

文章编号:1001-9014(2011)05-0425-04

# 毫米波矢量调制器及其在有源相控阵天线中的应用

韩克武<sup>1,2</sup>, 杨明辉<sup>1</sup>, 孙芸<sup>1</sup>, 李凌云<sup>1</sup>, 侯阳<sup>1,2</sup>, 孙晓玮<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 矢量调制器芯片作为一种可以同时对待波进行相位和幅度调制的新型电路, 能够替代传统的数字移相器和数字衰减器用在有源相控阵系统中. 先设计了一款工作在 Ka 波段毫米波单片矢量调制器, 在片测试结果显示可以实现  $-12 \sim -40$  dB 的幅度调制与  $360^\circ$  的相位调制. 然后设计了一个 Ka 波段  $1 \times 8$  阵有源相控阵天线, 改变矢量调制器的控制电压, 成功实现了波束扫描功能, 验证了基于矢量调制技术的有源相控阵的可行性.

**关键词:** 毫米波; 单片集成电路; 矢量调制器; 有源相控阵

中图分类号: TN928 文献标识码: A

## Millimeter-wave vector modulator and its application in active phased array antenna

HAN Ke-Wu<sup>1,2</sup>, YANG Ming-Hui<sup>1</sup>, SUN Yun<sup>1</sup>, LI Ling-Yun<sup>1</sup>, HOU Yang<sup>1,2</sup>, SUN Xiao-Wei<sup>1\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;  
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Vector modulator can be employed in active phased array antenna (APAA) as a replacement of conventional digital phase shifter and attenuator for its capability of simultaneously realizing millimeter-wave direct carrier modulation on phase and amplitude. A millimeter wave vector modulator was realized with advanced GaAs pHEMT process, and onchip measurement has shown that  $-12 \sim -40$  dB amplitude modulation and  $360^\circ$  phase modulation was achieved. A Ka band  $1 \times 8$  array experimental APAA composed of vector modulators was designed and proved to steer the beam scanning effectively. It was demonstrated that APAA based on vector modulation technique is feasible.

**Key words:** millimeter wave; monolithic integrated circuit; vector modulator; active phased array antenna

PACS: 84.40. Ba

### 引言

在许多先进的毫米波通信和雷达系统中, 精确的相位和幅度调制是最关键的技术之一<sup>[1-2]</sup>. 在通信系统中, 往往都是对基带信号进行调制后, 上变频到毫米波载波进行无线传输; 而在一些需要直接对毫米波载波进行调制的雷达系统中, 往往采用昂贵的毫米波数字移相器和数字衰减器, 其精度受控制位数限制. 为了简化直接载波调制系统, 矢量调制器 (Vector Modulator) 的概念最早于 1988 年提出<sup>[3]</sup>, 它的基本原理如图 1 所示, 将输入信号正交等分成 I, Q 两路信号, 然后分别对两路信号进行调幅, 最后再

经过同相合成得到输出信号. 根据矢量相加原理, 可以通过简单的调幅模块实现对信号的幅度相位联合调制.

毫米波天线系统, 特别是毫米波有源相控阵天线系统是近年来国内外天线技术研究的一个热门领域<sup>[4-5]</sup>. 随着工作频率的升高, 天线阵单元间距变得越来越小, 对相控阵组件的尺寸和装配提出了更高的要求. 矢量调制技术的应用, 使得可以用一块矢量调制芯片替代传统的数字移相器和数字衰减器两块芯片, 大大减少组件的尺寸, 并且同时提高调幅和调相的灵活性. 矢量调制技术在毫米波段发挥了一定的优势, 有利于将有源相控阵天线做到小型化和

收稿日期: 2010-06-21, 修回日期: 2010-12-14

Received date: 2010-06-21, revised date: 2010-12-14

基金项目: 973 计划 (2009CB320207); 国家自然科学基金 (60771058); 上海集成电路技术与产业促进中心 (10706200201); 国家基础科研计划 (A1320080002)

作者简介: 韩克武 (1986-), 男, 江苏淮安人, 博士研究生, 主要研究领域为毫米波系统集成和芯片设计. E-mail: hankewu@mail.sim.ac.cn.

\* 通讯作者: E-mail: xwsun@mail.sim.ac.cn.

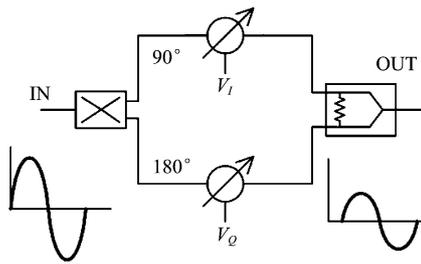


图1 矢量调制器原理图

Fig. 1 Diagram of the vector modulator

低成本.

## 1 单片矢量调制器设计与离散性分析

### 1.1 单片矢量调制器原理

矢量调制器采用正交矢量调制技术,它的基本结构主要由3部分组成:Lange耦合器、幅度调制器、Wilkinson同相合路器.假设输入的是一个单位幅度,初始相位为0,频率为 $\omega$ 的正弦波信号,则输出信号 $A_{sum}$ 可表示为:

$$A_{sum} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} (S_{I21} + jS_{Q21}) e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (1)$$

其中,系数 $1/\sqrt{2}$ 是由Lange耦合器引入的, $S_{I21}$ 、 $S_{Q21}$ 分别是两路幅度调制器的传输系数, $\varphi$ 是附加相移.矢量调制器的插入损耗和相移可由下式给出:

$$IL = -6 + 20 \log \left| \sqrt{|S_{I21}|^2 + |S_{Q21}|^2} \right| \quad (2)$$

$$\theta = \varphi + \tan^{-1} \frac{S_{Q21}}{S_{I21}} \quad (3)$$

理论上,无源幅度调制器的传输系数可以从-1变化到1,可见矢量调制器在理想的情况下具有-3dB的固有最小插损和-6dB的最小全向插损.

### 1.2 设计与测试

Lange耦合器的特征阻抗以及pHEMT管芯的总栅宽是影响单片矢量调制器性能的主要因素<sup>[6]</sup>,选取合适的设计参数,可以降低矢量调制器的插损和幅度相位不一致性.经过参数优化,获得了一组最优的参数作为设计准则,其中Lange耦合器的特征阻抗经优化后是40欧姆,pHEMT管芯的总栅宽是70  $\mu\text{m}$ .

利用0.15  $\mu\text{m}$  GaAs pHEMT工艺流片,设计了一款Ka波段单片矢量调制器,显微镜照片如图2所示.

在35 GHz频率点测试矢量调制器芯片的幅度调制特性和相位调制特性,如图3、4所示.其中X、Y轴分别为I、Q两路控制电压,单位步进为10 mV,Z

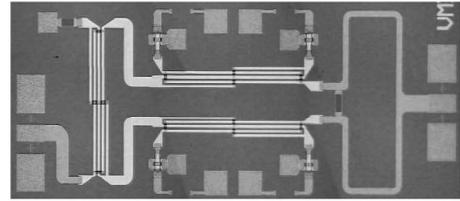


图2 Ka波段单片矢量调制器显微镜照片

Fig. 2 Microphotograph of the Ka band vector modulator

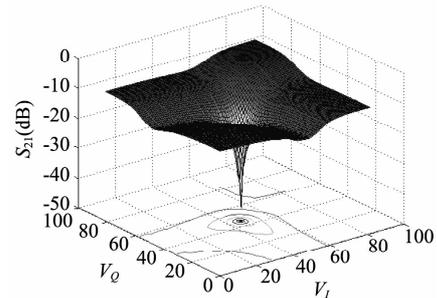


图3 Ka波段反射式矢量调制器的幅度调制特性

Fig. 3 AM performance of the vector modulator

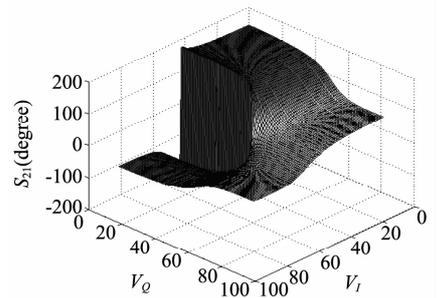


图4 Ka波段反射式矢量调制器的相位调制特性

Fig. 4 PH performance of the vector modulator

轴表示插损,单位为dB(相位,单位为度).由图3可以明显看到矢量调制器的幅度调制的性能,最小插损可以达到5 dB,最大插损可以达到40 dB.由图4可以看出,矢量调制器芯片可以实现 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 全向的相位调制.联合图3和图4,可以通过改变I、Q两路控制电压,利用矢量调制器芯片实现不同的幅度和相位调制.

### 1.3 离散性分析

对于有源相控阵天线来说,各个通道之间电性能的一致性尤为重要,因为理论上,各个通道间的误差会破坏天线的辐射特性.单片矢量调制器作为有源相控阵T/R组件中的调制器,其调相和调幅的离散特性对天线的方向图影响很大.如果不对这种离散特性加以分析和控制,将导致系统性能的严重恶化.

毫米波单片矢量调制器离散特性主要由 Wilkinson 功分器、Lange 耦合器以及 cold-pHEMT 管的离散型共同决定的,但是前两者影响较小,主要分析 cold-pHEMT 管的离散性。

为了简化分析,假设 cold-pHEMT 是一个理想的变阻器件,寄生参数都可以忽略不计,变阻特性主要由源漏电阻  $R_{ds}$  决定. 反射式衰减器离散特性与源漏电阻  $R_{ds}$  离散性的关系,即由  $R_{ds}$  误差所导致  $S_{21}$  的变化量,如下式所示。

$$d|S_{21}| = \frac{d|S_{21}|}{dR_{ds}} dR_{ds} = -\frac{2Z}{(R_{ds} - Z)^2} dR_{ds} \quad (7)$$

根据工艺线给出的数据,估算  $R_{ds}$  相对离散值约为 10%。代入公式 7,得到

$$d|S_{21}| = -0.2 \frac{R_{ds}Z}{(R_{ds} - Z)^2} \quad (8)$$

该式表明,当  $R_{ds}$  趋于 0 或者无穷大时,即管芯处于打开或者截止状态时,反射式衰减器的一致性非常好,受  $R_{ds}$  离散型影响较小. 当  $R_{ds}$  趋于 Lange 耦合器特征阻抗时,一致性最差,即使  $R_{ds}$  有微小的变化,反射式衰减器的离散型也趋于无穷大. 下图 5 显示了两片单片反射式矢量调制器在不同偏置电压下的误差,可以看出,在中心区域,即 cold-pHEMT 的阻抗近似为  $Z$  时,两片矢量调制器的离散度非常大. 这个结论可以指导矢量调制器的使用,尽量避免让矢量调制器工作在这个离散性较大的区域,这个区域也是矢量调制器衰减极大的区域。

## 2 Ka 波段 1 × 8 阵有源相控阵天线设计与测试

当工作频率进入到毫米波段时,传统的数字移相器设计过程变得复杂,数字衰减器的一致性较差,并且数字控制电路复杂,导致芯片面积过大. 矢量调制器可以同时实现对幅度和相位的联合调制,仅用

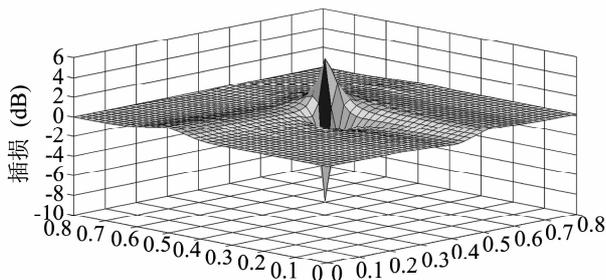


图 5 两片矢量调制器在不同偏置下的调幅离散度  
Fig. 5 AM dispersion of two vector modulators on different bias voltages

一块矢量调制器芯片就可以取代传统的数字移相器和数字衰减器两块芯片. 大大减小了芯片占用面积,有利于相控阵系统的微型化和小型化集成. 为了验证基于矢量调制技术有源相控阵的可行性,设计了一个 1 × 8 阵 Ka 波段有源相控阵天线。

### 2.1 Ka 波段 1 × 8 阵有源相控阵天线系统设计

1 × 8 阵有源相控阵由功率分配单元,波束成形单元,功率放大单元,辐射单元组成. 其中功率分配单元采用 1 分 8 功分器,它是由三级 3 dB Wilkinson 功分器级联组成,实现 8 路等幅同相输出. 波束成形单元采用单片矢量调制器,可以同时为每个通道提供 360° 的相位调制和 -12 ~ -40 dB 的幅度调制. 为了简化设计,没有采用多功能收发电路,仅使用了单向的发射放大器. 辐射单元采用贴片式平面微带天线,为了便于天线阵列与前端通道的互连,1 × 8 阵天线阵列是可拆卸的,通过 K 头连接器与发射模块相连。

Ka 波段 1 × 8 阵有源相控阵天线系统原理如图 6 所示. 输入信号经 1 × 8 功分器分成 8 路等幅同相的信号,8 路功分信号由相应通道中的矢量调制器进行调相和调幅,以满足天线阵面形成波束的需要,调制后的 8 路信号在驱动放大器的作用下,放大到足够的发射功率,最后经辐射单元在空间形成指定的波束。

设计的 1 × 8 阵有源相控阵天线是可拆卸的,并且采用了垂直互连结构. 辐射单元与射频前端可以插拔,方便测试与装配,当有故障出现时,也便于拆卸,同时为将来实现插片式 8 × 8 阵有源相控阵天线提供扩展. 射频前端实物如图 7 所示,射频前端的正面放置有源功率分配网络,包括 1 × 8 功分器,单片矢量调制器,驱动放大器,背面放置控制电路板,为

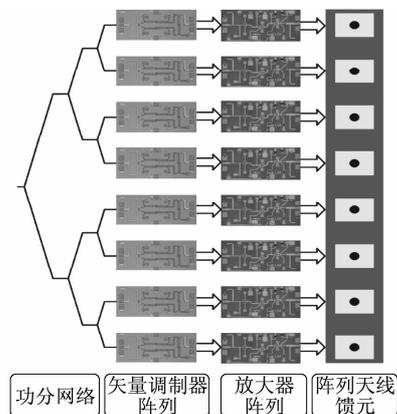


图 6 Ka 波段 1 × 8 阵有源相控阵原理图  
Fig. 6 Diagram of Ka band 1 × 8 array APAA

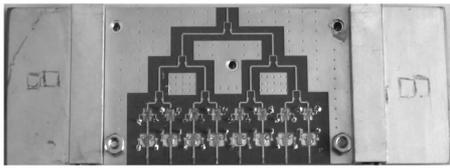


图7 有源相控阵天线射频前端实物图  
Fig.7 Photograph of front end of APAA

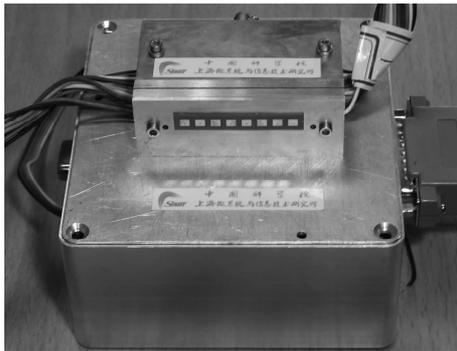


图8 Ka 波段 1×8 阵有源相控阵天线实物图  
Fig.8 Photograph of Ka band 1×8 array APAA

矢量调制器和驱动放大器提供偏置电压,两块电路板由过孔相连。

图8所示是Ka波段1×8阵有源相控阵天线系统实物图,上面放置的模块是射频前端,可以明显看到正面的1×8阵平面微带天线,该相控阵射频前端的几何尺寸为长68 mm×宽45 mm×高25 mm。下面的模块放置的是电源和所有的控制电路。

## 2.2 Ka 波段 1×8 阵有源相控阵天线测试

Ka 波段 1×8 阵有源相控阵天线的远场测试在毫米波暗室中完成,采用了自动测试平台对 E 面和 H 面的方向图进行了测试。自动测试平台如图9所示,由自动转台、网络矢量分析仪、直流稳压电源和控制计算机组成,所有的组件都通过 GPIB 总线连接。待测器件与矢网的 2 端口相连,固定在转台上,标准喇叭天线与矢网 1 端口相连。控制计算机设置矢量调制器的偏置电压,按规则改变有源相控阵每个通道的幅度相位分布,以使通道信号经天线模块辐射后在空间某处形成一特定的方向图。进行完偏置电压设置后,计算机程序自动控制转台的转动,并从矢量网络分析仪中读取数据,在进行一次完整的扫描后绘制出天线远场方向图。

实际测试时,选择了水平方向五个波束指向角度,假设发射天线和接受天线正面相对时角度为 $0^\circ$ ,则五个波束指向角度分别为 $-40^\circ$ , $-30^\circ$ , $0^\circ$ , $30^\circ$ , $40^\circ$ 。图10所示的是实际测试得到的五个波束

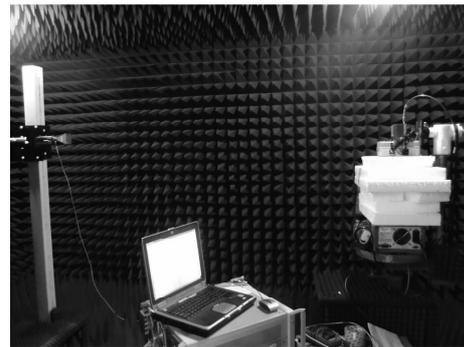


图9 毫米波天线自动测试平台  
Fig.9 Test setup of ATE(Automatic Test Equipments)

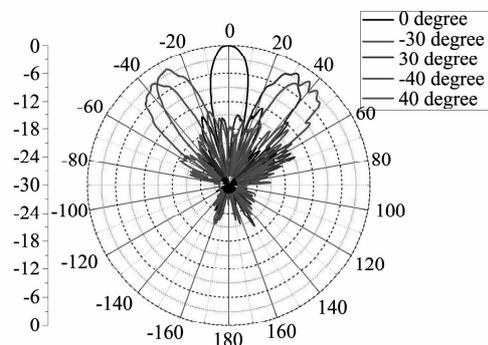


图10 Ka 波段 1×8 阵有源相控阵天线扫描辐射图测试结果  
Fig.10 Far field radiation pattern of Ka band 1×8 array APAA

的方向图,和预先要求扫描的波束指向基本吻合,副瓣在 $0^\circ$ 扫描时低于12 dB,在 $30^\circ$ 和 $40^\circ$ 扫描时低于10 dB,3 dB 波瓣宽度小于 $15^\circ$ 。

## 3 结语

为了验证矢量调制技术在有源相控阵中的可行性和可靠性,简化设计了一个只含有发射支路的Ka波段1×8阵有源相控阵天线,改变矢量调制器的偏置电压,实现了相控阵的波束扫描功能。测试结果验证了基于矢量调制技术的有源相控阵体制是可行的,并且为下一步8×8阵有源相控阵打下基础。

## REFERENCES

- [1] Lucyszyn S, Sewell T, Robertson I D. Multi-level digital modulation performed directly at carrier frequency[C]. 25th European Microwave Conf., 1995, vol. 2:673 - 676.
- [2] Devlin L M, Minnis B J. A versatile vector modulator design for MMIC [C]. 1990 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1990, vol. 1:519 - 521.
- [3] Tuckman M, I-Q vector modulator-The ideal control component[J]. *Microwave Systems News*, May1988, 105 - 115.

(下转 474 页)

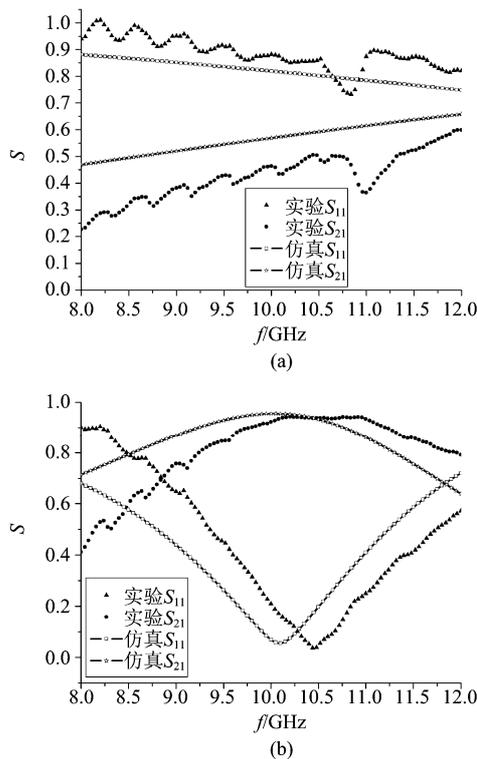


图9 (a)样品一的仿真及测试结果 (b)样品二的仿真及测试结果

Fig.9 (a)The simulation and experiment results of Sample 1 (b)the simulation and experiment results of Sample 2

数成正比,当介电常数降低时分布电容必然减小,使得 Lorentz 谐振频率有所上升,导致透射峰向高频偏移.

#### 4 结语

基于等效介质理论提出了一种使用超材料构建 FSS 的方法,这种方法使用长金属线及电谐振结构单元的组合周期排布实现.在 FR4 基板上构建了一维单面 FSS 单元对这种方法进行验证,得到的传输及反射曲线表明这种方法可以实现良好的频率选通特性.在一维 FSS 单元的基础上拓展得到了一种宽入射角极化无关 FSS,仿真及实验结果说明电谐振和金属阵列结合的方式设计 FSS 是一种合理可行的

方法.这种方法避免了常规 FSS 设计所涉及的复杂计算,且从构成 FSS 的材料出发进行设计,具有清晰的物理意义,同时还可充分借鉴目前不断发展成熟的超材料等效介质理论,对设计结构简单、相对尺寸更小、频带可调、多通带的 FSS 都具有参考价值.

#### REFERENCES

- [1] Ferrari J A, Perciante C D. superlenses, metamaterials, and negative refraction[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*,2009,**26**(1):78-84.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006,**314**:977-979.
- [3] Shen Nian-Hai, Kafesaki M, Koschny T, *et al.* Broadband Blueshift Tunable Metamaterials and Dual-band Switches [J]. *Phys. Rev. B*,2009,**79**:161102.
- [4] Fang Wei-Hai, Xu Shang-Jia. New Frequency Selective Surface Composed of Left-handed Materials[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (方维海,徐善驾.由左手媒质构成的新的频率选择表面. *红外与毫米波学报*),2007,**26**(2):121-124.
- [5] Thomas H Hand, Jonah Gollub, Soji Sajuyigbe, *et al.* Characterization of Complementary Electric Field Coupled Resonant Surfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 212504.
- [6] Cheng Qiang, Liu Ruo-Peng, Mock J J, *et al.* Partial Focusing by Indefinite Complementary Metamaterials [J]. *Phys. Rev. B*,2008,**78**:121102.
- [7] Falcone F, Lopetegui T, Laso M, *et al.* Babinet Principle Applied to the Design of Metasurfaces and Metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(19):197401.
- [8] Pendry J B, Holden A J, Robins D J, *et al.* Low Frequency Plasmons in Thin Wire Structures [J]. *Jour. Phys.*, 1998, **10**:4785.
- [9] Schurig D, Mock J J, and Smith D R. Electric-field-Coupled Resonators for Negative Permittivity Metamaterials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**:041109.
- [10] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, *et al.* Electrically Resonant Terahertz Metamaterials: Theoretical and Experimental Investigations [J]. *Phys. Rev. B*,2007,**75**: 041102.
- [11] Smith D R, Schultz S, Markos P, *et al.* Determination of Effective Permittivity and Permeability of Metamaterial from Reflection and Transmission Coefficients [J]. *Phys. Rev. B*,2002,**65**:195104.
- [12] Kamal Sarabandi, Nader Behdad, A Frequency Selective Surface with Miniaturized Elements [J]. *IEEE trans. Antennas Propag.*, 2007,**55**(5):1239-1245.

(上接 428 页)

- [4] Greda L A, Elmarissi W, Heckler M V T, *et al.* An active phased array for mobile satellite communication at Ka-band in LTCC technology: [C] in Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009.
- [5] Huang J, Rascoe D, Riley A L, *et al.* A Ka-band MMIC phased array antenna [C]: in Antennas and Propagation So-

ciety International Symposium, 1989.

- [6] Yang Hou, Lingyun Li, Rrong Qian, *et al.* An efficient technique for designing high-performance millimeter-wave vector modulators with low temperature drift [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 2008, **56**(12):3100-3107.