

· 收/发技术 ·

中图分类号:TN827

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2011)02-0066-04

# 数字阵列天线接收波束形成方法及实验研究

陈文俊,胡永君

(南京船舶雷达研究所, 南京 210003)

**摘要:**针对数字阵列天线的发展需求,介绍了用快速傅里叶变换法、数字混频低通滤波法、多相滤波正交下变频法等3种数字接收机通道内信号的幅度、相位计算方法,给出了数字阵列天线接收通道的内校准法和外校准法,以及校准后的天线方向图计算公式,并用实验结果检验了上述方法的有效性。

**关键词:**数字阵列天线;数字波束形成;通道校准;数字天线测量

## A Study on Beamforming Method of Digital Receiving Array Antenna and Its Experiment

CHEN Wen-jun, HU Yong-jun

(Nanjing Martine Radar Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Based on the requirement of development of digital array antennas, the methods of the fast fourier transform, digital low-pass filtering and quadrature polyphase filtering for calculating the amplitude and phase of IF signal received by the digital receiver are introduced. The internal and external calibrations for receiving channels of a digital array antenna are illustrated. The formula of synthesizing an antenna pattern is also developed. Several Experiments verify the effectiveness of the methods and the formula.

**Key words:** digital array antenna; digital beamforming; channel calibration; digital antenna measurement

### 0 引言

模拟相控阵雷达利用移相器实现波束在空间的扫描,其存在损耗大、副瓣高、天线校准复杂<sup>[1]</sup>等不足。而数字阵列雷达具有损耗低、接收波束副瓣低、易于校准等优点。近年来,随着信号处理硬件速度的不断提高,体积越来越小,价格也在不断降低,数字阵列雷达的应用受到了广泛的重视。

目前国内外已有大量研究数字波束形成的文献<sup>[2-4]</sup>,但主要集中在数字雷达天线波束形成的硬件实现研究和波束形成方法的数学原理研究。本文将从中频数字接收机通道内信号的幅度、相位算法、天线的校准和天线方向图合成方法等方面,对数字阵列天线的波束形成方法进行系统的研究。

### 1 数字阵列天线接收信号的幅度、相位算法

数字阵列天线方向图合成的前提是准确地测出天线系统各接收支路信号的幅度和相位,其算法主要有以下3种。

#### 1.1 快速傅里叶变换法

在对数字中频输出信号做完快速傅里叶变换

(FFT)之后,为了精确地测量频率,提高幅度、相位的测量精度,需要采用下列公式,对测量结果进行校准<sup>[5]</sup>

$$f = (k - \nabla f) \frac{f_s}{N} \quad (1)$$

式中: $f$ 为测量的频率; $f_s$ 为采样频率; $k$ 为频谱中最大值对应的谱号; $N$ 为分析点数; $\nabla f$ 为频谱校正量。

$$\nabla f = -\frac{1}{1 + v} \quad (2)$$

$$v = \frac{y_k}{y_{k+1}} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I_k}{R_k}\right) + \pi \nabla f \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi \nabla f y_k}{\sin(\pi \nabla f)} \quad (5)$$

式中: $y_k$ 为输入的数字中频信号经过FFT之后复值的模; $R_k$ 、 $I_k$ 是对应谱线号为 $k$ 的信号实部和虚部; $A$ 为测量的幅度; $\varphi$ 为测量的相位。

#### 1.2 数字混频低通滤波法

数字混频低通滤波法的原理框图,如图1所示<sup>[6]</sup>。设输入中频信号为 $s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$ , $f_0$ 为信号中心频率,经带通滤波并以 $f_s$ 采样后变为 $s(n) =$

通信作者:陈文俊 Email:wjchen\_aq@163.com  
收稿日期:2010-10-25 修订日期:2010-12-26

$A\cos[2\pi(f_0/f_s)n + \varphi]$ , 下变频后有

$$I(n) = A\cos[2\pi\frac{f_0}{f_s}n + \varphi] \times \cos(2\pi\frac{f_{\text{down}}}{f_s}n) = \frac{1}{2}A\{\cos[2\pi\frac{f_0 + f_{\text{down}}}{f_s}n + \varphi] + \cos[2\pi\frac{f_0 - f_{\text{down}}}{f_s}n + \varphi]\} \quad (6)$$

$$Q(n) = A\cos[2\pi\frac{f_0}{f_s}n + \varphi] \times \sin(2\pi\frac{f_{\text{down}}}{f_s}n) = \frac{1}{2}A\{\sin[2\pi\frac{f_0 + f_{\text{down}}}{f_s}n + \varphi] - \sin[2\pi\frac{f_0 - f_{\text{down}}}{f_s}n + \varphi]\} \quad (7)$$

式中: $\varphi$  为初相; $f_s$  为采样频率; $n$  为采样点数。中频采样后,数字中频的计算方法如下<sup>[7]</sup>

$$fix\left(\frac{f_0}{f_s/2}\right) = \begin{cases} \text{偶数 } f_{\text{IF}} = \text{rem}(f_0, f_s) \\ \text{奇数 } f_{\text{IF}} = f_s - \text{rem}(f_0, f_s) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $fix(x)$  表示  $x$  朝零方向取整,  $\text{rem}(x, y)$  表示  $x$  被  $y$  除取余。式(6)、式(7)中的  $f_{\text{down}}$  取相应的  $f_{\text{IF}}$ 。

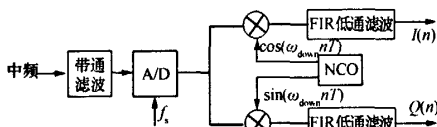


图1 低通滤波法实现 I/Q 信号分离

设计 FIR 低通滤波器选用 Hamming 窗<sup>[8]</sup>

$$w_{\text{hm}}(n) = [0.54 - 0.46\cos(\frac{2\pi n}{N-1})]R_N(n) \quad (9)$$

式中: $R_N$  为矩形窗; $N$  为长度。经过 FIR 低通滤波器滤去高频部分,分离出 I、Q 信号,信号的幅度、相位可用下列公式求出

$$\varphi = \text{atan}\frac{Q(n)}{I(n)} \quad (10)$$

$$A = \sqrt{I^2(n) + Q^2(n)} \quad (11)$$

### 1.3 多相滤波正交下变频法<sup>[9]</sup>

设  $s(t) = A(t)\cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)]$  为输入带通信号,  $f_0$  为中心频率, 采样频率  $f_s = 4f_0/(2M-1)$ ,  $M$  为大于等于 1 的整数。采样后信号的表达式为

$$s(n) = A(n)\cos[2\pi\frac{f_0}{f_s}n + \varphi(n)] = s_I(n)\cos(\frac{2M-1}{2}\pi n) - s_Q(n)\sin(\frac{2M-1}{2}\pi n) \quad (12)$$

式中: $s_I(n) = A(n)\cos[\varphi(n)]$ ,  $s_Q(n) = A(n)\sin[\varphi(n)]$  分别为信号同相分量和正交分量。将  $s(n)$  其中一路进行 2 倍抽取, 另一路经 1 个采样间隔延后再进行 2 倍抽取; 经过符号变换, 即 I 支路乘以  $(-1)^n$ 、Q 支路乘以  $(-1)^{n+1}$  后, 分别得到基带信号的偶数和奇数分量, 实现框图如图 2 所示。

$$\begin{cases} I'(n) = s(2n)(-1)^n = s_I(2n) \\ Q'(n) = s(2n-1)(-1)^{n-1} = s_Q(2n-1) \end{cases} \quad (13)$$

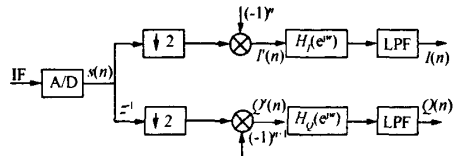


图2 多相滤波正交数字下变频框图

$I'(n)$  和  $Q'(n)$  的频谱相差一个相位因子  $e^{-j\frac{\pi}{2}}$ , 相当于时域上半个采样间隔的延迟, 为了使得最终的 I、Q 信号时间“对齐”, 需要采用 2 个插值滤波器加以校正, 插值滤波器系数可按参考文献[10]选取, 2 个滤波器系数来自同一个 4 倍内插滤波器的 2 条分选支路。于是可由滤波后 I、Q 支路的数据求出各通道的幅度、相位。

因为反正切函数计算出来的角度只存在于一、四象限, 所以在应用反正切函数计算相位时, 一定要根据 I、Q 支路的正、负关系, 将角度转换到 4 个象限。否则, 在应用这些相位合成天线方向图时会出错。

## 2 数字阵列天线方向图计算和阵列校准技术

以线阵为例, 数字阵列天线方向图的计算公式为

$$f = \sum_{n=1}^N A(n)\exp(j\theta(n)) \quad (14)$$

式中: $N$  为天线的单元数; $A$ 、 $\theta$  分别为天线系统各接收通道信号的幅度和相位。

数字化阵列天线方向图的形成必须要对其各接收通道幅度和相位进行校准。一般天线校准可分为内校准和外校准 2 种方法: (1) 内校准法, 可直接在数字阵列天线微波通道入口接一个功分器, 通过功分器注入微波信号, 测出各通道信号的幅度和相位值。选取其中一个通道信号的幅度、相位值作为参考值, 对各通道幅度、相位进行归一化, 所得数据作为天线校准数据(要考虑功分器幅相不一致的影响)。(2) 外校准法, 在待测天线远场区放置一个频率已知的信号源, 安放在转台上的待测天线对准信号源不用转动, 测出待测天线系统各接收通道信号的幅度和相位值作为校准数

据。外校准法和内校准法的区别是外校准法考虑了天线间的互耦,内校准法没有考虑天线的互耦。若天线系统的幅度、相位校准数据分别为 $A_1, \theta_c$ ,则数字阵列天线方向图的计算公式变为

$$f = \sum_{n=1}^N A(n)A_1(n)\exp[j(\theta(n) - \theta_c(n))]\quad (15)$$

3 实验研究

为验证本文采用的接收通道幅度、相位算法的可靠性,用图3的测试系统,对一个8通道DBF接收机各通道信号的幅度、相位进行了测量。测试系统有2个信号源,其中一个提供了待测的3.25 GHz微波信号和数据采集板的同步脉冲信号;另一个提供100 MHz中频信号,并被分为两路,一路混频为2 875 MHz的本振信号,另一路混频为500 MHz的时钟信号。系统工作时,3.25 GHz微波信号通过一分八功分器进入8路模拟接收机,下变频为8路375 MHz中频信号。数据采集板在500 MHz采样时钟和同步脉冲信号的控制下,以500 MHz采样率对8路375 MHz中频信号采样。所采集的数据通过光纤传给计算机处理。

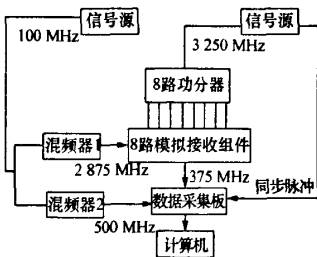


图3 接收机测试系统框图

开机预热5 min左右开始采集数据,对接收组件的8路采集数据做FFT,求出各通道信号的幅度和相位数据。之后,在一分八功分器的输出端(1号端口除外)依次接一段电缆,测出幅度和相位。2种情况测量的数据相减得出的幅度和相位差,即为电缆的损耗和相位,测量结果见表1。用矢量网络分析仪测量的电缆损耗和相位结果见表2。表1和表2的测量结果相比,幅度误差最大为0.065 dB,相位误差最大为1.10,这说明所用算法是可行的。

表1 DBF系统的测量结果

端口号	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
相位差/(°)	-7.205	-6.744	-6.595	-6.962	-6.962	-7.173	-6.721
损耗/dB	-0.282	-0.268	-0.269	-0.295	-0.255	-0.293	-0.262

表2 网络分析仪测量结果

端口号	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
相位差/(°)	-8.3	-7.5	-7.5	-7.44	-6	-8	-7.5
损耗/dB	-0.32	-0.31	-0.25	-0.23	-0.25	-0.26	-0.29

上述8路接收机与8个天线单元相连构成一个数字阵列。分别用内校准和外校准法校准后,测量了频率为3.25 GHz的天线方向图。内校准法所用功分器在测量频点具有优良的幅相一致性。为了便于比较,将8个天线单元直接连接到功分器上构成一个口径相同的模拟天线阵,用暗室内的远场自动测量系统,测量模拟天线的方向图(下文称为模拟法)。图4为采用内、外校准法和模拟法测量的天线方向图比较,这里接收机通道信号的幅度、相位计算用的是FFT法。内校准法和模拟法测量所用功分器和电缆相同,所以其对方向图影响也相同。二者测出的天线方向图主瓣宽度、最大指向几乎完全相同,副瓣结构形式也相同。但副瓣大小和零点的位置略有不同,其原因在于,二者测量的角度间隔不同,模拟法测量的角度间隔为0.02°,DBF天线测量的角度间隔为1°。由于外校准法已考虑了天线的互耦的影响,所以方向图零深更低。

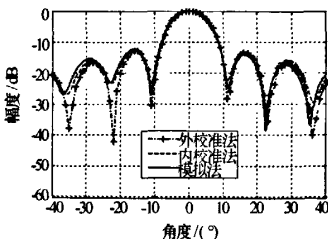


图4 不同方法测量的方向图比较

图5为利用外校准法校准后,用本文前面提到的3种不同算法对相同的测量数据计算的方向图与天线方向图理论值的比较,从中可以看出,3种算法计算出来的结果相符,与理论方向图也符合较好。

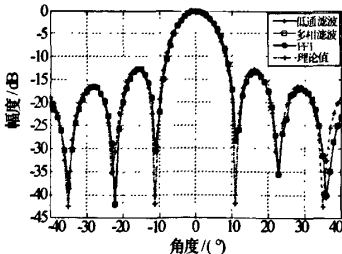


图5 3种DBF算法测量的方向图与理论值的比较

4 结束语

从实验结果看,本文介绍的3种DBF算法精度相

当,而且所提供的校准方法和天线方向图计算公式是可靠的。在需要精确测量工作频率的点频工作条件下,用本文提到的FFT法较好。对宽带系统,采用多相滤波算法可以降低对处理速度的要求,提高实时处理能力。数字混频低通滤波法介于二者之间。因此,雷达系统设计师应根据系统的总体要求和所用的信号处理硬件,选择相应的DBF算法。

本文实验结果还表明,由于数字阵列天线能精确测量各接收通道信号的幅度和相位,所以数字天线校准比传统相控阵简单。数字天线的内校准法,只需在天线的各接收通道注入相参信号,就可以校准通道间的幅、相误差。外校准法,只需测量一次待测天线远场的幅度、相位数据作为校准数据即可。

### 参考文献

- [1] Dasvi D. Analysis of array antenna patterns during test[J]. Microwave Journal, 1978, 21(2): 67-70.
- [2] 谢良贵. 数字波束形成技术的工程应用问题[J]. 电子学报, 1995, 23(10): 105-109.  
Xie Lianggui. Application problem about digital beamforming technology in radar engineering[J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(10): 105-109.
- [3] 程伟, 左继章, 许悦雷. 数字波束形成器的FPGA实现[J]. 现代雷达, 2003, 25(5): 34-36, 39.  
Cheng Wei, Zuo Jizhang, Xu Yuelei. FPGA implementations of digital beamformer[J]. Modern Radar, 2003, 25(5): 34-36, 39.
- [4] Steyskal H, Rose J F. Digital beamforming for radar systems[J]. Microwave Journal, 1989, 32(1): 121-136.
- [5] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Ding Kang, Xie Ming, Yang Zhijian. The theory and technol-

ogy of discrete spectrum correction[M]. Beijing: Science Press, 2008.

- [6] 孙晓兵, 保铮. 中频信号采样与正交相干检波[J]. 系统工程与电子技术, 1993, 15(5): 1-9.  
Sun Xiaobing, Bao Zheng. Sampling of IF signal and quadrature coherent detector[J]. Systems Engineering and Electronics, 1993, 15(5): 1-9.
- [7] 张永慧, 高西全, 卢朝阳. 中频数字化处理的关键技术[J]. 计算机工程, 2003, 29(13): 1-3.  
Zhang Yonghui, Gao Xiquan, Lu Zhaoyang. Key technology of digital IF processing[J]. Computer Engineering, 2003, 29(13): 1-3.
- [8] 余成波, 陶红艳, 杨菁, 等. 数字信号处理及Matlab实现[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
Yu Chengbo, Tao Hongyan, Yang Jing, et al. Digital signal processing and Matlab implementation[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 张明友. 数字阵列雷达和软件化雷达[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
Zhang Mingyou. Digital array radar and software defined radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [10] 路后兵, 姜秋喜, 毕大平, 等. 基于DSP的多相滤波正交数字下变频[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(5): 14-17.  
Lu Houbing, Jiang Qiuxi, Bi Daping, et al. Polyphase filters quadrature digital down converter process based on DSP[J]. Electronic Warfare Technology, 2004, 19(5): 14-17.

陈文俊 男, 1970年生, 博士, 高级工程师。研究方向为雷达天线系统设计。

(上接第65页)

- [2] 何其文. 固态器件, 电真空器件的竞争及其产物——微波功率模块[J]. 现代雷达, 1998, 20(2): 73-82.  
He Qiwen. Competition between the solid-state device and the vacuum device and its product——microwave power module[J]. Modern Radar, 1998, 20(2): 73-82.
- [3] 郑新, 李文辉, 潘厚忠, 等. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
Zheng Xin, Li Wenhui, Pan Houzhong, et al. Radar transmitter technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [4] 陈红广. 一种用于行波管发射机的宽脉冲调制器[J]. 火控雷达技术, 2006, 35(1): 35-37.  
Chen Hongguang. A wide pulse modulator for TWT transmitter

[J]. Fire Control Radar Technology, 2006, 35(1): 35-37.

- [5] 钱锰, 廖源, 杨明. 新型浮动板调制器用触发器的设计与实现[J]. 现代雷达, 2005, 27(1): 52-54.  
Qian Meng, Liao Yuan, Yang Ming. Design and implementation of a new trigger for floating-deck modulator[J]. Modern Radar, 2005, 27(1): 52-54.

李春燕 女, 1979年生, 工程师。研究方向为雷达发射技术。

王超 男, 1976年生, 工程师。研究方向为雷达发射技术。

陈汉兴 男, 1976年生, 高级工程师。研究方向为雷达发射技术。

## 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,一直致力和专注于微波、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>