text{主瓣}} \cong B_P \cdot \frac{\sigma_e^2 + \Delta^2 / P_e}{L_{eff}} \quad (22)$$

#### 四、随机理论估算与模拟观察比较

以下介绍一个实例。今有一周期线列阵，阵元总数目为128；阵元间距两种方案， $d_1 = 5\text{mm}$ ， $d_2 = 1.875\text{mm}$  ( $d_2 = \frac{\lambda}{2}$ )；声在水中的工作频率为400KHz；阵元为圆盘形。亦有二种方案。 $\phi_1 = 5\text{mm}$ ， $\phi_2 = 1.5\text{mm}$ ；阵元的随机振幅误差最大不超过  $\pm 27\%$  及  $\pm 10\%$  (认为振幅误差的概率密度函数是均匀分布的)；假定维持阵元起作用的概率  $P_e = 0.9$ ；阵的相控扫描角不大于  $\pm 21^\circ$ ；在进行最大尖峰估计

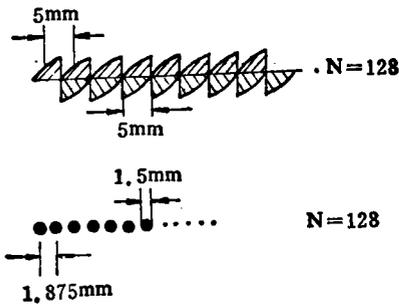


图2 周期线列阵阵元排列的两种方案

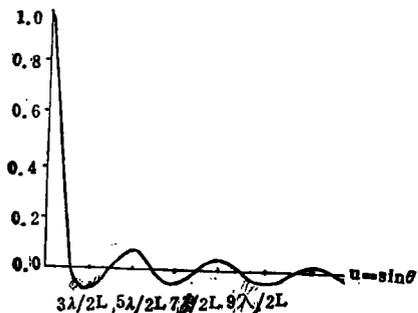


图3  $N = 128$  等间隔、等加权各向同性阵元周期线列阵无误差理论(计算机打印)方向性图

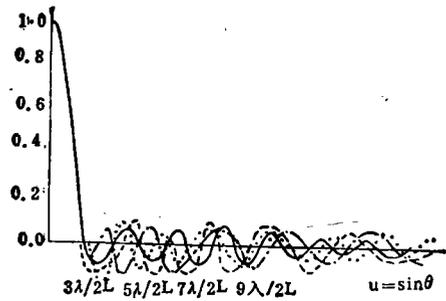


图4  $N = 128$  等间隔、等加权周期线列阵  $d_1 = 5\text{mm}$ ； $\phi_1 = 5\text{mm}$ ； $P_e = 0.9$ ；振幅误差  $\pm 27\%$  扫描角  $0^\circ$ ，计算机模拟观察的4次波束图

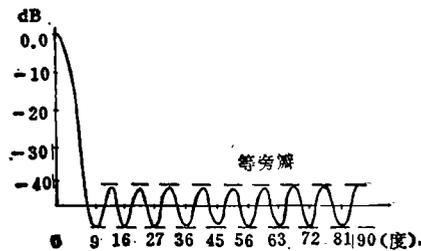


图5  $N = 128$  等间隔、切比雪夫束控  $-40\text{dB}$ ，各向同性阵元周期线列阵无误差理论(计算机打印)方向性图

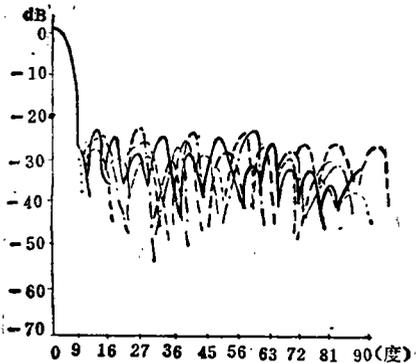


图6  $N = 128$  等间隔。切比雪夫束控  $-40\text{dB}$ ； $d_1 = 1.875\text{mm}$ ； $\phi_2 = 1.5\text{mm}$ ， $P_e = 0.9$ ，振幅误差  $\pm 27\%$ ，扫描角  $0^\circ$ 。计算机模拟观察的4次波束图形

量  $B_P$  运算时，设置信度  $\beta$  为  $90\%$ ；此处实例的束控形式亦有二种方案：一是等加权周期线列阵；二是切比雪夫束控周期线列阵。阵元的设计形式见图2(a、b)。随机理论估算与计算机模拟观察的结果。详细列于表格1及图3、4、5、6。(计算机模拟数学模型及程序略)

表 1 周期线阵估算和观察尖峰旁瓣级(SL)比较

编号	总阵元数 N	维持阵元概率	阵元孔径 (mm)	阵的第一旁瓣级本征级 (dB)	束控形式	阵元间隔	振幅误差	扫描角 (度)	理论估算 SL (dB)	模拟观察 SL (dB)	相差值 (dB)
1 2 3	128	0.9	5	-13.4	等加权	2.6λ	±27% ±10%	0 21 21	-27.2 -27.1 -35.8	-26.0 -35.0	-1.2 -0.8
4 5 6	128	0.9	1.5	-13.4	等加权	$\frac{\lambda}{2}$	±27% ±10%	0 21 21	-27.6 -27.5 -36.7	-27.0 -35.7	-0.6 -1.0
7 8 9	128	0.9	5	-40	切比雪夫	2.6λ	±27% ±10%	0 21 21	-26.7 -26.6 -35.3	-26.0 -34.4	-0.7 -1.1
10 11 12	128	0.9	1.5	-40	切比雪夫	$\frac{\lambda}{2}$	±27% ±10%	0 21 21	-27.1 -27.0 -27.0	-26.0 -36.0	-1.1 -0.7

\*模拟观察以90%概率取SL级(dB)。

## 五、结 论

1. 水下超声成像的图像信噪比主要决定于阵的随机尖峰旁瓣级以及阵本征抑制旁瓣级;

2. 阵的随机尖峰旁瓣级又取决于波束的期望旁瓣级(相对主瓣)以及最大尖峰估计量 $B_p$ (相对于期望旁瓣级);

3. 阵元自身增益越高起伏越小,尖峰旁瓣级越低;

4. 阵元数越多,阵的总孔径相对于波长之比越大,尖峰旁瓣级越低;

5. 阵元之间的振幅、相位误差越小,尖峰旁瓣级越低;

6. 阵的扫描方位偏离垂射方向,对尖峰旁瓣级的增大不太显著;

7. 阵元失灵越多,尖峰旁瓣级越大;

8. 当随机误差较小时,在靠近主瓣的旁瓣区。阵的本征(无误差)旁瓣级将高于尖峰旁瓣级;在远离主瓣的旁瓣区时,本征旁瓣级可能低于尖峰旁瓣级。这主要取决于阵尺寸和误差量大小。但是,如果在远离主瓣轴的尖峰旁瓣级与靠近主瓣轴的本征旁瓣级数量相当(或相等)。则规范设计指标的的目的就

达到了。

本文的计算机模拟运算是在 PC-800 型号机上进行的。邹采荣同志参加了计算工作。在此表示致谢。

## 参 考 文 献

- [1] Swartz R. G. et al "Integrated Silicon-PVE Acoustic Transducer Arrays." IEEE Trans. on Electron Device. Vol. ED-26. No.12(1979)
- [2] 袁易全、王克里、邵耀梅、方世良,声成像水下观察基阵传感系统的随机误差初析。《南京工学院学报》,1984年第2期
- [3] Steinberg, B. D.: "Principles of Aperture and Array System Design." (Wiley, New York) (1976) P. 99; P. 164
- [4] 同文献[3], P. 50
- [5] Dolph, C. L.: "A Current Distribution of Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship between Beamwidth and side Lobe Levels." in Proc. IRE. (1946) P. 335-348; (1947). P. 489-492
- [6] Rice, S. O.: "Mathematical Analysis of Random Noise." Bell syst. Techn. J. 23 (1944). P. 282-332; 24(1945). P. 46-156
- [7] Steinberg, B. D. "Probabilistic estimator of Peak Sidelobe of a random array." IEEE Trans. Antennas Propag. AP-20 (March 1972)
- [8] 同文献[3], P. 178; P. 174
- [9] Quazi, A. H. "Array beam response in the presence of amplitude and phase fluctuations J. A. S. A. 72(1982). P. 171