

有源集成天线阵的功率合成和波束扫描

褚庆昕¹, 艾宝强², 雷振亚²

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 2. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

摘要: 从 York 的非线性动态理论出发, 设计了空间耦合有源天线二元阵, 实现了空间功率合成. 通过改变单元的自由振荡频率, 实现了无相移器的波束扫描, 扫描范围达到 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 实验测试结果与理论预测值吻合良好.

关键词: 有源集成天线阵; 非线性动态理论; 空间功率合成; 波束扫描

中图分类号: TN454 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 11-1952-03

Beam Scanning and Power Combining of Active Integrated Antenna Array

CHU Qing-xin¹, AI Bao-qiang², LEI Zhen-ya²

(1. College of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Active Integrated antenna arrays are designed by use of York's nonlinear dynamic theory and spatial power combining is realized. Through changing the oscillating frequencies of active elements, the beam scanning from $-10^\circ \sim 10^\circ$ is realized without phase shifters. The measurement data and theory values have a good agreement.

Key words: active integrated antenna array; nonlinear dynamic theory; spatial power combining; beam scanning

1 引言

有源集成天线(AIA)凭借体积小、重量轻、结构紧凑等优点,自二十世纪七十年代以来已经吸引了众多学者的目光,出现了各种形式的结构和方案^[1-4].对于发射型AIA,通常构成AIA的固态有源器件的功率是有限的,而且随着频率的升高这一缺点更为突出,因此单个AIA往往不能满足高功率要求.为了解决这一问题,功率合成技术是一种途径.功率合成技术通常包括谐振和非谐振功率合成电路两种形式.谐振功率合成电路将多个固态器件放在同一谐振腔中实现功率合成,但是为了避免多模现象,谐振腔尺寸不能过大,所以,谐振功率合成电路只能集成一定的固态有源器件,提供的功率有限.非谐振电路中的并分结构功率合成电路属于平面结构,通常利用无源功率合成电路将多个有源电路的输出功率合成于同一端口,它克服了谐振腔功率合成电路容纳有源器件有限的缺点,能够更多地集成固态有源器件,合成效率高.然而,由于大量并分结构的出现致使电路面积大、微带传输线多,欧姆损耗和介质损耗显著.AIA阵克服了以上两者的缺陷,具有空间功率合成效率高,容纳单元多、输出功率高等优点.同时,控制有源单元的工作频率和相互耦合分布,可以实现空间波束扫描,从而构成相控阵,省去了传统相控阵中的移相器.由于发射型AIA阵是一耦合的振荡器非线性系统,必须采用非线性动态理论研究.本文将York的空间弱耦合非线性动态理论^[5]应用

于二元阵的研究和设计中,实现了高效的功率合成和波束扫描.扫描范围达到 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 为大规模有源集成天线阵列的设计奠定了基础.

2 York 非线性动态理论

York 的非线性动态分析^[5]的实质是用窄带振荡器模型描述有源集成天线单元,将最邻近天线单元的耦合信号作为注入锁定信号,把整个阵列作为耦合振荡器系统进行有源阵列的非线性动态分析,借助阵元最邻近耦合的合理近似,简化了有源阵列的动态分析,最终得到动态方程和稳定性条件.有源天线单元的窄带振荡器模型如图1所示,其中,将天线单元等效成RLC谐振回路, $-R_d$ 是有源固态器件的负阻,有源器件的电抗部分归到天线等效电路的LC中, $V_{ij} = A_{ij} e^{j\theta_{ij}}$ 是注入锁定信号, $V = A e^{j\theta}$ 是输出电压.由基尔霍夫电压定律和欧姆定律建立时域电路方程得

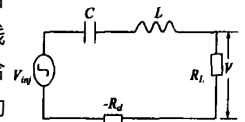


图1 窄带振荡器的简单模型

$$\begin{cases} V_{ij} = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + \frac{V}{R_L} (R_L - R_d) \\ i = \frac{V}{R_L} \end{cases} \quad (1)$$

固态器件的 Van der Pol 模型和最邻近耦合的合理假设可

以推导出有源集成天线阵列的非线性动态方程

$$\frac{dA_i}{dt} = \frac{\mu\omega_i}{2Q}A_i(\alpha_i^2 - A_i^2) + \Delta\omega_m \sum_{j=1}^N A_j \cos(\phi + \theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \Delta\omega_m \sum_{j=1}^N \frac{A_j}{A_i} \sin(\phi + \theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

其中, $\Delta\omega_m = \frac{\omega_i \varepsilon}{2Q}$, 被称为阵列的锁定带宽. 对于弱耦合振荡器 ($\varepsilon \ll 1$), 由式(2)知, 振幅 A_i 始终在自由振荡振幅附近, 所以振幅非线性动态方程可以不过多考虑, 而相位动态方程是动态理论的支配方程.

对于 N 单元阵列, 同步稳定时(即 $dA_i/dt = \omega$) 方程有 2^{N-1} 组解, 为此必须进行解的稳定性分析, 利用扰动理论推得稳定矩阵为 $(N-1) \times (N-1)$ 矩阵, 其元素为

$$m_{ij} = -\frac{\partial H_i(\Delta\vec{\theta})}{\partial(\Delta\theta_j)}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4)$$

其中

$$H_i(\Delta\vec{\theta}) = \frac{A_{i-1}}{A_i} \sin(\phi - \Delta\theta_{i-1}) + \frac{A_{i+1}}{A_i} \sin(\phi + \Delta\theta_i) - \frac{A_i}{A_{i+1}} \sin(\phi - \Delta\theta_i) + \frac{A_{i+2}}{A_{i+1}} \sin(\phi + \Delta\theta_{i+1}) \quad (5)$$

由矩阵理论知, 要想系统稳定, 矩阵的本征值的实部必须为负, 这便是有源阵列的稳定性条件. 将以上分析应用于有源集成天线二元阵, 由式(3)知, 稳态($d\theta/dt = \omega$) 时满足

$$\omega = \omega_1 - \Delta\omega_m \frac{A_2}{A_1} \sin(\phi + \Delta\theta_1) \quad (6)$$

$$\omega = \omega_2 - \Delta\omega_m \frac{A_1}{A_2} \sin(\phi - \Delta\theta_1) \quad (7)$$

式中, $\Delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_2$. 由有源阵列的稳定性条件推得二元阵的稳定性条件为

$$\Delta\omega_m \frac{A_2}{A_1} \cos(\phi + \Delta\theta_1) + \Delta\omega_m \frac{A_1}{A_2} \cos(\phi - \Delta\theta_1) < 0 \quad (8)$$

从式(6)~(8)知, 在知道耦合参数的前提下, 可以利用牛顿法求出 $\Delta\theta_1$ 的稳定解, 然后利用直线阵理论分析天线阵列方向图, 进行有源天线二元阵的设计.

3 二元阵的功率合成和相控阵的实现

在上述理论的基础上, 我们设计了如图 2 所示的二元 AIA 阵. 每个单元由 Gunn 二极管与微带天线组成. 采用时域有限差分法对二元阵进行初步设计^[6-8]. 采用实验方法确定出式(6)、(7)中的耦合参数^[9]. 然后, 利用图 3 所示的测量系统, 分别测定各单元的自由振荡频率和功率以及二元阵的同步频率, 代入式(6)~(8)求解出 $\Delta\theta_1$ 的稳定解. 最后, 根据直线阵理论画出阵列方向图, 确定阵列最大指向的位置, 实现功

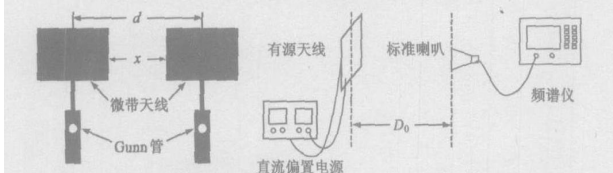


图 2 二元阵几何结构示意图

图 3 有源集成天线测量系统

率合成和波束扫描.

3.1 有源集成天线二元阵的设计

从动态方程可以清楚的看到当 $\phi = 0$ 时二元阵的分析和设计相对简单, 为此我们选取 $d = 17.2\text{mm}$, 天线单元耦合间距: $x = 8.0\text{mm}$, 有源天线与标准喇叭间的距离: $D_0 = 1.70\text{m}$. 我们设计制作了两个 AIA 二元阵. 测试与计算结果如下:

二元阵 1

有源单元 1: 自由振荡频率 $f_{10} = 10.000\text{GHz}$, 接收功率 $P_{r1} = -15.6\text{dBm}$

有源单元 2: 自由振荡频率 $f_{20} = 9.997\text{GHz}$, 接收功率 $P_{r2} = -14.8\text{dBm}$

阵列同步频率: $f_{sy} = 9.995\text{GHz}$ 天线单元间相位差: $\Delta\theta_1 = 3.28\text{rad}$.

二元阵 2

有源单元 1: 自由振荡频率 $f_{10} = 9.9631\text{GHz}$, 接收功率 $P_{r1} = -21.1\text{dBm}$.

有源单元 2: 自由振荡频率 $f_{20} = 9.9654\text{GHz}$, 接收功率 $P_{r2} = -21.6\text{dBm}$.

阵列同步频率: $f_{sy} = 9.9695\text{GHz}$, 天线单元间相位差: $\Delta\theta_1 = 2.592\text{rad}$.

图 4、图 5 分别给出了两种天线阵的实测方向图以及与直线阵理论预测值的比较. 可以看出, 主瓣的理论预测与实验结果吻合良好. 副瓣误差较大, 其原因主要是由于有源天线具有频率牵引效应, 受外界测量环境影响较大.

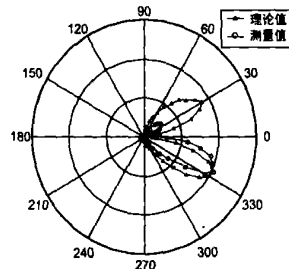


图 4 二元阵 1 的测试结果以及理论与值的比较

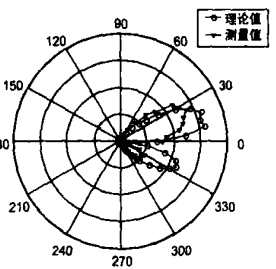


图 5 二元阵 2 的测试结果以及理论与值的比较

3.2 波束扫描的实现

改变有源单元的振荡频率(可以通过改变偏置电压实现), 可以实现不移相器的波束扫描. 这是一种新型的频控相控阵体系. 为了获得较大的扫描角度且使系统处于稳定状态, 必须加大系统的锁定带宽. 由锁定带宽的表达式知, 应减小阵元间距 d ; 同时从直线阵理论知, 为了减小副瓣出现的几率,

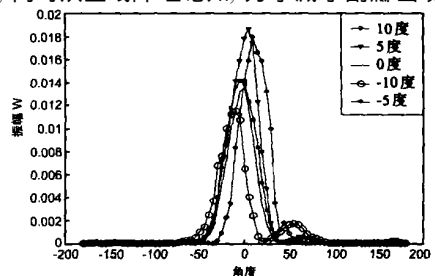


图 6 二元阵的波束扫描

也应减小间距 d . 从此角度出发, 我们缩小相邻单元的间距为 $d = 7.5\text{mm}$, 进行实验, 最终获得了 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 的扫描范围, 如图 6 所示.

4 结论

本文根据非线性动态理论, 设计了由 Gunn 二极管与微带天线集成的二元 AIA 阵, 准确地确定了阵列的最大指向, 实现了空间功率合成和无移相器的频控波束扫描. 实验测试结果与理论预测结果吻合良好.

参考文献:

- [1] Navarro J A, Chang K. Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [2] York R A, Popovic Z B. Active and Quasi Optical Arrays for Solid State Power Combiner[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [3] Qian Y X, Itoh T, Progress in active integrated antennas and their applications[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1998, 46(11): 1891- 1900.
- [4] Chang K, et al. Active integrated antennas[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(3): 937- 943.
- [5] York R A, Nonlinear analysis of phase relation in quasi optical oscillator array[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1993, 41(10): 1799- 1809.
- [6] 褚庆昕. MIC 介质振荡器的 FDTD 分析[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 139- 141.
Chu Q X. FDTD analysis of a MIC oscillator[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(4): 139- 141.

- [7] 胡小娟, 褚庆昕. 微带有源天线的 FDTD 分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(3): 360- 362.
Hu X J, Chu Q X. FDTD analysis of an active integrated antenna[J]. Journal of Xidian University, 2002, 29(3): 360- 362.
- [8] 艾宝强, 褚庆昕, 雷振亚. 基于 FDTD 模拟的有源集成天线设计[J]. 电波科学学刊, 2004, 19(6): 739- 741.
Ai B Q, Chu Q X, Lei Z Y. Design of active integrated antenna based on FDTD method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6): 739- 741.
- [9] 艾宝强, 褚庆昕, 雷振亚. 有源集成天线阵中相邻单元耦合参数的实验确定[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(5): 732- 735.
Ai B Q, Chu Q X, Lei Z Y. Measurement determination of coupling parameters between adjacent elements in an active integrated antenna array[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(5): 732- 735.

作者简介:



褚庆昕 男, 1958 年出生于山东, 华南理工大学电信学院教授、博士生导师, 射频与无线技术研究所所长, 并任中国电子学会高级会员, 微波学会委员, IEEE member, 研究方向包括射频与微波电路、有源集成天线与空间功率合成和时域计算电磁学. E-mail: cqchu@scut.edu.cn.

艾宝强 男, 1978 年生于河北, 西安电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为有源集成天线的设计.