

雷达数字波束形成器性能的实验验证

朱荣新, 周杰

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:介绍了一种自适应数字波束形成器的原理、组成和实现方法,给出了实验结果,验证了一些关键技术,表明数字波束形成(DBF)是提高雷达天线性能强有力的技术。

关键词:数字波束形成;自适应处理;数字信号处理器

中图分类号:TN951 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)03-0083-04

数字波束形成(DBF)是在原来天线波束形成原理的基础上,引入先进的数字信号处理方法后建立起来的一门新技术。这种技术充分利用了阵列天线所检测到的空间信息,可以方便地获得超分辨和低副瓣的性能、实现波束扫描、自校准和自适应波束形成等。正是由于以上特点,自八十年代初以来,DBF技术受到了许多国家的重视,英、美、德、荷兰等国家都投入了相当多的人力和物力加紧研制工作,并相继推出了一些DBF实验系统。DBF技术的成功应用必将对现代雷达技术的发展产生重大影响。普遍认为,采用有源相控阵加自适应数字波束形成,可以满足以后可能应用的战术和战略雷达的要求。

本文主要介绍一种自适应波束形成器的原理、组成及实现方法。它能对来自16个阵元的复数字信号在 $2\mu\text{s}$ 内同时形成8个波束。从实验结果验证了数字波束形成(DBF)技术的有效性。

1 系统组成及基本原理

图1是该波束形成器的系统组成框图,它主要由A/D变换器、波束运算器、波束控制计算机、数字信号处理器、接口电路及模拟阵列信号产生器等部分组成。其主要功能是在计算机和数字信号处理器的控制下,按一定算法对来自16路接收通道的I、Q数字化阵列信号进行实时运算;形成8个独立的同时多波束;可方便地实现各种加权运算,如均匀权、切比雪夫权、汉明权、汉宁权等;还可方便地形成和、差波束及不同形状的波束;也可进行幅相校正试验;可实时地进行自适应零点控制,以抑制干扰;各种波束的形状均可在示波器上显示,也可在计算机上显示、打印各种波束的形状及有关数据。

由16个天线阵元输入的射频信号,经16路接收机和正交相位检波器,转换成视频信号。每个正交相位检波器输出为两种正交的视频模拟信号,32路视频模拟信号经A/D转换器转换成8位二进制数字信号,送入波束控制器(由数字信号处理器及计算机组成)及多波束运算器。

数字波束运算器接收数字化的单元复信号(X_n)和复加权系数(W_n),以产生形成波束和 $\sum X_n W_n$ 。同时形成8个独立的波束,硬件上需要8套相同的波束运算电路,只是波束控制器控制送入8组不同的权值。

数字波束控制器由数字信号处理器和通用计算机配合完成固定权值的输送、自适应权值运算和控制波束形成器形成不同指向、不同形状的同时多波束、和差波束以及完成16个通道的幅相校正、自适应调零等功能。通用计算机完成数字波束形成器输出数据的采集,通过缓冲接口电路,将结果在监视器上显示,同时通过

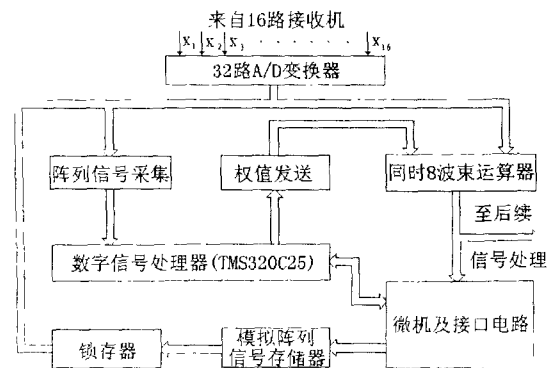


图1 系统组成框图

收稿日期:2000-01-17

作者简介:朱荣新(1964-),男,浙江余姚人,副教授,硕士,主要从事智能仪器与虚拟技术研究。

计算机对整个系统实施各种模式的转换。

接口电路包括16个通道数据采集电路,数字波束形成器输出数据采集电路、权值输送电路,以及相应的各种逻辑控制信号产生电路。

为了便于系统的调试及自检,此系统处于自检工作方式时,由计算机控制,将产生的数字模拟阵列信号输入数字波束形成器,通过示波器或监视器完成对系统工作的监视与检测。

2 数字波束运算器

波束运算器是数字波束形成器的核心部件,它主要由高速乘法累加器、高速存储器和输入、输出锁存器组成。

设 X_n 为16路接收通道经A/D变换器后输出的复数字阵列信号: $X_n = X_{I_n} + jX_{Q_n}$; W_{nm} 为第 m 个波束的加权系数, $W_{nm} = W_{I_{nm}} + jW_{Q_{nm}}$; 其中 $n = 0, 1, 2, \dots, 15, m = 0, 1, 2, \dots, 7$, 则可得 DBF 输出表达式为:

$$\begin{aligned}
 Y_m &= \sum_{n=0}^{15} X_n W_{nm} \\
 &= \sum_{n=0}^{15} (X_{I_n} W_{I_{nm}} - X_{Q_n} W_{Q_{nm}}) + j \sum_{n=0}^{15} (X_{I_n} W_{Q_{nm}} + X_{Q_n} W_{I_{nm}})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

从式(1)可见,对独立的8个同时多波束,来自16个通道的数字式阵列信号 $X_n = X_{I_n} + jX_{Q_n}$ 对各个同时多波束是公用的,每个波束指向的加权值按下式计算:

$$W_{nm} = b_{nm} e^{-jnkz \sin \theta_m} \tag{2}$$

式中: θ_m 为各个波束的指向角; b_{nm} 为按某种加权函数确定的加权系数(可为自适应权、均匀权、切比雪夫权等); $k = 2\pi/\lambda$ 。

要在 $2\mu s$ 内完成(1)式运算,我们选用专用处理器,采用串行处理方式,在一个采样周期内用两个乘法累加器,分别计算(1)式的实部 Y_I 和虚部 Y_Q ,如图2所示。在每个采样周期内,由A/D送来的阵列数字信号 X_{I_n} 和 X_{Q_n} 经输入转换电路后按一定顺序,送到

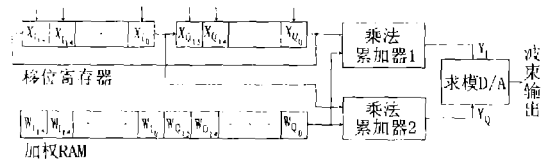


图2 波束形成电路

两个乘法累加器进行运算,乘法累加器1计算波束输出的实部 Y_I ,乘法累加器2计算波束输出的虚部 Y_Q 。输入阵列信号 X_{I_n} 和 X_{Q_n} 由输入转换电路锁存到并入-串出的移位寄存器中。静态RAM存放加权系数 W_n , 加权系数 W_n 可以通过接口电路由计算机写入,在脱机状态下,也可以由内部 EPROM 按程控方式写入RAM。完成(1)式的实部 Y_I 和虚部 Y_Q 运算需32个时钟节拍,每个乘法累加器完成32次乘法累加(或减)运算,乘法累加器我们采用了 Analog Devies 公司生产的 ADSP-1008A, 8×8 bit CMOS Multipeler/Accumulator, 它完成一次乘法累加运算时间为50ns,考虑到时间余量,再加上数据存取及转换时间,在 $2\mu s$ 内是可以完成(1)式运算的。

为了便于调试和检测,波束的输出配置有求模电路和D/A变换器。

3 数据波束控制器

数字波束控制器是数字波束形成器的重要组成部分,它主要由计算机和 TMS320C25 构成主从系统及其接口电路、外围电路所组成,并配以相应的控制软件、数据处理软件、显示软件和性能模拟软件,其主要功能:

3.1 权值发送

权值由两种方法送出,一是由计算机和 TMS320C25 给出,完成自适应波束形成和波束任意捷变,二是由 EPROM 给出,实现固定波束和有规律波束扫描。

3.2 阵列信号的采集

如图1所示,为完成16个通道间幅相误差的校正和自适应波束形成,模拟阵列信号产生电路的数据或经A/D送来的数据,由阵列信号采集电路采集并存储起来,采集的快拍向量通过系统总线送到计算机或

TMS320C25,并由它们完成各种算法、变换,生成的权矢量通过权值发送电路送到多波束形成器,从而形成特定的波束。波束的输出值经结果采集电路送到计算机,用以进行数据处理和结果显示。

3.3 数字波束形成器输出数据的采集

根据技术指标的要求,波束扫描范围为 $\pm 60^\circ$,以 0.5° 为一个间隔,一个完整的波束需要241点,因此同时8个波束共需采集1928个数据。为此先将数字波束形成器输出的I、Q数据,顺序写入RAM待用,系统自检时,利用该数据可绘制方向图。波束输出的结果包含了得到的目标信息,将它们采集回处理器,做进一步处理。

3.4 通道间幅相误差的校正

为了减少阵列各通道幅相误差对波束副瓣电平的影响,应对幅相误差进行校正,其方法是将采集的各通道数据,选择一路作为标准通道,求出信号的幅度和相位,而将其它通道信号的幅度和相位与标准通道的幅度和相位进行比较,得到幅度比值和相位差值,用该幅度比值和相位差值修正加权值,以补偿幅相误差,改善波束副瓣电平。

3.5 自适应波束形成

利用采集的16个空间单元的信号数据,采用Gram-Schmidt正交算法^[4],获得自适应加权值,从而使天线波束方向图在干扰源的方向上形成零点,形成自适应波束^[5]。

4 测试与结果

测试时模拟一入射角从 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化的等幅入射波的阵列天线信号,计算该信号时假定天线均匀放置,间距为 $\lambda/2$,单元天线方向因子为 $\sqrt{\cos\theta}$,单元天线之间互不影响,从 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 每隔 0.5° 取一个点,共241个点,各数据由计算机按给定参数由式 $X_n = \exp(jnd \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta)$, $n=0,1,2,\dots,15$ 求出,固化在EPROM中,输出时,顺序输入到模拟阵列信号锁存器中,然后并行打入并入-串出移位寄存器中,经波束形成电路运算,再经求模D/A变换器后,输出至示波器,示波器显示的波形就是方向图,横轴相当于入射波的人射角度。图3(a)照片为均匀加权,每个波束间隔为 9° 的8个同时多波束合成方向图;图3(b)照片为 -40dB 切比雪夫加权,不等间隔的8个同时多波束合成方向图。

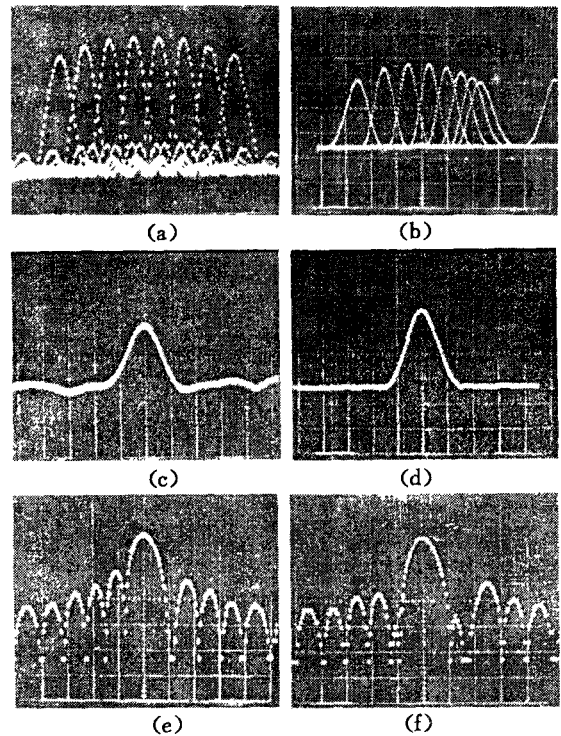


图3 DBF方向图

另外本系统还可随机模拟阵列数字信号,它主要用于系统性能的模拟,一是模拟各种目标和干扰环境,以检测系统自适应算法的执行情况;二是模拟各接收通道存在幅相误差时的阵列信号,以检验系统的幅相校正能力。图3(c)、(d)照片为 -40dB 切比雪夫加权,各接收通道存在幅相误差时的DBF方向图和校正后的方向图;图3(e)照片为均匀加权,波束指向为 0° ,干扰源角度为 10° 和 10.5° 时的DBF自适应零点控制方向图;图3(f)照片为均匀加权,波束指向为 0° ,干扰源角度为 $-13^\circ, -10^\circ, +15^\circ, +15.5^\circ$ 时的DBF自适应零点控制方向图。

5 结束语

数字波束形成是目前非常活跃的技术领域,它主要用于双(多)基地雷达、高频超视距雷达、三坐标雷达、相控阵及电子对抗系统等,此外,DBF技术在通信、导航及地震、医疗电子等领域均有广阔的应用前景。国内加紧研制,一些试验系统已经问世,展示了应用于战术和战略雷达的前景。本文主要介绍了一个自适应数字波束形成器,该波束形成器采用先进芯片,设计巧妙合理,硬件结构上采用模块化,如成倍增加硬件量,波束数也将成倍的增加。我们已把该波束形成器在软硬件上稍微作了修改,已成功地用于双(多)基地雷达试验系

统中,实现了“脉冲追赶”式的空间同步。从试验结果来看,数字波束形成(DBF)技术的有效性得到了验证。

参 考 文 献

- [1] Hans Steyskal, John F Rose. Digital Beamforming for Radar Systems[J]. Microwave Journal, January, 1989, 30(1):121 - 136
- [2] Hung E K L. A Fast Beamforming Algorithm for Large Array[J]. IEEE Trans AES, 1983, 19(4):598 - 607
- [3] 许 兵, 穆贺强, 耿富录. 连续波体制自适应波束形成算法及实现[J]. 西安电子科技大学学报, 1992, 19(3):79 - 85
- [4] 朱荣新, 耿富录, 赵树杰. 雷达数字波束形成技术的研究[J]. 火控雷达技术, 1997, 26(2):7 - 12

The Experimental Verification of the Digital Beamforming Processor Performance

ZHU Rong-xin, ZHOU Jie

(The Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

Abstract: An introduction on the principle, components, and implementation of an adaptive DBF processor is given. The experiment result is also given, and some key techniques are solved. It is showed that digital beamforming (DBF) is a powerful technique for enhancing radar antenna performance.

Key words: digital beamforming (DBF); adaptive processing; digital signal processor