

基于 DDS 的有源相控阵天线

鲁加国, 吴曼青, 靳学明, 方正新

(华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031)

摘 要: 有源相控阵天线不仅能提高通信系统的性能, 而且还能扩充其功能, 所以在通信领域的应用越来越广泛. 本文介绍一种没有高频移相器的 8 单元有源相控阵天线系统, 它由平面天线阵、数字 T/R 组件、接收 DBF 和系统控制分析软件等组成. 其基本原理是在发射模式下, 利用直接数字合成 (DDS) 代替传统的高频移相器和衰减器. 由于 DDS 的工作频率比较低, 需要通过上变频到系统所需要的工作频率 (2.0 GHz). 在发射模式下, 通过控制 DDS 完成发射波束形成所必需的幅度、相位加权 and 上变频所必需的本振信号; 在接收模式下, 则利用 DDS 技术产生接收信号下变频所必需的本振信号, 然后采用 DBF 技术形成接收波束. 文中详细介绍了基于 DDS 的有源相控阵天线的实现方法和实验结果. 通过 8 单元基于 DDS 的有源相控阵天线系统的研究, 证实了 DDS 技术在相控阵天线中应用的显著优点和相控阵天线在通信领域具有潜在应用市场.

关键词: DDS; 数字 T/R 组件; 有源相控阵天线; 通信系统

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0199-04

Active Phased-Array Antenna Based on DDS

LU Jia-guo, WU Man-qin, JIN Xue-ming, FANG Zheng-xin

(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: The active phased-array antenna not only can improve the communication system performance, but also can extend its function, so it is used in communication system more and more widely. This paper introduces an active phased-array antenna system that has eight antenna elements without high frequency phase shifters. The system consists of planar array, digital T/R modules, receiving DBF and system control/analysis software etc. The basic theory is: in transmitting mode, the traditional high frequency phase shifters and attenuator can be replaced by direct digital synthesis (DDS). Because the operation frequency of DDS is very low, the frequency must be converted to needed operation frequency (2.0 GHz) by upper frequency conversion. In transmitting mode, through controlling DDS, it produces the amplitude and phase weights needed by transmitting beam, and the local oscillation signal needed by upper frequency conversion. In receiving mode, through controlling DDS, it produces the local oscillation signal needed by down frequency conversion of the receiving signal. Then the DBF is used to form the receiving beam. This paper introduces in detail the ways and results of the experiment of the active phased array antenna based on DDS. Through the research of eight-element active phased array antenna based on DDS, the notable virtues of DDS technology in phased array antenna, and the potential application market of the phased array antenna in communication are proved.

Key words: DDS; digital T/R module; active phased-array antenna; communication system

1 引言

直接数字合成 (DDS) 最初是用在高稳定频率合成信号源中. 随着数字技术的发展, DDS 已成为了商品化的功能模块. 由于 DDS 具有高稳定密集跳频特性、相位和频率调整灵活、频率转换时间短、相位噪声低等显著优点, 所以, 近年来在通信、仪器、仪表等领域得到广泛应用.

华东电子工程研究所于 1993 年 10 月提出了基于 DDS 的“直接数字波束控制系统”, 其基本思想就是利用 DDS 芯片取代传统相控阵天线的移相器. 并于 1998 年研制出 4 单元基于

DDS 的有源相控阵天线, 该天线只有发射状态, 在 S 波段形成了发射和、差波束及低副瓣方向图. 2000 年 9 月研制出 8 单元基于 DDS 的有源相控阵天线^[1], 该天线具备收发两种状态. 在发射状态下, 通过控制系统 DDS 完成发射波束形成所必需的幅度、相位加权, 以及波形产生和上变频所需的本振信号; 在接收状态下, 则利用 DDS 产生接收信号下变频所需的本振信号, 之后采用 DBF 技术形成接收波束. 英国 ROKE MANOR 研究中心在 1995 年报道研制出基于 DDS 的有源相控阵天线^[2]. 美国海军实验室 NSWCDD 实验室以及 MITL INCOLN

收稿日期: 2001-09-03; 修回日期: 2002-04-28

基金项目: 国家 863 计划 308 项目 (No. 863-308-17-02(5), No. 863-308-17-0215)

实验室正在联合研制民用全数字雷达^[3]。目前,该雷达尚在论证阶段,它的核心技术是基于 DDS 的发射数字波束形成技术和基于 A/D 的接收数字波束形成技术,其应用研究集中在区域气象雷达、数字机场监视雷达、城市空中交通监视雷达、数字 SAR 雷达、卫星数字雷达无线通信等领域。日本 ATR 实验室将自适应波束形成技术用于移动通信的相控阵天线上^[4],其发射方向图可在某些方向上形成零点,以消除天线发射时对其他天线造成的干扰。本文介绍了我们研制的基于 DDS 8 单元有源相控阵天线,天线系统的原理框图如图 1 所示,照片如图 2 所示。该系统由天线阵列、校准网络、数字 T/R 组件、频率源、数据采集和控制系统组成。

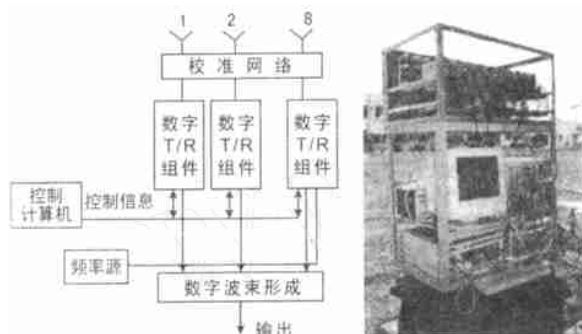


图 1 天线系统原理图



图 2 天线系统照片

2 有源相控阵天线的设计

2.1 阵列天线

如图 3 所示,天线阵面是由 4×12 单元微带折合振子组



图 3 天线阵面

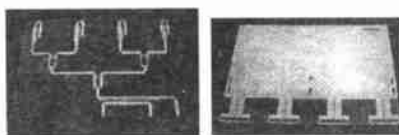


图 4 天线列线阵

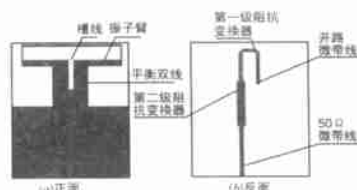


图 5 天线单元结构示意图

2.2 通道校准

根据校准信号的提取方式不同,基本上将校准方法分为外校准和内校准两种。外校准法通常有两种方案,一种是近场法,另一种是远场法。本系统中分别对远场外校准和内校准两种通道校准方法进行研究。本系统中,内校准方案是在天线列阵与耦合器端口接入高频矩阵开关,通过矩阵开关选通被测通道,其他通道处于隔离状态。矩阵开关、列线阵上的耦合器和列线阵的主通道构成校准通道。远场外校准方案,不需要矩阵开关,列线阵上的耦合器也不需要,只将辅助天线置于待测天线的远场。控制 T/R 组件的状态来选通校准通道。在实际应用中,这两种校准方法都有鲜明的技术特点,内校准方法能够不受环境等因素的影响准确地测出各通道的幅相误差值,从设备量上来看,要增加矩阵开关和耦合器。但是其缺点是没有把列线阵的幅相误差,以及列线阵之间互耦的影响考虑进去。远场外校准方案是一个理想方案,它能考虑包

成的,即 12 个列线阵,每列线阵 4 个天线单元,12 个列线阵的中间 8 个线阵后接数字 T/R 组件,两端各有两个列线阵后接匹配负载,用来改善阵列天线互耦环境。每个列线阵是微波上进行 4 个天线单元功率分配/合成的,为了实现系统幅相误差校正,在每个线阵上增加一个耦合器,如图 4 所示,天线单元结构示意图如图 5 所示。列线阵分析与设计时,引入了一体化设计思想,将由辐射单元组成的辐射网络和相应的馈电网络一并分析,考虑两个网络之间的耦合。天线单元端口与网络一般是不匹配的,馈送的能量要反射到馈电网络激励端口,并且通过内部耦合影响馈电网络的其他端口。假设馈电网络的内部耦合用散射矩阵 $[S^N]$ 来表示,馈电网络 N 个端口的电压分布为一维列矩阵 $[a]$,那么,矩阵 $[a]$ 就与馈电网络的散射矩阵 $[S^N]$ 及天线单元反射到馈电网络 N 个输出端口的反射波 $[b]$ 密切相关,若天线口径不是完全匹配,馈入天线单元的部分能量就将反射到馈电网络,同时,由于馈电网络互耦的存在,则部分能量再耦合到馈电网络的其他端口,从而影响天线口径幅相分布。用 $[A]$ 表示馈电网络的理想激励,由于馈电网络是线性,那么天线口径电压的实际分布为^[5]

$$[a] = [S^N][b] + [T_N][A] \quad (1)$$

式中, $[T_N]$ 是馈电网络的传输矩阵。

在实际列线阵天线设计时,将四个天线单元的输入阻抗、外部互耦进行了常规的矩量法分析,并将结果代入式(1)与功分网络进行一体化设计。在工程实现时,将天线单元、功分网络、校准网络中的耦合网络集成在同一块微带基板上,大大改善了列线阵电性能,使列线阵具有体积小、重量轻、损耗低等特点。

括列线阵之间幅相不一致及列线阵之间互耦的影响,但是远场外校准方法的精度受到环境的影响。在列线阵之间的互耦修正分析中,假设归一化激励入射电压矩阵为 $[V]$,天线列阵馈电电流分布矩阵 $[I]$,则^[6]:

$$[i] = \{ [I] - [S] \} [V] \quad (2)$$

式中, $[I]$ 为单位矩阵, $[S]$ 为散射矩阵,其中 S_{ij} 为阵列第 i 单元和第 j 单元之间的互耦(散度)系数。根据式(2)将实际测试列线阵方向图进行互耦校准。

2.3 数字 T/R 组件

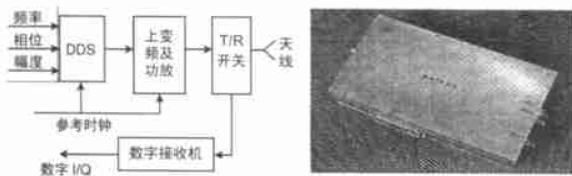
数字 T/R 组件^[7]核心思想是基于 DDS 技术的移相功能代替传统的微波数字移相器,用其幅度控制功能代替传统的微波数控衰减器。将波束形成和波形形成融合在一起,实现发射 DBF 功能。根据目前 DDS 技术的发展水平,DDS 可以实现极高的相位、幅度和频率控制精度。但采样定理的限制,DDS 的输出频率比较低,无法直接输出微波频段的频率信号。因此

必须对其进行频率扩展,频率的扩展包括两个方面:一是工作频率的扩展;二是工作带宽的扩展.工作频率的扩展可以通过上变频实现,带宽的扩展则可以在上变频扩展工作频率的同时,通过改变本振信号的频率(即跳频方式)来实现.

数字 T/R 组件的收发状态是独立的,发射支路由 DDS 产生所需的波形,经两次上变频形成发射信号通过环流器输出;接收支路由环流器输入经限幅低噪声放大、两次下变频、A/D 变换、I/Q 分离形成数字信号输出.这种方案中,DDS 只对发射信号进行幅度和相位加权,而在接收状态幅相控制通过常规 DBF 的方法来完成.收发通道变频所需的本振信号是时分复用的,这有利于改善收发通道间的相互干扰.

数字 T/R 组件是由收发两个支路有机结合构成的,与传统的 T/R 组件发射通道和接收通道相比既有相似的一面,也有特殊的一面.如从发射通道组成来看实现方案并没有太大区别,但研究的侧重点不同,数字 T/R 组件幅度和相位调整是在数字部分(也就是在 DDS 中)实现的,因此保证上变频通道幅度、相位的线性对最终发射波束形成是至关重要的,也就是说应使经 DDS 完成幅相控制的较低频率信号传递到射频所引入的幅相误差尽可能小.这是数字 T/R 组件与传统 T/R 组件发射通道的区别.因此在设计发射支路时主要考虑通道幅相的线性度,除正确设计频率窗口和通道的接口电平外,还必须考虑通道的无杂散动态范围,通常情况下,采用高线性度的射频功率放大器.

在接收支路中,数字 T/R 组件采用了全数字化的接收机技术,直接输出数字 I/Q 信号,这属于数字接收机的范畴,但接收支路设计的重点是多路接收支路之间具有良好的相似性,通道具有大动态范围特别是通道的无杂散动态范围.数字 T/R 组件的组成框图如图 6 所示,样件的照片如图 7 所示.



3 有源相控阵天线的实验结果

有源相控阵天线由天线阵列、校准网络、数字 T/R 组件、频率源、数字采集卡、控制分析计算机及相关软件等部分组成,数字 I/Q 的形成及接收 DBF 是通过数据采集卡采集 8 路接收数据后,在计算机进行实时处理来实现的.

3.1 通道校准

由于接收与发射的通道不是共同的,所以分别进行校准.本系统分别在远场外校准和内校准两种方案下进行研究.图 8 是发射、内校准情况下,列线阵天线的幅相波瓣测试结果;图 9 是发射、远场外校准情况下,列线阵天线互耦校准后的幅相波瓣测试结果.针对在校准研究过程中出现的问题,讨论如下.

⑧ 系统的信噪比和接收机的动态范围是决定校准精度的

关键因素.采用合适的方法,提高系统的信噪比和接收机的动态范围.对于远场外校准方法,环境影响也是非常重要的.

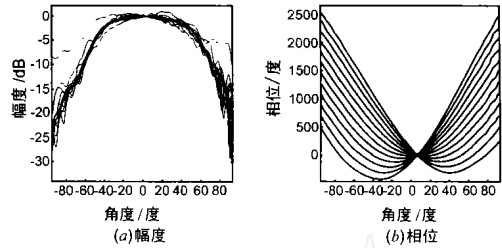


图 8 天线单元方向图

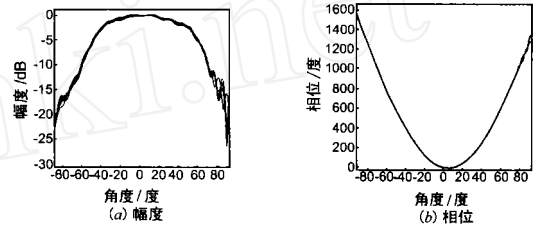


图 9 天线单元方向图(互耦校准后)

⑨ 采用远场外校准方法时,如果发现某一路有 7 的相位误差,就不能简单地只对该路 7 的相位误差进行补偿.考虑到天线外部互耦的影响,此时必须对相邻的各路幅相误差都给予补偿.在常规情况下,一般要进行多次(3~6 次)校准,才能获得较为理想的结果.

⑩ T/R 组件的电磁屏蔽性能对校准精度有一定的影响.防止 T/R 组件的电磁泄漏,提高 T/R 组件的电磁屏蔽性能是提高天线系统校准精度的重要途径.

3.2 发射 DBF 方向图

用远场外校准方案获得通道幅相误差代入 DDS 中加以修正,我们均匀加权、低副瓣加权、波束置零点几种情况下获得了发射方向图.图 10 是波束指向 4 时均匀加权情况下的发

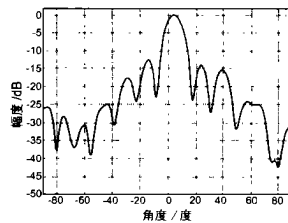


图 10 均匀加权 方向 0°

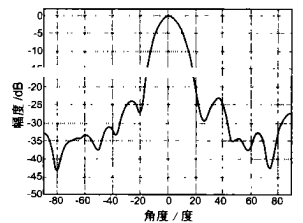


图 11 -35dB 切比雪夫加权 方向 0°

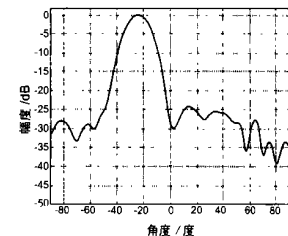


图 12 -35dB 切比雪夫加权,方向 -30°

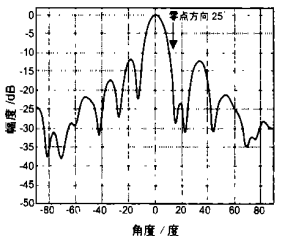


图 13 均匀加权方向 0° 零点 25°

射方向图,图 10 至图 13 对应低副瓣加权,发射波束扫描和发射波束置零三种情况下的发射方向图。

3.3 接收 DBF 方向图

在接收情况下,补偿远场外校准方案获得通道幅相误差,用实际采集的 8 路数据进行 DBF 处理,得到均匀加权和 -40dB 切比雪夫加权时接收方向图,如图 14、15 所示。

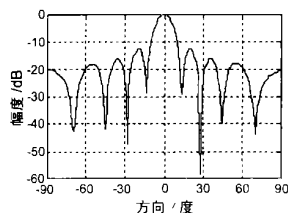


图 14 波束指向 0° 均匀加权时接收方向图

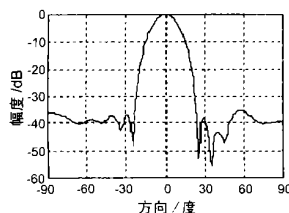


图 15 波束指向 0° -40dB 切比雪夫加权时接收方向图

4 结论

在经典的相控阵天线中,波束形成所需的幅度加权和移相是在射频阶段通过衰减器和移相器来实现的,从数学意义上讲,幅度加权和移相可以在信号产生至天线阵元之间整个传输通道的任意一级实现.本系统形成收发波束就是在数字部分实现.与经典的有源相控阵天线相比,基于 DDS 的有源相控阵天线有以下显著的优点:

① 发射模式下,幅度和相位控制精度高,有利于实现低副瓣发射波束,以免干扰其它的通信系统,并且能精确在某些方向形成零点,保护重点区域(例如民用机场等)。

② 波束扫描速度快,控制灵活,波束易于按照期望赋形,适合特别需要的地方。

③ 发射模式系统设备量小,无需专用高频网络、校准系统及移相器,高频损耗小,上变频后直接线性放大,能量利用率高。

④ 控制时钟可以实现真正时间延迟,克服天线孔径渡越时间的难题。

参考文献:

- [1] 吴曼青,王炎.基于 DDS 的收发全 DBF 相控阵技术[J].高技术通讯,2000(8):66-69.
- [2] Adrian Garrod. Digital modules for phased array radar[A]. International Radar Conference[C]. USA:IEEE,1995.

- [3] Harold Szu, Ron Slapleton, Frank Willwerth. Digital radar commercial applications[A]. International Radar Conference[C]. USA:IEEE,2000.
- [4] Isam Chiba. Digital Beamforming Antenna System for Mobile Communication[M]. USA:International Symposium on Phased Array,1996.
- [5] 冯祖伟.极低副瓣偶极子阵列天线的一体化设计[A].1991 年天线年会论文集[C].南京:天线年会,1991.
- [6] 魏文元,等.超低副瓣阵列天线互耦与馈电分布[J].西安电子科技大学学报,1991,18:112-115.
- [7] 吴曼青,靳学明,谭剑美.相控阵雷达 T/R 组件[J].现代雷达,2002(4):167-171.

作者简介:



鲁加国 男,1964 年 12 月出生于安徽,1987 年毕业于西安电子科技大学电磁场和微波技术专业,现为华东电子工程研究所副总工程师,研究员,中国电子学会高级会员,IEEE 高级会员,主要从事雷达系统和相控阵天线系统设计研究工作,获国防科技进步奖 5 项,发表论文 20 余篇。



吴曼青 男,1965 年出生于安徽,1990 年毕业于国防科技大学,现为华东电子工程研究所所长,研究员,电子学会高级会员,电子学会青年工作委员会委员,主要从事雷达系统研究,发表论文 30 余篇,获电子部科技进步一等奖一项,国防科工委科技进步二等奖三项,国家科技进步二等奖一项。



靳学明 男,1966 年生于安徽贵池,1989 年毕业于重庆大学无线电系获工学学士学位,现为华东电子工程研究所高级工程师,主要从事雷达接收机、收/发组件研究工作,目前主要研究领域雷达超宽带信号产生、DDS 技术、数字 T/R 组件等,获部科技进步一等奖两项,国防科技进步二等奖一项。