

等间隔线阵波束的数控偏转系统

向大威 孙保文 顾亚平

(中国科学院东海研究站, 上海, 200032)

1 引言

随着高速数字信号处理器的发展, 在波束形成时数字硬件已大量地替代模拟硬件。数字波束形成器的通用性强^[1,2], 适用于各种阵形, 可以用来形成扫描单波束或预形成多波束, 但是当阵元数很大时, 数据吞吐率就会变得很高, 通常远高于声呐中其他运算的要求, 有时高得难以承受。

为了减少造价和复杂程度, 一些新的方法就应运而生, 例如: 内插波束形成^[3,4], 频域波束形成^[5], 移相波束形成^[6]及时频域混合方法^[7]等。这些方法均能使抽样率有所下降。但在阵元数大时, 仍要对很多路的阵元输出进行数模转换, 采集系统仍比较复杂。

如果线阵是等间隔线阵, 且只要求形成扫描单波束时, 本文所介绍的方法就有一定的优点。这种方法仍基于时延-相加原理。波束偏转的方向能用数字方式精确控制, 波束形成器中各时延通道完全一样, 通过以数字方式改变各个时延通道中时延器件的钟频率对各阵元输出进行时延补偿, 然后模拟相加形成波束。这样既保留了数字方式对波束指向精确控制的优越性, 又减少了对数字信号处理器在数据吞吐率方面的压力。

*TDU为BBD时, $a = 2$ 。若TDU由A/D-FIFO-D/A构成时, $a = 1$ 。

收稿日期: 1992-11

2 原理

多元线阵由M个点元组成, 阵元间距为d。频率为f的平面波从 θ 方向入射, 介质声速为c。欲使阵的波束偏转到 θ 方向, 则对第m个阵元所提供的时延为:

$$\tau_m(\theta) = [(M-1) \cdot u(\theta) - (m-1) \cdot \text{Sgn}\theta] \frac{d}{c} \sin |\theta| + T(\theta) \quad (1)$$
$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$\text{式中 } u(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ \frac{1}{2} & \theta = 0 \\ 0 & \theta < 0 \end{cases}$$

$$\text{Sgn}\theta = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}$$

$T(\theta)$ 为一与阵元序号m无关, 而可能与 θ 有关的常数

若各阵元的输出均分别由Q级时延单元(TDU)提供时延, 每级TDU的时延为 $1/aF_m(\theta)$, $F_m(\theta)$ 是第m个时延通道中TDU的钟频率, a是一个与TDU有关的参数*, 则

$$\frac{Q}{aF_m(\theta)} = [(M-1)u(\theta) - (m-1) \cdot \text{Sgn}\theta] \frac{d}{c} \sin |\theta| + T(\theta) \quad (2)$$
$$m = 1, 2, \dots, M$$

令 $F_m(0) = f_0$ 及 $T(\theta) = T(0)$, 则

12卷1期(1993)

$$F_m(\theta) = \frac{Qf_0}{Q + [(M-1) \cdot u(\theta) - (m-1) \text{Sgn} \theta] a f_0 \frac{d}{c} \sin |\theta|}, m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

当采用数字方式对波束进行偏转时, 偏转角 θ 是离散的, 即 $\theta = \theta_n$ $n = -N, -N+1, \dots, N-1, N$

如果 $f_0 \frac{d}{c} \sin \theta_n = n$

$$n = -N, -N+1, \dots, N-1, N \quad (4)$$

则式(3)就成为:

$$F_{m,n} = \frac{Qf_0}{\beta_{m,n}} \quad \begin{matrix} m = 1, 2, \dots, M \\ n = -N, -N+1, \\ \dots, N-1, N \end{matrix} \quad (5)$$

$$\text{式中 } \beta_{m,n} = Q + [(M-1)u(n) - (m-1) \cdot \text{Sgn}(n)] \cdot a |n| \quad (6)$$

因为 $\beta_{m,n}$ 是正整数, 于是第 m 个TDU通道的钟频率 $F_{m,n}$ 可由频率为 Qf_0 的主钟信号经 $\beta_{m,n}$ 次分频而得。这样, 波束偏转系统的原理性方框图如图1所示。图中PFD是分频系数可预置的同步分频器, 诸分频系数 $\beta_{m,n}$ 可由微处理机(μP)或数字信号处理机(DSP)给出。

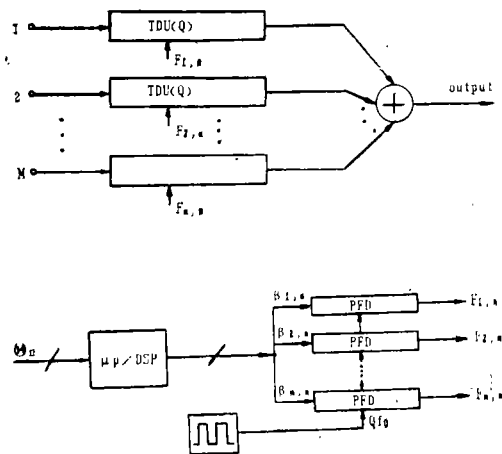


图1 单级波束偏转系统(BSS)

若要求波束在阵的法向附近的偏转步距为 $\Delta\theta$, 则由式(4)可得:

$$f_0 = \frac{c}{d \sin \Delta\theta} \quad (7)$$

声学技术

$$\text{而 } N = \left\lceil \frac{\sin \theta_{\max}}{\sin \Delta\theta} \right\rceil + 1 \quad (8)$$

式中 θ_{\max} 是最大偏转角, $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整。

由式(8)、(6)及(5)可得分频系数的最大值及最小值、TDU的最高钟频率及最低钟频率。

$$F_{\max} = Q + (M-1)N \cdot a \quad (9)$$

$$F_{\min} = Q \quad (10)$$

$$F_{\max} = f_0 \quad (11)$$

$$F_{\min} = \frac{Q}{Q + (M-1)N \cdot a} f_0 \quad (12)$$

TDU的最高钟频率 F_{\max} 不能超过TDU所允许使用的最高钟频率 $f_{c\max}$, 最低钟频率 F_{\min} 不能低于 $2f$, 而 Qf_0 不能超过PFD所允许使用的最高钟频率 $f_{d\max}$, 即:

$$f_0 \leq f_{c\max} \quad (13)$$

$$\frac{Q}{Q + (M-1)Na} f_0 \geq 2f \quad (14)$$

$$Q \leq \frac{f_{d\max}}{f_0} \quad (15)$$

采用这种方法对波束进行偏转时, TDU

器件的最高钟频率与最低钟频率之比 $\frac{F_{\max}}{F_{\min}} =$

$$1 + \frac{M-1}{Q} N \cdot a, \text{ 而采用常规方法时, } \frac{F_{\max}}{F_{\min}} =$$

N 。因此只要 $Q \gg (M-1)a$, 本文所述的波束偏转系统中的TDU的最低钟频率就能高于常规方法的最低钟频率, 这对抗混滤波和平滑滤波均带来了很大的方便。在 M 及 N 均较大时, 式(14)有可能难以满足, 另外 M 较大时, 分频器的个数也太大, 采用级联运用的方法就可方便地解决这一问题。

波束的指向性函数及 -3 dB 开角的表达式如式(16)及式(17)所示, 他们分别与常

规方法的结果没有什么差别

$$D(\theta, \theta_n) = \frac{\left| \sin \left[M \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_n) \right] \right|}{\left| M \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_n) \right] \right|} \quad (16)$$

$$\Delta \theta_{-3dB} \approx \arcsin \left[\sin \theta_n + \frac{0.44\pi}{M\pi d/\lambda} \right] - \arcsin \left[\sin \theta_n - \frac{0.44\pi}{M\pi d/\lambda} \right] \quad (17)$$

式中

$$\theta_n = \arcsin(n \sin \Delta \theta)$$

3 级联运用

本文将以 2 级级联为例, 介绍级联运用的方法。对于一个 M 元的等间隔线阵, 将线阵分成 M_2 个子阵, 每个子阵有 M_1 个阵元, 阵元间距为 $d_1 = d$, 由 1st 波束偏转系统形成子阵波束。再将 M_2 个子阵视作 M_2 个有指向

性的阵元。阵元间隔 $d_2 = M_1 d$, 由 2nd 波束偏转系统形成阵的波束。其原理性方框图如图 2 所示。

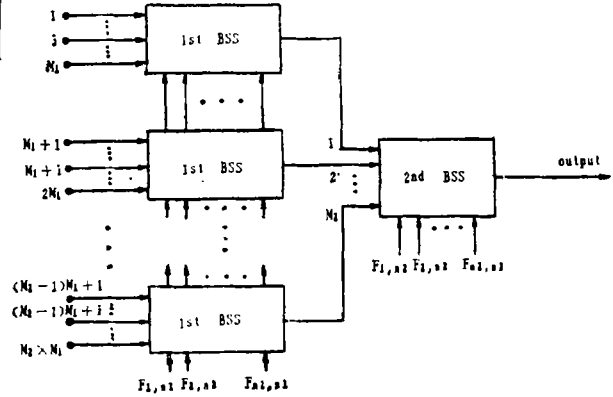


图 2 多级波束偏转系统

当 1st 波束偏转系统的偏转角为 θ_{n_1} , 而 2nd 波束偏转系统的偏转角为 θ_{n_2} 时, 由式 (16) 可得阵的指向性函数为: $D(\theta, \theta_{n_1}, \theta_{n_2})$ 。而只有单级波束偏转系统 (偏转角为 θ_{n_2}) 时, 阵的指向性函数为 $D(\theta, \theta_{n_2})$ 。显然:

$$D(\theta, \theta_{n_1}, \theta_{n_2}) = \frac{\left| \sin \left[M_1 \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{n_1}) \right] \right| \left| \sin \left[M \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{n_2}) \right] \right|}{\left| \sin \left[M_1 \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{n_2}) \right] \right| \left| M \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{n_1}) \right] \right|}$$

在 $n_1 = n_2$ 的情况下, 由上式显然 $D(\theta, \theta_{n_1}, \theta_{n_2}) = D(\theta, \theta_{n_2})$ 。也就是说 2 级系统的作用和单级系统的作用完全一致。

实际上, 子阵的阵元数 M_1 总比阵的阵元数 $M = M_1 M_2$ 少得多, 也就是说子阵的波束总比阵的波束宽, 因此 1st 偏转系统的步距就可以选得比 2nd 偏转系统的步距大一些, 此时, $n_1 \neq n_2$, 即 $\theta_{n_1} \neq \theta_{n_2}$ 。我们考察阵的波束对准目标时, 即 $\theta_{n_2} = \theta$, 级联运用的影响。

$$\frac{D(\theta, \theta_{n_1}, \theta_{n_2})}{D(\theta, \theta_{n_2})} \Big|_{\theta = \theta_{n_2}} = \frac{\left| \sin \left[M_1 \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta_{n_2} - \sin \theta_{n_1}) \right] \right|}{\left| M_1 \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta_{n_2} - \sin \theta_{n_1}) \right] \right|}$$

为简化系统, 令 $f_{01} = f_{02} = f_0$, 注意到

$$\sin \theta_{n_1} = \frac{c}{f_0 d_1} n_1 \quad (i = 1, 2) \text{ 以及 } \lambda = c/f, \text{ 则}$$

$$\frac{D(\theta, \theta_{n_1}, \theta_{n_2})}{D(\theta, \theta_{n_2})} \Big|_{\theta = \theta_{n_2}} = \frac{\left| \sin \left[M_1 \frac{f}{f_0} \left(\frac{n_2}{M_1} - n_1 \right) \pi \right] \right|}{\left| M_1 \sin \left[\frac{f}{f_0} \left(\frac{n_2}{M_1} - n_1 \right) \pi \right] \right|}$$

若取

$$|n_1| = \left[\frac{|n_2|}{M_1} + \frac{1}{2} \right]$$

则

$$\left| \frac{n_2}{M_1} - n_1 \right| \leq \frac{1}{2}$$

所以

$$\frac{D(\theta, \theta_{n1}, \theta_{n2})}{D(\theta, \theta_{n2})} \Big|_{\theta = \theta_{n2}} \leq \frac{\sin(M_1 \frac{f}{f_0} \cdot \frac{\pi}{2})}{M_1 \sin(\frac{f}{f_0} \cdot \frac{\pi}{2})}$$

当 $M_1 \frac{f}{f_0} \cdot \frac{\pi}{2} \ll 1$ 时

$$\frac{D(\theta, \theta_{n1}, \theta_{n2})}{D(\theta, \theta_{n2})} \Big|_{\theta = \theta_{n2}} \leq 1 - \frac{1}{6} (M_1 \frac{f}{f_0} \cdot \frac{\pi}{2})^2$$

上式表明, 当 1st 偏转角与 2nd 偏转角不相等的情况下, 在某些方向上, 阵的灵敏度会有所下降, 但只要参数选择得当, 影响可以忽略不计。

实例: 若有一个 $M = 25$ 元线阵, 阵元间

$$\text{距 } d = \frac{M-1}{M} \frac{\lambda}{1 + \sin\theta_{max}} \text{ (任一副瓣高度不}$$

超过第一副瓣高度), $\theta_{max} = 45^\circ, \Delta\theta = 1^\circ$, 信号最高频率 $f = 10\text{kHz}$, TDU 采用 BBD ($a = 2$), PFD 所允许使用的最高钟频率为 32 MHz。2 级级联运用诸参数的计算公式及数值如下表所示:

	2nd	1st
M_i	$M_2 = (5)$	$M_1 = (5)$
d_i	$d_2 = M_1 d = (5d)$	$d_1 = d$
$\Delta\theta_i$ θ_{imax}	$\Delta\theta_2 = \Delta\theta = (1^\circ)$ $\theta_{2max} = \theta_{max} = (45^\circ)$	
f_{0i}	$f_{02} = \frac{c}{d_2 \sin\Delta\theta_2} = \frac{M_2}{M-1} \cdot \frac{1 + \sin\theta_{max} f}{\sin\Delta\theta}$ $= (203.781\text{kHz})$	$f_{01} = f_{02}$
θ_i	$Q_2 \leq \frac{f_{dmax}}{f_{02}} \quad Q_2 = (128)$	$Q_1 \leq \frac{f_{dmax}}{f_{01}} \quad Q_1 = (128)$
N_i	$N_2 = \left\lceil \frac{\sin\theta_{2max}}{\sin\Delta\theta_2} \right\rceil + 1 = (41)$	$N_1 = \left\lceil \frac{N_2}{M_1} + \frac{1}{2} \right\rceil = (8)$
$\beta_{i,max}$	$\beta_{2,max} = Q_2 + (M_2 - 1)N_2 \cdot a = (456)$	$\beta_{1,max} = Q_1 + (M_1 - 1)N_1 \cdot a = (192)$
$\beta_{i,min}$	$\beta_{2,min} = Q_2 = (128)$	$\beta_{1,min} = Q_1 = (128)$
$F_{i,max}$	$F_{2,max} = f_{02} = (203.781\text{kHz})$	$F_{1,min} = f_{01} = (203.781\text{kHz})$
$F_{i,min}$	$F_{2,min} = \frac{Q_2}{\beta_{2,max}} f_{02} = (57.202\text{kHz})$	$F_{1,min} = \frac{Q_1}{\beta_{1,max}} f_{01} = 135.854(\text{kHz})$

4 结束语

本文所介绍的多元等间隔线阵的波束偏

转系统具有下述优点:

(1) TDU 的最高钟频率与最低钟频率的比值较小, 在采用级联工作方式时更是如

周永昌教授1949年同德医学院6年制医本科毕业。1949年上海市第六人民医院住院医师,1953年上海市第六人民医院主治医师,1960年超声医学研究室副主任,1966年超声医学研究室主任。1975年外科副主任。1979年泌尿外科副主任,1982年主任医师。现任上海市第六人民医院泌尿科主任医师、教授,超声医学研究室主任。上海第二医科大学医疗系三部诊断学教研室主任、教授。主要从事泌尿外科、B超声诊断的研究和临床工作。

周永昌教授历任上海市超声医学研究组秘书、组长;中华医学会上海分会超声诊断学组组长;中华医学会上海分会理事兼超声诊断学会主任委员、顾问;中国物理学会声学专业委员会委员;中国电子学会应用声学学会副主任委员兼生物医学超声工程专业组组长;中国声学学会理事、常务理事兼生物医学超声工程学会主任委员;中国超声医学研究会副会长;中国超声医学工程学会副会长兼超声诊断委员会主任委员;中华医学会理疗学会委员;超声医学会常务委员;上海市声学学会副理事长;中国人民解放军军医进修学院,解放军总医院超声专业兼职教授、顾问;上海市总工会委员;上海市高级技

术职称评审委员会(卫生系统)委员兼医技组组长;《应用声学》副主编;《中国超声医学杂志》副主编等职。先后发表过30多篇论文和专著,“GLY线阵聚焦超声探头的研制”获1982年卫生部科技成果一级奖。

周永昌主任医(教授)早在1954年就参加过抗美援朝国际医防服务队,任第27队副队长,荣立三等功。于1979年获“上海市劳动模范”称号,1985年由上海市人民政府给予记大功,1986年被评为中国十名最佳超声医学专家之一,1988年获世界医学超声联合会和美国超声医学会联合颁发的《先驱者奖》。是我国著名的医学超声专家,超声医学创始人之一。1991年获中华人民共和国国务院颁发的《政府特殊津贴证书》。

周教授多年来战斗在医疗第一线,虽年过6旬还热情培养中青年医生,举办过二十多期学习班和进修班,学员达二千多人,他负责举办国际国内学术会议达8次之多,为超声医学作出了卓越贡献。今年是周永昌教授70华诞,我们恭祝周教授健康、长寿、为我国和世界的超声医学事业作出更大的贡献。

上海市第六人民医院

上海市声学学会暨《声学技术》编辑部

此,这样最低钟频率将比信号频率大得多,从而使抗混滤波和平滑滤波较易实现。

(2)波束从阵的法线一侧旋转到另一侧时,阵元与系统之间的连接不必改变。

(3)波束的偏转角是用数字方式改变的,且系统的主钟频率是固定的,改变分频系数 $\beta_{m,n}$ 就能使波束偏转,分频系数可由微处理器或数字信号处理机以数字方式提供。

(4)系统仅包含三种主要器件,且各时延补偿通道的结构完全一致,便于采用模块化结构组成系统。

(5)偏转系统可以方便地级联运用。

不论是多元等间隔线阵的扫描波束、定向用的分裂波束,还是平面阵的水平或垂直偏转均能采用本文所介绍的波束偏转系统。

参考文献

1 W.C.Knight, R.G.Priham and S.M. Kay, Digital signal processing for sonar Proc IEEE,1981,69(11), 1451~1506

2 D.E.Dudgeon, Fundamentals of digital array processing Proc, IEEE 1977; 65(6); 898~904

3 R.G.Pridham, and R.A.Mucci, A novel approach to digital beamforming J.A.S.A 1978; 63(2); 425~434

4 R.G.Pridham and R.A.Mucci, Digital interpolation, beamforming for low-pass and band-pass signal Proc IEEE, 1979; 67(6); 904~919

5 P.Rudnick, Digital beamforming in frequency domain J.A.S.A 1969; 46(5); 1089~1090

6 S.P.Pitt, W.T.Adams and J.K. Vaughan, Design and implementation of a digital phase shift beamformer J.A.S.A 1978; 64(3); 808~814

7 R.A.Gabel and R.R.Kurth, Hybrid time-delay/phase-shift digital beamforming for uniform collinear arrays J.A.S.A.1984; 75(6); 1837~1847