

多波束相控阵天线数字波束形成网络的设计与实现

厉 剑^{1,2} 王华力² 邓德鑫¹

(中国人民解放军 61769 部队, 哈尔滨 150039)¹ (中国人民解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007)²

摘要: 多波束相控阵天线系统利用波束形成网络在空间形成多个不同指向的波束, 实现空分复用, 增加通信容量。论文结合 61 单元六边形平面相控阵天线, 阐述了形成 16 个波束的工作原理, 提出了一种基于分布式算法的数字波束形成网络方案。该方案利用 FPGA 内部丰富的存储资源实现复数乘累加功能, 从而大大节约 FPGA 硬件资源, 使得 61 单元形成 16 个波束的数字波束形成网络在一片 FPGA 上实现成为可能, 仿真结果验证了该方法的可行性和正确性。

关键词: 多波束相控阵天线, 数字波束形成网络, 分布式算法

The Design and Implementation of Digital Beam-Former of Multi-beam Phased Array Antenna

Li Jian Wang Huali Deng Dexin

Abstract: Multi-beam phased array antenna system utilizes beam-forming network to carry out space-division multiple access (SDMA) by producing multiple beams with different directions. According to the mechanism of producing 16 contoured beams with a 61 elements hexagonal planar array is discussed, and a novel digital beam-former scheme based on distributed arithmetic is presented. This beam-former can carry out multiply and accumulate operations utilizing the memory blocks of FPGA instead of hardware multiplier, which reduces the FPGA chip resources. The schematic design of this digital beam-former is validated with the simulation results.

Keywords: Multi-beam Phased Array Antenna; Digital Beam-Forming Network; Distributed Arithmetic

1 引言

现代通信中普遍采用多波束天线技术来增加系统容量。多波束天线系统采用波束形成网络在空间形成多个不同指向的波束, 从而实现空分复用, 增加通信容量。波束形成可以分为模拟和数字两种实现方式, 其中数字波束形成 (DBF) 具有波束灵活可控、旁瓣电平低以及自适应调零等优点得到了越来越多的应用^[1,2]。目前, 数字波束形成网络大多采用 DSP 或 FPGA 等器件来实现。DSP 芯片内部嵌有硬件乘累加模块, 适合乘累加运算, 因此用 DSP 可以很方便的实现波束形成网络的设计^[3]。但是 DSP 的引脚太少, 不适合大规模阵列的波束形成运算,

特别是当相控天线单元规模较大或要求形成的多波束数量较多时, 单片 DSP 很难满足上述要求。FPGA 具有众多的引脚资源, 并且支持 LVDS 输出, 可以实现数据的高速传输。文献中[4]采用 FPGA 内部集成的硬件乘法器实现数字波束的形成, 这样设计灵活简单, 并且硬件乘法器的运行速率较高。

但 FPGA 硬件乘法器数量有限, 因此用单片 FPGA 很难实现大规模阵列的波束形成运算。针对上述问题, 文章提出了一种基于分布式算法来实现数字波束形成运算, 从而减少了硬件资源的开销, 使 61 单元形成 16 个波束的数字波束形成运算在一片 FPGA 上实现成为可能。

2 61 单元六边形平面相控阵天线多波束形成原理

六边形平面阵天线的天线单元按等边三角形排列，它的中心单元被若干个同心的六边形阵环绕所组成，每个六边形阵由若干均匀分布的天线单元组成，一个 61 单元的六边形平面阵如图 1 所示。由于六边形平面阵具有体积小、辐射效率高等优点，因此在通信卫星和大型相控阵雷达中有着广泛的应用。

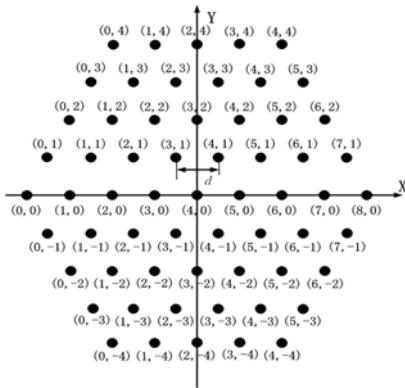


图 1 61 单元六边形平面相控阵天线

如果以 61 单元六边形平面相控阵天线的中心阵元(4,0)阵元作为参考阵元，那么第(i,k)阵元在平面坐标系中的坐标为 $((4-i-\frac{|k|}{2})d, \frac{\sqrt{3}k}{2}d)$ ，其中 d 为阵元间距， $i=0,1,\dots,8; k=-4,-2,\dots,4$ 。根据平面相控阵天线原理，可以得出 61 单元六边形平面相控阵天线的方向图函数为^[5]：

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{k=-4}^4 \sum_{i=0}^{8-|k|} A_{ik} e^{j[(\frac{2\pi}{\lambda}(4-i-\frac{|k|}{2})d \cos \varphi \sin \theta - \Delta\phi_i) + (\frac{2\pi\sqrt{3}k}{\lambda}d \sin \varphi \sin \theta - \Delta\phi_k)]}$$

其中， A_{ik} 为第(i,k)阵元的幅度加权系数， $\Delta\phi_i$ 和 $\Delta\phi_k$ 为第(i,k)阵元在水平方向上和垂直方向上的阵内相位差。

为了在某一特定方向 (θ_0, φ_0) 获得波束最大值，第(i,k)阵元的阵内相位差应满足：

$$\Delta\phi = \phi_i + \phi_k$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} d((4-i-\frac{|k|}{2}) \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \quad (1) \\ + \frac{\sqrt{3}k}{2} \sin \varphi_0 \sin \theta_0)$$

这样对各个阵元进行不同的相位加权，就可以形成不同指向的波束。多波束的形成可以分解成多个单波束的形成的叠加，因此用 61 单元六边形平面相控阵天线产生 16 个波束，可以首先求出形成某一波束时，基带信号对应的幅相加权系数。这样将 16 路基带信号与其对应的加权系数相乘后进行叠加，叠加信号经 61 单元天线辐射后，就可以在空间形成 16 个不同的指向的波束。因此在进行数字波束形成网络设计时，首先根据每个波束的指向 (θ_m, φ_m) 和阵元位置坐标(i,k)求出基带信号的阵内相位差 $\Delta\phi_{mn}$ ，其中 $m=1,2,\dots,16$ ， $n=1,2,\dots,61$ 。这样对于某一天线阵元(i,k)的激励电流为

$$I_n = \sum_{m=1}^{16} S_m A_{mn} e^{-j\Delta\phi_{mn}} \quad (2)$$

为了表示方便，假设 $W_n^m = A_{mn} e^{-j\Delta\phi_{mn}}$ 。这样 61 阵元的加权求和运算可以写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{61} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1^1 & W_1^2 & \dots & W_1^{16} \\ W_2^1 & W_2^2 & \dots & W_2^{16} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{61}^1 & W_{61}^2 & \dots & W_{61}^{16} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_{16} \end{pmatrix} \text{ 得到}$$

的 61 路激励信号经过数字上变频、D/A 后经射频通道到达各天线单元，经天线辐射后，在空间形成多个波束。

3 数字波束形成网络的 FPGA 设计

从数字多波束形成原理可以看出，波束形成的实质就是基带信号与幅相加权系数的乘累加运算。对于 61 单元平面相控阵天线形成 16 波束的情况，16 路基带信号（数字正交化后分为 I、Q 两路）分别与 61 组 16 维的复系数相乘然后相加。根据多波束相控阵天线幅相加权系数固定的特点，采用分布式算法（distributed arithmetic, DA）来实现复数乘累加功能。

3.1 分布式算法

分布式算法适合固定系数的乘累加运算，它使用存储器来代替乘法器以实现乘累加功能^{[6][7]}。分布式算法将已知系数所有可能的和的结果存储起来，然后用输入变量作为寻址地址，查找到的数据就是乘累加结果。

假设 N 个固定系数 $c(n), n = 1, 2, \dots, N$ 分别与 N 个输入变量 $x(n), n = 1, 2, \dots, N$ ，相乘相加，乘累加结果用 y 表示，那么

$$y = \sum_{n=1}^N c(n) g x(n) \quad (3)$$

将 $x(n)$ 表示成二进制数形式，即

$$x(n) = -2^{B-1} g x_B(n) + \sum_{b=1}^{B-1} x_b(n) g^{2^{b-1}} \quad (4)$$

其中 B 表示 $x(n)$ 的位宽， $x_b(n)$ 表示 $x(n)$ 二进制数的第 b 位， $1 \leq b \leq B$ ， $x_b(n) = 0$ 或 1 。将式(4)代入式(3)，则 y 可以写成

$$\begin{aligned} y &= \sum_{n=1}^N c(n) g - 2^{B-1} g x_B(n) \\ &\quad + \sum_{b=1}^{B-1} x_b(n) g^{2^{b-1}} \\ &= c(1)(-x_B(1)g^{B-1} + x_{B-1}(1)g^{B-2} \\ &\quad + \dots + x_1(1)g^0) \\ &\quad M \\ &\quad + c(N)(-x_B(N)g^{B-1} + x_{B-1}(N)g^{B-2} \\ &\quad + \dots + x_1(N)g^0) \\ &= -(c(1)g x_B(1) + c(2)g x_B(2) \\ &\quad + \dots + c(N)g x_B(N))g^{B-1} \\ &\quad M \\ &\quad + (c(1)g x_1(1) + c(2)g x_1(2) \\ &\quad + \dots + c(N)g x_1(N))g^0 \end{aligned} \quad (5)$$

对于不同的输入变量 $x(n)$ ，式(5)括号中对应的和不同，但是其所有可能的和值可以列举出来。将所有可能的和放在一张查找表中(Look-Up Table, LUT)，用 N 个输入变量 $x(n)$ 构成查找表的和地址，将查找到的结果与其对应的权值相乘(移位)并累加，这样经过 B 次查表后可以得到乘累加结果。

3.2 基于 DA 算法的波束成型网络设计

在数字波束形成过程中，16 路基带信号 $s = [s_1, s_2, \dots, s_{16}]$ ，数字正交化后分为 I、Q 两路，表示为 $s = \text{Re}(s) + j \text{Im}(s)$ ，某一天线单元的对 16 路基带信号的幅度和相位加权系数 $w = [w_1, w_2, \dots, w_{16}]^T$ 也为复数，用式 $w = \text{Re}(w) + j \text{Im}(w)$ 表示这样信号的幅度和相位加权运算可以表示为：

$$\begin{aligned} &s g w \\ &= (\text{Re}(s) + j \text{Im}(s)) g (\text{Re}(w) + j \text{Im}(w)) \\ &= (\text{Re}(s) g \text{Re}(w) + j \text{Im}(s) g \text{Re}(w)) \\ &\quad + (-\text{Im}(s) g \text{Im}(w) + j \text{Re}(s) g \text{Im}(w)) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可以看出，实现复数的乘累加运算需要 2 张查找表，分别用来实现加权系数实部和虚部查找表。其中 $\text{Re}(s) g \text{Re}(w)$ 和 $\text{Im}(s) g \text{Re}(w)$ 项都是对加权系数实部的查表，因此只需要一张表就能实现两组数据的乘累加。假设基带信号数字正交化后信号位宽为 16 位，对查表的运行速率和资源消耗进行综合考虑，采用半并行查表方式实现复数的乘累加运算，即将基带信号并串转换后，信号位宽变为 2 位(根据实际也可以设置为 4 位或 8 位等)，这样数据传输速率变为原来的 8 倍。用该速率对并串转换后的信号进行并行查表，得到的结果存放在寄存器中，8 个周期后得到信号的乘累加结果，采用该结构的数字波束器结构如图 2 所示：

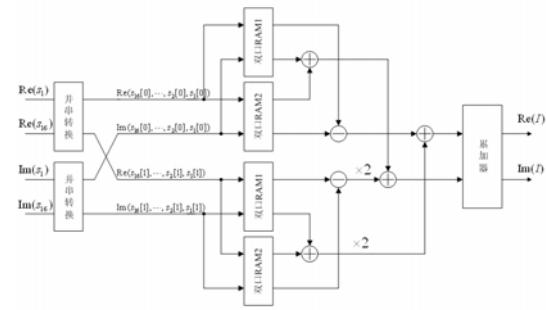


图 2 基于分布式算法的数字波束形成网络

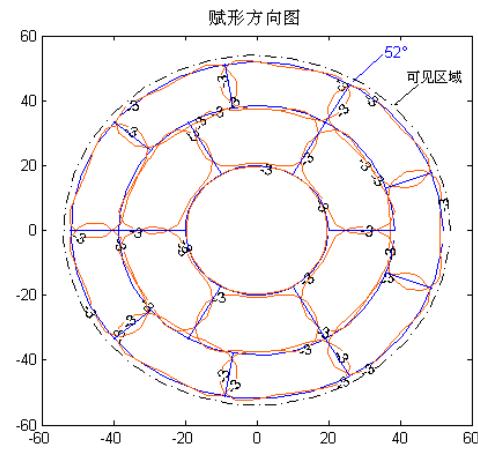
在上图中，用 16 路信号的实部组成查表地址，对加权系数实部查找表(双口 RAM1)进行查表，得到的乘累加结果对应着式(6)中的 $\text{Re}(s) g \text{Re}(w)$ 项；对加权系数虚部查找表(双口 RAM2)进行查表，得到的乘累加结果对应着式(6)中的 $\text{Re}(s) g \text{Im}(w)$ 项。

用 16 路信号的虚部组成查表地址，对加权系数实部查找表进行查表，得到的乘累加结果对应着式（6）中的 $\text{Im}(s)\text{gRe}(w)$ 项；对加权系数虚部查找表进行查表，得到的乘累加结果对应着式（6）中的 $\text{Im}(s)\text{gIm}(w)$ 项。将 $\text{Re}(s)\text{gRe}(w)$ 项与 $\text{Im}(s)\text{gIm}(w)$ 项相减得到复数乘累加结果的实部， $\text{Re}(s)\text{gIm}(w)$ 项与 $\text{Im}(s)\text{gRe}(w)$ 项相加得到复数乘累加结果的虚部。将所得到的实部和虚部结果与对应的权值（2 的幂的形式，通过移位来实现）相乘累加，8 个时钟周期后完成对 16 路基带信号的加权运算，这样就可以得到一个天线单元的激励电流。对于其他单元的加权求和运算，实现原理和结构完全相同，只是加权系数的不同。

4 功能仿真与验证

数字波束形成网络的设计实现采用 Altera 公司 EP2S130 系列 FPGA 芯片。EP2S130 器件具有相当于 130 万门的逻辑资源，内嵌 9Mb 多的 Memory Block 资源，配有 166 对 LVDS 收发器，可以满足多阵元天线的高速数据传输要求。对于上述半并行的分布式算法结构，一个天线单元的加权求和运算共消耗自适应查找表结构（ALUT）496 个，占用存储单元 4096bit，占用的资源不到整个芯片的 1%，这样 61 单元 16 波束的波束形成网络使用一片 EP2S130 芯片就能够实现。该方案在 Quartus II 软件环境下的仿真结果正确，将得到的仿真结果导入到 MATLAB

软件中，得到的 16 个赋形波束如图 3 所示：



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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、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)，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>