2019 年 4 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

#### 文章编号: 2095-4980(2019)02-0252-06

# Ka 频段八波束接收组件的设计与实现

石海然,张 涛,薛 欣,张 橹,范占春

(北京空间飞行器总体设计部 电子信息事业部, 北京 100094)

摘 要:介绍了一种Ka频段八波束接收组件的设计方法和关键技术。为实现八波束及1.6 GHz 瞬时带宽的要求,在接收组件中集成了实时延时芯片,并提出了射频组件三维垂直互联与射频信 号交叉传输的方法,同时采用多芯片组装技术、多功能芯片技术等高密度集成方法实现组件装配。 研制的接收组件具有高集成度,噪声系数等关键指标在10 dB的数控衰减下小于3.5 dB,较传统组 件在尺寸、质量及波束数量上具有较大优势。

关键词:八波束;Ka频段;接收组件;垂直互联;交叉传输;高密度装配
中图分类号:TN821<sup>+</sup>.1
文献标志码:A
doi:10.11805/TKYDA201902.0252

## Design of a Ka band 8 beams receiver module

SHI Hairan, ZHANG Tao, XUE Xin, ZHANG Lu, FAN Zhanchun

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Department of Electronic and Information System, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Design method and key technologies of a Ka band with high integration receiver module are given. In order to meet the requirement of more than 1.6 GHz instantaneous bandwidth in Ka band, true time-delay chip is integrated in the module. According to the requirement of 8 beams, a method of vertical interconnection and Radio Frequency(RF) cross technology is proposed, and the Multi-Functional Chip(MFC) technique and Multi-Chip Module(MCM) technique are also adopted to increase the integration level. Finally, a receiver module with 16 channels(8 beams) is developed successfully and NF of the module is less than 3.5 dB in the case of 10 dB attenuation. The receiver module features high integration level. It has more advantages on the size, weight and the number of beams than the conventional module.

**Keywords:** 8 beams; Ka band; receiver module; vertical interconnection; RF cross; high density assembly

宽带和多波束是未来相控阵雷达天线发展的重要方向<sup>[1]</sup>。宽带应用中孔径渡越效应在雷达宽带和宽角扫描中 会影响波束合成的质量<sup>[2]</sup>,多波束应用则需要解决组件高密度集成及不同波束的射频信号交叉传输。

相控阵天线所允许的最大瞬时信号带宽,除受天线波束最大指向偏移的限制外,还受天线孔径渡越时间限制。 要获得大的瞬时带宽,需在阵列各单元或各子阵天线级别采用实时延时线和移相器,即大于1个波长的延时量用 实时延时线进行补偿,小于一个波长的延时量用移相器补偿。

本文通过在接收组件中集成实时延时芯片,用以满足天线 1.6 GHz 瞬时带宽的要求,通过射频组件三维垂直 互联与射频信号交叉传输的方法,实现八波束组件的高密度集成。该接收组件同时满足了相控阵雷达天线宽带和 多波束的需求。

#### 1 组件方案设计

设天线扫描角度为  $θ_{\rm B}$ ,相控阵天线口径为 *L*, *c* 为光传播速度,采用长度为 *l* 的实时延时线后,瞬时信号带 宽 Δ*f* 所受限制为:

$$\Delta f \leq \frac{1}{10} \times \frac{c}{(L\sin\theta_{\rm B} - l)} \tag{1}$$

根据式(1),为实现±8°的角度扫描及 1.6 GHz 的瞬时带宽,需要采用长度至少为 6 个波长的实时延时线。传统光纤的延时线体积较大,数控延时芯片利于实现组件的小型化。6 个波长的实时延时线需采用延时步进 33 ps,3 位数控延时芯片。文献[3]中介绍了一种基于 0.25 μm SiGe 工艺 Ka 频段具有增益补偿功能的实时延时接收前端,但其最大延时量 22 ps,无法适用于天线宽口径大角度扫描的情况。

高集成度的组件设计,采用共享供电和控制信号,将多个通道封装在一个组件内可节约低频接插件的数量。 根据相控阵天线扫描角度的要求,阵元间距不能超过 15 mm,需要在 30 mm(对应 2 个阵元)内集成 16 个通道 (8 个波束)。组件设计提出双面布局,每面集成 4 个波束,双面实现 8 个波束的方案,且组件内集成了延时芯片, 公开文献中未见相关报道,集成难度大于文献[4]中 60 mm × 80 mm × 4.8 mm 尺寸下 16 个通道。

图 1 给出了接收组件的原理框图。从 辐射单元 A 和 B 接收到的信号经过低噪声 放大后分为 2 路:一路通过正反面的垂直 互联穿到组件背面传输;另一路被功分成 4 路,每一路对应一个波束。随后信号通过 移相和衰减器实现对信号幅度和相位的控 制。此后,从辐射单元 A 和 B 接收到信号 分别被合成,从而形成 4 个不同的波束。 同理背面形成了另外 4 个波束。为实现组 件正反面的射频信号连接,需要组件正反 面实现垂直互联。同时延时芯片组件内的 集成,导致组件内每一面至少存在 3 处射 频交叉,需要合理设计以保证交叉传输的 信号有足够的隔离度及传输指标。



Fig.1 Block diagram of an 8 beams receiver module 图 1 八波束接收组件原理框图

辐射单元接收到的信号经过低噪声放大后至少功分成 8 路信号,在传输路径上有很大的功分损耗。同时考虑 到延时芯片约 20 dB 的插损,在链路上需进行合理的增益补偿。组件正反面垂直互联及射频交叉传输的设计具有 较小的插损,以确保在接收通道既能保证噪声系数在数控大衰减状态下 3.5 dB 的指标要求,又具有接收大信号 的能力。

#### 2 垂直互联设计

#### 2.1 组件正反面间低损耗垂直互联

为实现组件正反面间的射频信号传输,需要采用垂直互联结构。由于垂直互联位于组件射频信号传输前端, 低损耗的垂直互联有利于降低组件的噪声系数<sup>[5]</sup>。

绝缘子、毛纽扣、SMP(Sub Miniature version P)盲插座、球栅阵列(Ball Grid Array, BGA)、表贴等方式是实现不同层之间射频垂直互联的主要方式。采用 BGA、毛纽扣的垂直互联方式通常尺寸较小,但其对装配要求较高,并且装配成本较高。表贴式及 SMP/mini-SMP 的垂直互联虽成本低,但其尺寸较大,与小型化的要求不符。对于采用微带焊接的射频馈电形式,绝缘子方式同时具有较小的插损与连接尺寸优势<sup>[6]</sup>,成为设计首选。

组件正反面间的垂直互联结构中上层是微波板、中间层是绝缘 子、下层是微波辐射单元。绝缘子的中心导体两端分别焊接到辐射单 元和微波板<sup>[7]</sup>。

此互联结构中,由于存在微波传输的不连续,将会引起电磁辐射 从而增加电路的传输损耗。在 Ka 频段,绝缘子的使用导致微波信号 传输不连续,其作用相当于引入一段电感。在垂直互联结构中可通过 增加补偿电容抵消其影响,从而达到改善微波信号的传输特性<sup>[8]</sup>。在 互联结构中增加环形微带线等效引入补偿电容,通过调整环形微带的 半径可调整补偿电容值<sup>[9]</sup>。

图2为微带线与绝缘子的连接方式示意图,特征阻抗为50 Ω的微带线宽度为W,半径为R<sub>1</sub>的环形微带线为补偿电容。为反映绝缘子焊接焊锡的影响,在电磁场仿真软件HFSS建立的模型中增加圆锥形焊





Fig.2 Connection between insulator and microstrip 图 2 绝缘子与微带连接方式

1.21

1.19

1.17

1.14

1.13

20

24

28

f/GHz

32

VSWR/dB

第17卷

锡。在HFSS中通过优化相关参数, 并充分考虑加工、装配误差以及工 艺实现合理性,得到采用绝缘子的 垂直过渡结构的仿真结果如图3所 示。由仿真结果可知,绝缘子垂直 过渡结构中电压驻波比小于1.25, 插损优于0.2 dB。

#### 2.2 射频信号交叉传输

为满足交叉传输信号对移相

Fig.3 Vertical interconnection simulation results 图 3 绝缘子垂直互联仿真结果

36

-0.12

-0.13

-0.14

-0.15

-0.16

20

nsertion loss/dB

精确度和移相寄生调幅的影响,接收组件射频信号垂直传输需要 35 dB 的隔离要求<sup>[10]</sup>。空气桥技术可以实现射频垂直互联的小型化。

采用空气桥技术的射频垂直互联结构如图 4 所示。交叉结构采 用共面波导传输线进行传输,中间进行射频信号的传输,两边为共 面波导的地平面。上下两层相互垂直的共面波导实现射频信号的交 叉传输。为增加交叉传输信号的隔离度,共面波导需尽量实现空间 上较大的间隔。共面波导的地平面也采用空气桥进行连接。通过减 少共面波导地平面到地平面的间距,可以减少共面波导传输线间的 耦合,同时更短的空气桥也可增加其制造难度提高可靠性<sup>[11]</sup>。

基于空气桥技术的射频交叉传输芯片的测试结果如图 5 所示。 其插入损耗小于 0.1 dB, 驻波系数优于 1.2, 然而隔离度最小只有 19.5 dB, 尚不能满足目前组件隔离度的要求。



Fig.5 Test results of RF cross chip 图 5 采用空气桥的射频交叉传输芯片测试结果

尽管与空气桥芯片交叉传输相比尺寸很大,但垂直 过孔可通过信号在不同层间的垂直传输,轻易实现交叉 传输信号隔离度的要求。如图6所示,垂直过孔结构在 多层介质板上通过共面波导到带状线的转换实现射频 信号交叉传输<sup>[12-13]</sup>。

该结构可以分为3部分:第1部分为共面波导到同 轴结构的过渡;第2部分是同轴传输结构;第3部分为 同轴至带状线的过渡。

第1部分包含了共面波导传输线,共面波导与垂直 过孔的连接盘,以及避免射频过孔与共面波导地平面短 路的回避盘。



共面波导中存在寄生模,可引起微波传输性能恶化。在基板上增加高密度的接地孔,通过对共面波导上下地 平面进行有效的连接,可有效抑制寄生模<sup>[14]</sup>。共面波导的连接盘具有电容效应。小的共面波导盘(*R\_cpw*)通过金 属过孔与地平面更弱的耦合降低电容效应。由于更长的电流回路,随着回避盘(*R\_anti*)的增大,其电感效应更明 显。通过三维电磁仿真软件 HFSS 达到阻抗匹配的共面波导盘和回避盘的半径分别为 0.25 mm 和 0.6 mm。

如图 7 所示, 第 2 部分包含多层的直通孔及周围 4 个地孔。4 个地孔在直通孔周围均匀排列,分别在该结构

coplanar port 3 coplanar port 4 coplanar port 1 ground air bridge signal underpath cross signal air bridge

24

28

f/GHz

32

36

Fig.4 Structure for the air bridge 图 4 空气桥实现交叉传输结构



具有 50 Ω 类同轴的阻抗特性,其阻抗可参考式(1):

$$z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{B - D_1}{D_2}\right) \tag{1}$$

式中:  $\varepsilon_r$ 为多层介质板的介电常数;  $D_2$ 和  $D_1$ 分别为类同轴 内导体和外导体的直径; B为 2 个不相邻的地孔的中心间距。

中心通孔的直径是一个重要参数,它对垂直过渡的插损 有重要影响。更小的直径可以带来更小的辐射损耗和介质损 耗,尽管小的过孔轻微增加导体损耗。与第1部分相同,第 3部分包含带状线、带状线盘,带状线的盘直径也需要进行 优化。



Fig.7 Structure of coax-via structur 图 7 垂直过孔同轴结构

垂直过渡测试件的测试结果如图 8 所示,在 Ka 频段其插入损耗小于 2.3 dB,驻波比优于 1.5,隔离度可以 达到 40 dB 以上。



#### 3 高密度装配

接收组件在与辐射单元垂直的方向受格距限制,辐射单元的间距只有 15 mm。在 30 mm(对应 2 个阵元)的间 距内实现 8 个波束芯片的布局,同时满足不同通道间足够的射频隔离度,需要采用高密度装配技术。

#### 3.1 多功能芯片技术

多功能芯片易于实现 T/R 组件的高密度封装和集成<sup>[15]</sup>,提高组件不同通道一致性,缩小组件体积,降低组件成本,增加系统的可靠性<sup>[16]</sup>。

为实现 30 mm 间距内 8 个波束的布局,设计选用了 GaAs 工艺的双通道移相衰减多功能芯片。该芯片片上 集成的 1:2 功率分配网络,将 1 路微波输入信号分为等幅同相的 2 路信号,之后 2 路信号分别通过 6 位移相器和 5 位衰减器,产生不同幅度和相位的信号。该多功能芯片同时集成了 11 位串并转换功能,为 2 路移相衰减提供 相位和幅度控制。

使用多功能芯片后,减小了芯片布局面积,利于不 同通道间的相互隔离。接收组件中只用了 8 只多功能芯 片、14 只低噪声放大芯片、8 只数控延时芯片便实现了 接收组件的功能,有效减少了组件内芯片的数量。

#### 3.2 多芯片组装技术

组件装配采用微组装工艺实现微波混压多层板烧结,低频、高频连接器的气密烧结,低噪声放大器、多 功能芯片等器件的粘接,组件内部微波、控制供电信号 不同芯片间金丝键合及组件盖板的激光封焊等。

组件组装的工艺示意图如图 9 所示,该组件采用双 面布局,正反两面各放置 4 只移相衰减多功能芯片(8 个 通道) 每面实现 4 个波声 多功能芯片及低噪放芯片



图 9 接收组件组装示意图

通道),每面实现4个波束。多功能芯片及低噪放芯片、数控延时芯片、电阻和去耦电容等安装微波混压多层板。

通过绝缘子实现上下层间射频信号的垂直传输。上层和下层盖板通过激光封焊实现组件的气密封装。同时在不同的通道间增加金属隔墙确保通道间隔离度,避免寄生波束出现。

#### 4 测试结果与分析

接收组件在50 mm×30 mm×12 mm的三维尺寸下实现八 波束(16通道)的装配集成,在组件内集成了延时芯片,保证了 1.6 GHz的瞬时带宽(实现33~230 ps延时),噪声系数在10 dB数 控衰减的情况下最大为3.4 dB,满足3.5 dB的要求,略大于设 计值3 dB。两级低噪放后存在接近40 dB的衰减(包括功分、垂 直过度、射频交叉传输和移相衰减),衰减量略大于设计值,导 致噪声系数略有变大。模块内的16个通道间射频信号进行了有 效的信号隔离,天线整机测试未出现寄生波束。测试结果表明, 组件正反面间垂直互联结构具有良好的射频传输特性,满足低



Fig.10 Module of Ka band receiver 图 10 接收组件实物图

传输损耗的要求。组件内采用过孔形式的互联结构实现了射频信号交叉传输并且具备足够的隔离度。接收组件实现了八波束小型化设计,组件质量小于100g的设计指标。图10为接收组件产品实物图。

### 5 结论

本文采用多功能芯片技术,利用多芯片组装技术实现了 Ka 频段八波束接收组件的小型化集成。解决了组件 正反面射频信号低损耗垂直互联、射频信号交叉传输等技术问题。该组件集成度高,在同样的尺寸质量条件下集 成了 8 个波束,并满足 1.6 GHz 瞬时带宽的使用要求,使其能够更好地满足高性能有源相控阵雷达的需求。

#### 参考文献:

- ZHENG Xiaoyu,LIU Luokun,GUO Hong,et al. A study on expanding instantaneous bandwidth of phased array antenna[J]. Modern Radar, 2014,36(11):40-44.
- [2] RODENBEEK C T,KIM S G,TU W H,et al. Ultra-wideband low cost phased-array radars[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(12):3697-3703.
- [3] MA Qian, LEENAERTS D W M, BALTUS P G M. Silicon-based true-time-delay phased-array front-ends at Ka-band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(9):2942-2952.
- [4] 刘晓莉,郝金中. Ka 波段多通道发射组件的设计[J]. 舰船电子对抗, 2015,38(3):99-102. (LIU Xiaoli,HAO Jinzhong. Design of Ka-band multi-channel transmitting module[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2015,38(3):99-102.)
- [5] ABBOSH A M. Vertical microstrip-microstrip transition for ultra wideband applications[C]// 2007 Asia-Pacific Microwave Conference. Bangkok, Thailand: IEEE, 2007:1-4.
- [6] 郝金中,张瑜,周扬. 一种宽带多通道瓦片式 T/R 组件的研制[J]. 电讯技术, 2015,55(1):108-112. (HAO Jinzhong,ZHANG Yu,ZHOU Yang. Design of a broadband multi-channel tile-type T/R module[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(1):108-112.)
- [7] 石海然,张橹,倪子楠,等. Ka 频段片式一体化发射组件的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2018,26(4):160-163. (SHI Hairan,ZHANG Lu,NI Zinan,et al. Design of a Ka band integrated tile-type transmit module[J]. Computer Measurement and Control, 2018,26(4):160-163.)
- [8] 周骏,沈亚,顾江川.新型三维立体集成接收组件设计与实现[J].固体电子学研究与进展, 2016,36(1):25-29. (ZHOU Jun,SHEN Ya,GU Jiangchuan. A novel design of three dimensional integration receiving module[J]. Research and Progress of SSE, 2016,36(1):25-29.)
- [9] 严伟,吴金财,郑伟. 三维微波多芯片组件垂直微波互联技术[J]. 微波学报, 2012,28(5):1-6. (YAN Wei,WU Jincai, ZHENG Wei. Vertical microwave interconnection techniques for 3D microwave multi-chip modules[J]. Journal of Microwaves, 2012,28(5):1-6.)
- [10] 武红玉,厉志强,乔明昌,等. 毫米波多通道接收组件隔离度对移相的影响[J]. 舰船电子对抗, 2016,39(3):79-82. (WU Hongyu,LI Zhiqiang,QIAO Mingchang,et al. Influence of isolation of millimeter-wave multi-channel receiving module on Phase Shift[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2016,39(3):79-82.)

- [11] SIMON W,LAUER A,SCHAUWECKER B,et al. EM design of an isolated coplanar RE cross for MEMS switch matrix applications[C]// 2003 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Grainau,Germany:IEEE, 2003:162-165.
- [12] 万涛,王耀召.小型化层叠式三维 T/R 组件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):758-762. (WAN Tao,WANG Yaozhao. Miniaturization and multilayer for 3D T/R module[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):758-762.)
- [13] TSAI C C,CHENG Y S,HUANG T Y,et al. Design of microstrip-to-microstrip via transition in multilayered LTCC for frequencies up to 67 GHz[J]. IEEE Transactions on Components,Packaging and Manufacturing Technology, 2011,1(4):595-601.
- [14] LIU Z H,WU M Y. Technical trends and challenges of integration of microsystems function modules[J]. Electronic Technology, 2015,36(4):195–198.
- [15] MANCUSO Y,GREMILLET P,LACOMME P. T/R-modules technological and technical trends for phased array antennas[C]// 2005 European Microwave Conference. Paris,France:IEEE, 2005:614-617.
- [16] 白锐,高长征. 基于微波多层板的小型化多通道接收前端设计[J]. 电讯技术, 2014,54(11):1544-1548. (BAI Rui,GAO Changzheng. Design of a miniaturized multi-channel receiver front-end based on microwave multilayer[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(11):1544-1548.)

作者简介:



石海然(1982-),男,河北省承德市人,工 程师,主要从事相控阵天线有源射频电路的研 究.email:wahm111@163.com.

**张 橹**(1983-),男,福建省南平市人,工程师,主要从 事相控阵天线系统的研究. **张** 涛(1983-),男,西安市人,工程师,主 要从事相控阵天线系统的研究.

**薛** 欣(1984-),男,陕西省咸阳市人,工程 师,主要从事相控阵天线系统的研究.

范占春(1984-),男,山西省吕梁市人,高级 工程师,主要从事无线通信系统的研究.

-----

(上接第 251 页)

- [11] TILAK V,GREEN B,KAPER V,et al. Influence of barrier thickness on the high-power performance of AlGaN/GaN HEMTs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2001,22(11):504-506.
- [12] GAO Jianjun,ZHANG Lei,XU Jianjun,et al. Nonlinear HEMT modeling using artificial neural network technique[C]// IEEE International Microwave Symposium Digest. Long Beach,CA,USA:IEEE, 2005:469-472.
- [13] SOWERS J J,PRITCHARD D J,WHITE A E,et al. A 36 Watt V-band solid state source[C]// 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. [S.l.]:IEEE, 1999:235-238.
- [14] TAYRANI R. A highly efficient broadband(7-14 GHz) monolithic class E power amplifier for space based radar[C]// 2007 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits(RFIC) Symposium. Honolulu,HI,USA:IEEE, 2007:721-724.
- [15] GREEN B M. High-power broadband AlGaN/GaN HEMT MMIC's on SiC substrates[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001,49(12):2486-2493.
- [16] LEE C,ALLEN D,CAMPBELL C,et al. Gallium nitride wideband and S-band MMIC development[Z]. GOMAC Tech 2009.

#### 作者简介:



**刘** 帅(1986-),男,河北省邯郸市人,工 程师,主要研究方向为微波集成电路.email: liushuai4978@163.com. **蔡道民**(1977-),男,湖南省龙山县人,高级 工程师,主要研究方向为微波集成电路设计.

**武继斌**(1978-),男,河北省保定市人,高级 工程师,主要研究方向为微波集成电路设计.