

# 一种新型极化捷变有源微带天线阵

钟顺时, 杨雪霞, 高式昌

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘 要:** 本文提出了一种新颖的极化捷变放大器型有源微带天线阵, 只要在馈电端电控单一有源电路就能实现整个微带天线面阵极化的捷变和信号的放大. 利用角馈方形微带贴片设计了一副具有高隔离度和低交叉极化的新颖16元双极化面阵, 并分析了天线阵的共极化和交叉极化方向图. 介绍了有源电路的设计. 该电路利用一专用电控移相器, 通过改变场效应管(FET)栅极的直流控制电压, 电控两极化端口间的0或90°相差, 实现天线阵由线极化到圆极化的捷变. 低噪声放大器(LNA)不仅使有源天线增益提高12-14dB, 而且改善了天线的驻波比带宽和隔离度. 文中给出了无源双极化阵和有源阵的实验结果, 证实了理论的有效性.

**关键词:** 有源天线; 微带天线阵; 极化; 增益; 移相器

**中图分类号:** TN821.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)06-0782-03

## A Novel Polarization - Agile Active Microstrip Antenna Array

ZHONG Shun-shi, YANG Xue-xia, GAO Shi-chang

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A novel polarization-agile amplifier-type active microstrip array is proposed, in which the polarization agility and amplification of signal for the whole microstrip antenna array can be realized by electrically controlling one active circuit only. Using corner-fed square patch element, a new 16 element dual-polarized array with high isolation and low cross-polarization is designed. Its co and cross-polarization radiation patterns are analyzed. The design method of active circuit is introduced, in which by changing the gate voltage of FET of a phase shifter, 0 or 90° phase shift between dual ports is electrically controlled, resulting in the agility from the linear to circular polarization. The LNA enhances the active gain by 12 - 14dB, and improves the VSWR bandwidth and the isolation of the antenna as well. The experimental comparisons between passive dual-polarized arrays and active arrays are presented to verify the theory.

**Key words:** active antenna; microstrip antenna array; polarization; gain; phase shifter

### 1 引言

卫星通信、雷达极化测量、电子侦察和电子对抗等许多实际应用中往往希望天线具有极化捷变的功能. Dauguet等<sup>[1]</sup>报导了一种有极化捷变功能的天线, 它利用一个双边馈的方形贴片天线与一个有源分支电桥相集成, 通过改变每个双栅场效应管的直流偏压, 实现极化捷变. P. M. Haskins等<sup>[2]</sup>则在方形贴片中心线上加载变容二极管实现极化捷变. 本课题组研制了另一种极化捷变微带天线<sup>[3]</sup>, 它利用PIN二极管实现电控数字步进移相, 从而实现从线极化到圆极化的捷变, 且可灵活选择旋向.

上述极化捷变有源天线都是采用微带贴片单元, 因而都是低增益的. 具有极化捷变功能的微带天线阵, 至今国际上很少有报导. P. M. Haskins等给出了一种四单元的极化捷变微带天线阵列<sup>[4]</sup>, 每个贴片用四个变容管分别加载于四边. 控制变

容管的偏压可使阵列形成不同极化. 由于该四元阵中共用了16个变容管加载, 加之射频通路、直流偏置电路和偏压控制电路等, 使结构非常复杂. 他们还研究了用两个三极管加载于方形贴片二相邻边来实现极化捷变的三元阵, 共用了6只管, 最大辐射方向的轴比2dB<sup>[5]</sup>. 本文提出一种新的极化捷变微带天线阵的设计, 它利用单一电控相移电路和一副双极化天线面阵来实现. 这样就克服了微带天线阵本身不便变极化的缺陷, 而能象反射面天线中控制馈源来变极化那样简单. 同时只需加单一低噪声放大器来形成极化捷变的放大器型有源阵列. 但该方案对双极化阵列的设计有非常严格的要求, 必须保证整个阵列中每个天线单元的两个端口接收到完全等幅、同相的信号, 且具有较高的隔离度和较低的交叉极化等. 对此类阵, 目前也未见国际上报导. 下面依次介绍这种双极化阵列的设计及有源电路的设计和实验结果.

## 2 双极化微带天线阵及其方向图

为便于制造和降低造价,采用单层薄基片上的双极化单元来构成面阵.单元的常规设计是在方形贴片二相邻边的中点分别馈电,使形成极化正交的  $TM_{10}$  和  $TM_{01}$  模.交叉极化电平为  $-20\text{dB}$  量级<sup>[4]</sup>.我们采用,在方形贴片二相邻角端分别馈电的 16 元双极化角馈方形贴片阵,如图 1 所示,其中  $V$  和  $H$  分别表示垂直极化和水平极化馈电端.该二端至各贴片的馈电网络设计得完全对称;串馈的相邻贴片间用

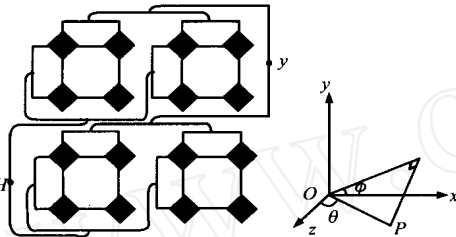


图 1 16 元双极化微带天线阵及坐标系

高特性阻抗、长半波长的微带线相连,使形成  $4 \times 4$  元等幅同相均匀面阵.并将多个直角弯头用圆弧弯头代替,以减小寄生辐射;用四分之一波长变换器实现阻抗匹配.为使 LNA 的阻抗匹配网络简化,并便于无源阵与有源阵的实测结果相比较,阵列  $V$  端和  $H$  端的输入阻抗都取为  $50 \Omega$ .我们采用厚  $0.8\text{mm}$  的国产双面覆铜板来试制该 16 元阵.

由于贴片厚度远小于工作波长,可根据腔模理论得出天线元在远场点  $(R, \theta, \phi)$  所产生的辐射场<sup>[6]</sup>.由于角馈方形贴片中形成两个等幅同相的正交极化模  $TM_{10}$  和  $TM_{01}$ ,它在  $z$  轴上的合成辐射场是二者的迭加,其极化沿贴片对角线方向.阵元间距为  $d$  的  $M \times M$  元天线阵的辐射方向图可根据方向图乘积定理得出.对垂直极化情况 ( $V$  端),  $E$  面 ( $\phi = 90^\circ$ ) 和  $H$  面 ( $\phi = 0^\circ$ ) 方向图函数为

$$F_E(\theta) = j_0^2(u) \left(1 + \frac{u^2}{u^2 - 2}\right) \frac{\sin(M d \sin \theta / \lambda)}{M \sin(d \sin \theta / \lambda)} \quad (1)$$

$$F_H(\theta) = j_0^2(u) \left(1 + \frac{u^2}{u^2 - 2}\right) \cos \frac{\sin(M d \sin \theta / \lambda)}{M \sin(d \sin \theta / \lambda)} \quad (2)$$

式中  $j_0(u) = (\sin u / u)$ ,  $u = \sqrt{2} (a / \lambda) \sin \theta$  (3)

在计算中忽略了高次模和馈线电流的辐射,以及阵元互耦的影响.交叉极化辐射主要来自  $TM_{11}$ 、 $TM_{02}$  和  $TM_{20}$  模,它们在  $E$  面形成的交叉极化场理论上为零,但在  $H$  面偏轴方向的交叉极化场较大.求得  $H$  面交叉极化方向图函数如下:

$$F_{HC}(\theta) = \left| \frac{V_{11}}{V_{01}} \cos^2 \left(\frac{u}{2}\right) \frac{2u}{u^2 - 2} - \frac{2V_{02}}{V_{01}} \sin^2 \left(\frac{u}{2}\right) \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{u^2 - 4}\right) \right| \sin \frac{\sin(M d \sin \theta / \lambda)}{M \sin(d \sin \theta / \lambda)} \quad (4)$$

同理可得水平极化情况主极化和交叉极化方向图.该阵列在  $V$ 、 $H$  端的电压驻波比及隔离度也已用 ENNM(扩展多端网络法)算出<sup>[7,8]</sup>.

## 3 有源电路

所需有源电路由一个专用电控移相器和一个低噪声放大器组成.该移相器通过  $3\text{dB}$  功分器将信号分成两路,一路为基准相位信号,另一路为可控  $0^\circ$  或  $90^\circ$  移相信号,如图 2 所示.我

们采用场效应管 (FET) 来设计一个体积小、重量轻、功耗低的  $90^\circ$  移相器,其工作原理与 PIN 二极管移相器相似. FET 选用 HP Ad13136,通过改变栅极直流电压,产生与另一路(基准相位)的相差,在  $0.0\text{V}$  时相差为  $0^\circ$  或  $180^\circ$ ,在  $2.8\text{V}$  时为  $90^\circ$ .系统性能用 TOUCHSTONE 作优化设计. FET 不仅作为开关元件,而且还作为可控的两态电路元件参加优化.试制的实验移相器,在  $6.0\text{GHz}$  上测得基准相位为  $191^\circ$ ,另一路加  $0.0\text{V}$  电压时相位为  $5^\circ$ ;两路相差约  $186^\circ$ ;而加  $2.8\text{V}$  电压时相位达  $93^\circ$ ,此时两路相差  $98^\circ$ .

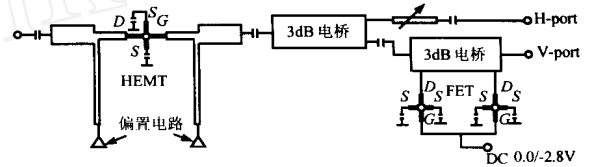


图 2 具有 LNA 的极化捷变有源电路

如图 2 所示, LNA 由一个高电子迁移率晶体管 (HEMT)、输入、输出阻抗匹配电路和偏置电路组成, HEMT 管的源极通过孔接地.该放大器采用低噪声小信号工作.用 TOUCHSTONE 软件包进行系统优化设计,在保证增益要求的同时展宽驻波比带宽.最后得到  $6.0\text{GHz}$  工作频率时的优化值如下:增益  $12\text{dB}$ ,噪声系数  $1.1\text{dB}$ ,  $V_{\text{SWR}} 1.5$  的带宽  $200\text{MHz}$ .

## 4 实验结果

我们首先测试了无源 16 元阵的线极化方向图.实验测得一个平面 ( $\phi = 0^\circ$ ) 的垂直极化方向图如图 3(a) 点划线所示,其主瓣与水平极化情况(从略)相当吻合,说明该阵的设计是成功的.图中也示出了由式 (1) 计算的理论方向图,可见主瓣和第一副瓣的理论值与实测值吻合较好.图中同时给出了此时交叉极化的测试值与理论值,两者大体上也较接近,这说明交叉极化主要是由  $TM_{11}$ 、 $TM_{02}$  和  $TM_{20}$  三个模引起的.由图可见该天线阵在主瓣范围内交叉极化的测量值较低,均约低于  $-36\text{dB}$ .然后加移相器,使  $V$ 、 $H$  端信号间引入  $90^\circ$  相差.实测结果如图 3(b) 所示,可见在主瓣大部分范围内可获得较好的圆极化方向图,其轴比约为  $1\text{dB}$ ,看来比文 [1] 的  $3\text{dB}$  和文 [5] 的  $2\text{dB}$  更好些.

加 LNA 的有源微带天线阵在垂直极化时的方向图如图 3(a) 中的虚线所示,可见连接 LNA 后,实测方向图形状变化较小,只是副瓣相对值略有增加.但其接收电平的  $\text{dB}$  数大大提高了,天线有源增益提高约  $12\text{dB}$ .这就是说,若用无源阵来获得同样的增益,其面积约需目前面阵的 16 倍,可见这对天线小型化的意义很大.

计算和实验测得电压驻波比 (VSWR) 的频率特性如图 4 所示,可以明显看出,引入 LNA 后 VSWR 随频率的变化不再敏感,两个极化端口的  $2:1\text{VSWR}$  带宽变得较宽,计算和实测的两馈电端隔离度的频率特性如图 5 所示,实测值在  $6\text{GHz}$  附近约  $6\%$  频带上均在于  $36\text{dB}$  (最高大于  $50\text{dB}$ ).比较有源与无源实测结果可见, LNA 不仅提高了天线阵的隔离度,而且大大展宽了天线系统的工作频带.这是因为无源贴片阵谐振式阵,

阵源带宽窄,作为其负载的 LNA 有源网络可优化设计,为输出阻抗具有更好的频带特性.

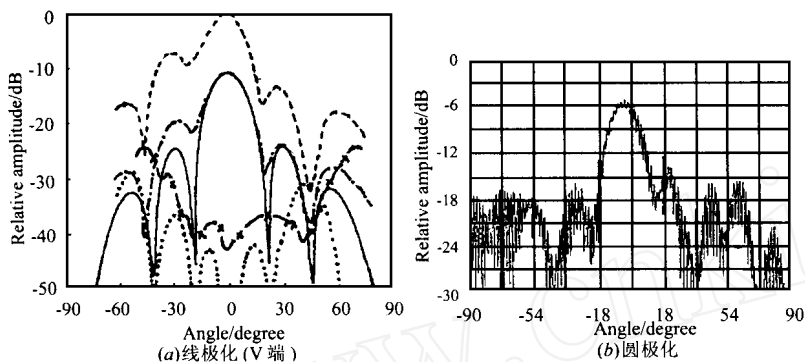


图 3 实测的 16 元阵的线极化和圆极化方向图( $\phi=0$  面)  
 —无源主极化计算值 —·—无源主极化测量值  
 - - - 有源主极化测量值 .....无源交叉极化计算值  
 —\*—无源交叉极化测量值

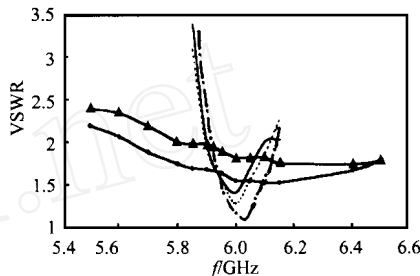


图 4 16 元阵的电压驻波比特性  
 - - - 无源计算值  
 ..无源垂直极化测量值 —无源水平极化测量值  
 有源垂直极化测量值 有源水平极化测量值

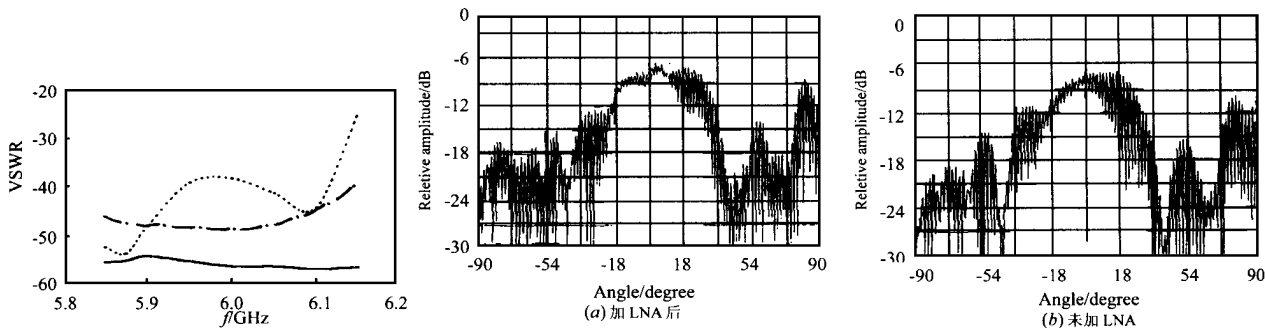


图 5 16 元阵两端口间的隔离度特性  
 - - - 无源计算值 ..无源测量值 —有源测量值

图 6  $2 \times 2$  元有源阵的实测圆极化方向图( $\phi=45$  面)

作为全系统的实验,我们将电控移相器两个输出端分别接在天线阵的极化端 V、H,其输入端再与 LNA 相接,这样便形成 LNA 极化捷变放大器型有源微带天线阵.此实验天线阵未采用图 1 天线,而用  $2 \times 2$  元角馈方形贴片阵,该天线已在文[9]中作了报导;同时改用了设计增益为 14dB 的 LNA.将由 LNA 和移相器组成的极化捷变电路与  $2 \times 2$  元双极化天线阵相连后,实测的圆极化方向图如图 6(a)所示.可见在  $\theta=0$  方向的圆极化轴比约 0.5dB,说明在该方向实现了线圆极化捷变.这样本文建议的对双极化阵列采用单一相移电路来实现极化捷变(由线极化变为圆极化)再次得到了证实.但是由于该天线的两个线极化方向图一致性差,使得偏离  $\theta=0$  方向的轴比较差.这从实验上说明对双极化面阵的设计要求较高.实验是在被测天线作接收时测的,在  $\theta=0$  点的电平为 -49.2dBm,当断开 LNA 的连接,测得方向图如图 6(b)所示.该天线在  $\theta=0$  的接收功率电平为 -63.2dBm,说明 LNA 使天线在  $\theta=0$  方向增益提高了 14dB.比较图(a)和图(b)可见,LNA 在提高有源天线阵增益的同时,也对圆极化方向图有所影响.

### 5 结论

本文首先给出一副具有低交叉极化和高隔离度的新颖

16 元双极化微带天线面阵的设计,并分析了其共极化和交叉极化方向图.实验表明,所设计的 16 元双极化阵能获得主瓣范围内相当一致的双极化方向图,且交叉极化电平低于 -36dB,双输入端口间隔离度高于 36dB.提出一种切实可行的极化捷变 LNA 有源电路,有源电路的移相器 LNA 和都用 TOUCHSTONE 软件进行了系统优化设计.加 LNA 后不仅使天线增益提高 12 - 14dB,并使 VSWR 带宽展宽,隔离度大于 50dB.电控 90 移相器使 16 元  $2 \times 2$  元有源微带天线阵在轴向分别获得轴比为 1dB 和 0.5dB 的圆极化,证实了在馈电端电控单一有源电路可实现整个微带天线阵由线极化到圆极化的极化捷变.这些移相器和 LNA 有源器件的引入,根据本文的方案只需一套,却大大扩展了天线的功能和应用,既使天线可方便地接收线或圆极化波,又使接收天线对给定的增益要求作到小型化.该原理可推广于更大尺寸的阵或小阵;利用文[3]中介绍的电控双路平衡移相器的设计原理,还可实现四种极化(正交线极化和左、右旋圆极化)间的捷变.

### 作者简介:

钟顺时 (见本期第 787 页)

(下转第 791 页)

模拟了高斯脉冲信号入射空气- $N$  阶色散媒质分界面的电磁波瞬态传播情况,研究表明采用这种基于 DSP 技术的 FDTD 算法能够很好地模拟色散媒质中瞬态电磁波的传播特性,为色散媒质时域电磁场分析提供了新思路。

#### 参考文献:

- [ 1 ] K S Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [ J ]. IEEE Trans. AP, 1996, 14(5) :302 - 307.
- [ 2 ] K L Shlager and J B Schneider. A selective survey of the finite-difference time-domain literature [ J ]. IEEE. AP. Mag, 1995, 37(8) :39 - 57.
- [ 3 ] R Luebbers, F P Hunsberger. FDTD for Nth-Order Dispersive Media [ J ]. IEEE Trans. AP, 1992, 40:1297 - 1301.
- [ 4 ] R Luebbers, F P Hunsberger, K S Kunz, et al. A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for dispersive materials [ J ]. IEEE Trans. EMC, 1990, 32:222 - 227.
- [ 5 ] D M Sullivan. Frequency-dependent FDTD methods using z transforms [ J ]. IEEE. Trans. AP, 1992, 40(8) :1223 - 1230.
- [ 6 ] Benqin Gao, et al. A FDTD method for dispersive media [ J ]. Sin. China, 1994, 24 :538 - 545.
- [ 7 ] W H Weedon. A general method for FDTD modeling of wave propagation in arbitrary frequency-dispersive media [ J ]. IEEE. Trans. AP, 1997, 45(3) :401 - 409.
- [ 8 ] 汪彤等.采用 DSP 技术的色散媒质 FDTD 方法 [ J ]. 中国学术期刊文摘,1999,5(12) :1556 - 1558.
- [ 9 ] 张文俊等.  $N$  阶色散媒质的瞬态散射特性 [ J ]. 微波学报,1996, 12:9 - 14.
- [ 10 ] G Mur. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations [ J ]. IEEE Trans. EMC, 1981, 23 :377 - 382.

#### 作者简介:



汪 彤 女. 1968 年 8 月出生于江西, 1990 年毕业于华东师范大学电子科学技术系, 同年直升就读于本系研究生. 1993 年获硕士学位后分配至上海大学通信学院工作, 97 年 9 月开始攻读博士学位. 先后作为主研人员承担并完成国家自然科学基金、上海市自然科学基金及部委等多项科研项目. 主要研究领域: 电磁场数值计算方法、瞬变电磁场、电磁兼容等.

张文俊 男. 1959 年 11 月生于上海. 教授, 博士生导师, 1978 年考入复旦大学, 1979 年由国家教委公派赴贝尔格莱德大学工学院学习, 并于 1989 年获博士学位. 回国后先后负责承担多项国家自然科学基金、上海市自然科学基金及部委项目, 主要研究领域: 电磁场数值计算方法、瞬变电磁场、光纤技术、数字通信等.

(上接第 784 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] Dauguet, et al. Microstrip antenna with polarization switching [ J ]. Microw. Opt. Tech. Lett. Jan. 1994, 7(1) :36 - 40.
- [ 2 ] P M Haskins and J S Dahele. Varactor-diode loaded passive polarization-agile patch antenna [ J ]. Electron. Lett. , Apr. 1994, 30(13) :1074 - 1075.
- [ 3 ] S S Zhong, J Liu, and M Ahmed. Polarization-agile microstrip antenna with phase shifters [ C ]. JINA '98, Nice, 1998 :738 - 741.
- [ 4 ] P M Haskins and J S Dahele. Four-element varactor diode loaded polarization-agile microstrip antenna array [ J ], Electron. Lett. , July 1997, 33(14) :1186 - 1187.
- [ 5 ] P M Haskins and J S Dahele. Polarization agile active microstrip patch arrays [ J ]. Electron. Lett. , March 1996, 32(6) :509 - 511.
- [ 6 ] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [ M ]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1991 :18 - 31.
- [ 7 ] S C Gao and S S Zhong. Dual-polarized microstrip antenna array with high isolation fed by coplanar network [ J ]. Microw. Opt. Tech. Lett. , Oct. 1998, 19(3) :214 - 216.
- [ 8 ] 高式昌. 用于有源集成的微带天线单元与双极化阵列 [ D ]. 上海大学博士学位论文, 1999, 4:67 - 68.
- [ 9 ] 高式昌, 钟顺时. 并行角馈双极化微带天线阵的分析与设计 [ J ]. 电子科学学刊, 1999, 21(4) :529 - 534.