



# 全孔径超宽带宽角扫描有源相控阵 天线系统

陈显舟<sup>1\*</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 吕清刚<sup>2</sup>, 汪渊<sup>2</sup>, 杨锋<sup>3</sup>, 方海<sup>1</sup>, 杨佳琦<sup>3</sup>

(1. 中国空间技术研究院西安分院 西安 710100; 2. 成都华芯天微科技有限公司 成都 610010;

3. 电子科技大学电子科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**研究了一种全孔径紧耦合超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统设计方法。通过威尔金森功分电路同时激励两个镜像对称偶极子单元,在不组阵方向阵列边缘采用延长型偶极子,消除了截断效应的影响,有效降低低频段的有源驻波,在组阵方向采用垂直金属壁取代哑元作为宽角阻抗匹配层的支撑,实现了天线阵列的全端口馈电。为满足大瞬时带宽及宽角扫描的需求,T/R 组件射频链路采用了移相器加频率不敏感的延时器,改善了瞬时大带宽在大角度扫描时的波束空间色散及波形时间色散性能。将超宽带宽角扫描阵面、散热器、T/R 组件、波控电源板及后盖板进行堆栈式高密度集成,研制了 1×10 全端口馈电的超宽带有源相控阵整机。测试结果表明,该阵列天线可跨 4 倍频程工作,扫描范围可以达到±45°,瞬时工作带宽可覆盖有源相控阵天线系统全频段,对实现综合多功能软件定义卫星在轨演进、降低成本、提高灵活性具有重要意义。

**关键词** 有源相控阵天线系统; 全孔径紧耦合; 堆栈式高密度集成; 超宽带宽角扫描。

中图分类号 TN82 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2022088

## Full-Aperture Ultra-Wide Bandwidth and Wide Angle Scanning Active Phased Array Antenna System

CHEN Xianzhou<sup>1\*</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, LYU Qinggang<sup>2</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, YANG Feng<sup>3</sup>, FANG Hai<sup>1</sup>, and YANG Jiaqi<sup>3</sup>

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an) Xi'an 710100; 2. Phasym Technology Chengdu 610010;

3. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** In this paper, a full-aperture linear tightly coupled active phased array antenna system with ultra-wide bandwidth and wide angle scanning performance is described. The design procedure and implementation method of the full-port feeding tightly coupled ultra-wideband wide angle scanning array without dumb element are studied. Two mirror symmetry dipole elements are fed by a Wilkinson power divider simultaneously. Extended dipole elements are utilized at the edge of array to eliminate the truncation effect and effectively reduce the active voltage standing wave ratio (VSWR) at low frequencies. Vertical metal walls are utilized at the other edge of array to replace the dummy elements. Meanwhile, vertical metal walls can also support the wide angle impedance matching (WAIM) layer. Finally, the full-aperture antenna array is realized. In order to meet the requirements of large instantaneous bandwidth and wide angle scanning performance, the radio frequency link of the T/R component uses a phase shifter plus a frequency-insensitive time delay device, so as to improve the beam pointing spatial dispersion and waveform time dispersion performance of large instantaneous bandwidth while large angle scanning. The ultra-wideband wide angle scanning array aperture, cooler plate, T/R components, beam control and power board and rear cover are integrated in high-density stack-type. A 1 × 10 full-aperture ultra-wideband active phased array is fabricated. The measurement results show that the array antenna can work across 4 octaves, the scanning range is greater than or equal to ±45°, and the instantaneous operating bandwidth can cover the full frequency band of the active phased array antenna system, which is of great significance for realizing integrated multi-function software defined satellite evolution in orbit, reducing cost and improving flexibility.

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-11-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1808003)

作者简介: 陈显舟 (1985-), 男, 高级工程师, 主要从事多功能一体化综合射频和超宽带电磁阵列及信号处理方面的研究。

\*通信作者: 陈显舟, E-mail: xianzhouchen@126.com

**Key words** active phased array antenna system; full-aperture tightly coupled array; integrated in high-density stack-type; ultra-wide bandwidth and wide angle scanning

当前我国卫星存在“载荷功能单一”和“一箭定终身”的问题, 难以适应军事任务变化需求。因此, 亟需研究集通信、电子侦察、导航、探测和干扰等多种功能于一身的软件定义卫星<sup>[1-2]</sup>。具有超宽带宽角扫描、低剖面 and 轻量化特性的阵列天线<sup>[3-4]</sup>, 作为软件化多功能一体化卫星发射和接收电磁信号的前端, 受到越来越多的关注。

众所周知, Vivaldi 天线具有超宽带特性, 结构简单且易于组阵, 但受限于阵元间距, 该类相控阵天线均不能实现宽角扫描, 而且剖面较高达到了 3 个高频波长, 难以与载体平台共形<sup>[5-6]</sup>。文献 [7-9] 报道了基于紧耦合效应的超宽带相控阵实验结果, 紧耦合超宽带天线虽然在超宽工作带宽和低剖面低交叉极化等方面具有一定优势, 但存在阵列边缘需要设置哑元、不利于模块化组阵等设计缺陷。

针对有限大阵列边缘效应的问题, 文献 [10] 提出采用终端短路的哑元来模拟无限大阵列, 以改善阵列每个单元的有源驻波比。文献 [11-12] 设计了一款双层八角环结构的强耦合一维天线阵, 该阵列在 4.4:1(2.5~11 GHz) 的带宽内可实现 $\pm 45^\circ$ 的波束扫描。然而, 天线阵列两侧哑元的引入降低了孔径效率, 同时导致阵列宽度增加两倍, 极大地增加了天线的总体尺寸, 不利于实际应用。文献 [13] 提出在双极化线阵两侧同时加载导电栅栏和铁氧体材料, 分别为垂直极化偶极子和水平极化偶极子提供其缺失的电壁和磁壁, 以实现同周期环境下相同的效果。上述两种解决方案虽然可以在一定程度上缓解截断效应对一维阵列性能的影响, 但还存在阵面尺寸较大或工作带宽较窄的不足, 并且都引入了有耗负载。

经典相控阵天线通常采用移相器作为波束扫描的控制元件, 而移相器属于频率敏感器件, 在不同频率处同样的相移导致的时延不同。相控阵天线方向图除了是角度的函数, 还是频率的函数。当超宽带宽角扫描相控阵天线工作在大瞬时带宽大扫描角度条件下, 以中心频率进行配相后, 波束指向会随频率变化在指定扫描角附近摆动, 引起波束空间的色散效应<sup>[14]</sup>。孔径渡越时间也会造成发射、接收信号波形的时间色散, 导致合成后的宽带波形畸变<sup>[15]</sup>。

为实现全孔径高效率电磁信号发射和接收, 本文设计需同时激励两个镜像紧耦合偶极子单元, 因此需要功分器电路将馈电端口信号分为两路。在不组阵方向阵列边缘采用延长型偶极子, 消除截断效应的影响, 并能有效降低低频段的有源驻波, 在组阵方向采用垂直金属壁取代哑元作为宽角阻抗匹配层的支撑, 最终实现了天线阵列的全端口馈电。采用阵元级移相器加延迟器解决瞬时大带宽大角度扫描条件下的波束指向色散和波形时间色散问题。本文提出并研制了一款全孔径超宽带紧耦合有源相控阵天线系统, 该阵列天线可跨 4 倍频程工作, 扫描范围达到  $45^\circ$ , 瞬时工作带宽可覆盖有源相控阵天线系统全频段。

## 1 超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统总体设计

超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统由全孔径超宽带紧耦合阵面、超宽带 T/R 组件、波控供电板、外结构件及热控等 5 大部分组成, 其组成框图如图 1 所示。

发射时, 射频激励信号由发射口馈入开关, 经过 1 分 2 功分电路分配至 8 通道 T/R 组件和 2 通道 T/R 组件中, 在 8 通道 T/R 组件中, 经过 1 分 2 功分后进入驱动电路放大后, 再经过 1 分 4 功分器分配至每路 T/R 射频通道中。在 T/R 射频通道中, 信号经过数字衰减器、数字移相器和数字延时器芯片调控幅度相位, 再经多级功率放大后进入超宽带天线单元, 在空间上合成不同指向的波束, 输出信号。

同理, 接收时, 天线接收电磁信号后进入每路 T/R 射频通道中, 经过两级低噪放大后经数字衰减器、数字移相器和数字延时器芯片调控幅度相位, 再通过 4 合 1 合路器合成, 经过驱动放大后再由 2 合 1 合路器合成, 输出至 2 合 1 合路器合成后再输出。

波控供电模块接收显控系统的控制指令, 对每个 T/R 组件的射频通道的幅相进行控制, 并通过控制波控子板上的电源调制器及射频通道的开关芯片来控制有源相控阵天线系统的收发状态。同时, 电源模块负责把输入的直流电源转换为控制电路及射频芯片所需的电压。

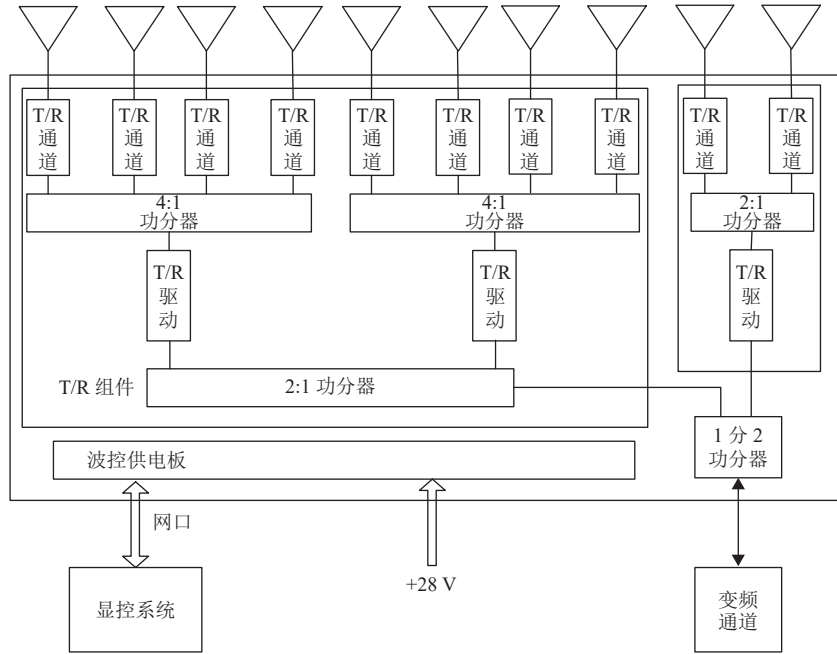


图 1 超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统组成

超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统整机分解图如图 2 所示, 采用成熟的堆栈式结构, 具有集成度高、体积小、散热效果好等特点。

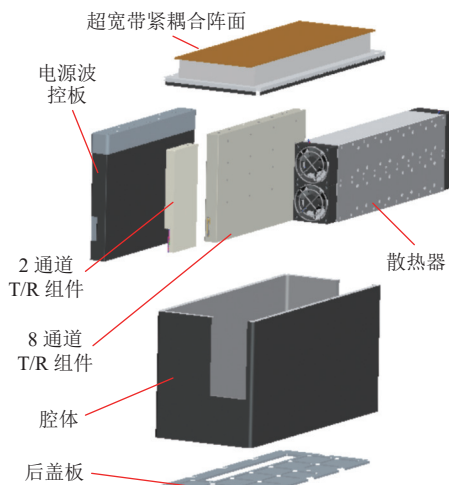


图 2 超宽带宽角扫描有源相控阵天线结构分解图

## 2 全孔径超宽带紧耦合阵面设计

### 2.1 紧耦合偶极子单元结构设计

天线单元模型如图 3 所示, 整个天线结构上方覆盖一层起宽角阻抗匹配层 (WAIM) 作用的周期性 SRR (split-ring resonator) 结构, 旨在保证宽角扫描效果的同时, 尽量降低天线剖面。下方竖起的两块平行基板即为天线基板, 平行基板上印刷有偶极子单元以及与其相连的馈电巴伦。基板下方设计有

插槽, 便于与地板进行连接。实际加工时将插槽插入地板, 再进行更为牢固的焊接即可。最下方为天线地板。地板上方为功分网络, 与巴伦相连接, 在地板与威尔金森功分电路的合适位置打孔放置同轴连接器。圆柱结构即同轴接头进行馈电。平行介质基板包括偶极子辐射贴片、接地耦合贴片以及与偶极子辐射贴片相连的巴伦, 其中偶极子辐射贴片末端与接地耦合贴片在基板两侧部分重叠, 用于实现天线单元的超宽带工作, 耦合贴片接地是为了消除工作频带内的谐振。馈电巴伦选择了 Marchand 巴伦形式, 一端与偶极子臂相连接, 另一端连接功分网络进行馈电。

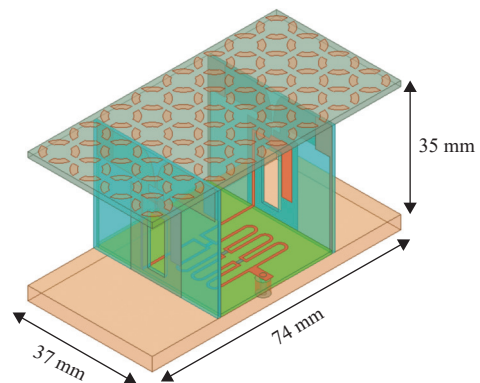


图 3 1~4 GHz 天线单元结构及尺寸参数图

在选材方面, 宽角阻抗匹配层采用介质基板为 Taconic TLX, 其介电常数为 2.55, 通过介质支

撑柱固定; 偶极子与馈电巴伦所在天线基板为 Taconic TLY-5Z, 其介电常数为 2.2; 地板处于整个阵面最下层, 为一整块铝板, 同轴接头穿过地板与天线连接。天线阵面每个单元尺寸为  $37 \times 74 \text{ mm}^2$ ; 宽角阻抗匹配层由上至下厚度为 1.58 mm, 与天线基板贴合, 天线基板高度为 33.3 mm, 下方插入地板上所开的槽内, 保证接地的同时起到固定作用, 天线地板以上的整体剖面高度为 35 mm, 约  $0.46\lambda_{\text{high}}$ , 保证剖面高度在一个较低的水平。

本设计采用的紧耦合偶极子阵元结构及所处环境完全一致, 仅做镜像处理, 且馈电是通过等长的威尔金森功分器, 保证馈电信号同时传输至两偶极子单元, 因此在天线增益不平衡度方面不需过多考虑。在隔离度方面, 采用了三级功分器做信号分配, 且每级功分器间均焊接有隔离电阻, 极大程度改善了两镜像单元间的隔离度。

针对上述天线单元进行仿真, 在 1~4 GHz, 除低频的驻波稍有抬升达到 2.5, 其余频段都可以满足驻波小于 2, 证明该天线具有较为良好的阻抗匹配性能。

## 2.2 一维组阵设计

根据上节所设计的天线单元结构, 设计  $1 \times 10$  规模的一维有限大线阵, 在实现阵列小型化的同时尽量消除边缘截断效应对阵列性能的影响, 对阵列边缘进行了延长处理, 同时利用垂直金属壁代替了传统接匹配负载的哑元, 最终天线阵列实际尺寸与辐射孔径一致, 达到了天线阵面全孔径利用、实现更高孔径效率的目的。

图 4 所示为天线单元组成  $1 \times 10$  阵列的内部结构, 可以看出每个单元的功分器都经过单独设计, 使得功分器线长相等, 保证馈电时各单元的一致性。上方添加宽角阻抗匹配层, 四周添加围栏作为支撑及保护结构, 实际工作时对  $1 \times 10$  单元进行馈电。仿真模型整体长度为 396 mm, 在实际加工时考虑到与 T/R 组件的连接问题, 会将地板进行外扩, 并保证外观上的一致性与整体性。

在全频段全端口,  $1 \times 10$  天线阵列侧射时有源驻波可保证在 3 以下, 且仅在 1 GHz 低频处驻波略有抬升, 其他频段驻波可保证在 2.5 以下, 因此, 该天线全部端口在侧射时都具有较好的阻抗匹配性能。

在 4、3、2、1 GHz 情况下,  $1 \times 10$  天线阵列模

型在侧射时的各频点方向图波束形状正常, 指向正常, 增益水平正常, 副瓣水平正常, 天线阵列在侧射时性能良好。

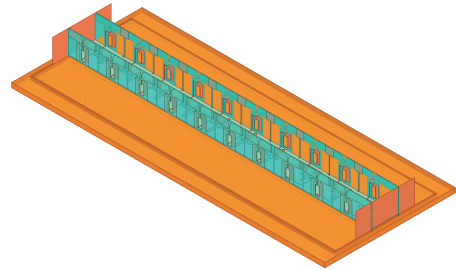


图 4  $1 \times 10$  天线阵列仿真模型图 (内部结构)

在全频段全端口,  $1 \times 10$  天线阵列在  $45^\circ$  扫描时的有源驻波可保证在 2.5 以下, 中心端口驻波可保证在 2 以下。因此, 该天线全部端口在  $45^\circ$  扫描时都具有较好的阻抗匹配性能。

在 4、3、2、1 GHz 情况下,  $1 \times 10$  天线阵列模型在  $45^\circ$  扫描时的波束形状正常, 指向正常, 增益水平正常, 副瓣水平正常, 天线阵列在  $45^\circ$  扫描时性能良好。

## 3 超宽带 T/R 组件设计

### 3.1 超宽带 T/R 组件射频链路设计

超宽带 T/R 组件包括 10 个 T/R 射频通道, 分为 8 通道 T/R 组件和 2 通道 T/R 组件, 主要由腔体、盖板、多层微波复合板等部件组成。

如图 5 所示, 发射时, 射频信号由一分二功分器进入 8 通道 T/R 组件, 通过开关后一分二功分, 将信号馈入驱动放大器, 放大输出, 再经过一分四功分后, 馈入 T/R 通道中, 经过数字衰减器和数字延时器芯片控制幅度相位, 再经过三级放大器放大后, 通过射频 SMP 接口馈入天线阵列, 发射输出。

同理, 接收时, 天线阵列接收到射频信号后, 输入至 T/R 射频通道中, 经两级低噪放大后, 再经过数字衰减器和数字延时器芯片控制幅度相位, 进入四合一功合器, 合成后, 再经驱动低噪放大, 再进入二合一功合器, 合成后经过开关输出至变频通道中。

由链路预算可知, T/R 组件发射增益可达 22 dB, 接收合路增益可达 38 dB, 发射输出功率为 32.8 dBm。所选用低噪放噪声系数为 1.2 dB, 增益 21 dB, 整个 T/R 组件噪声系数为 2.35 dB。



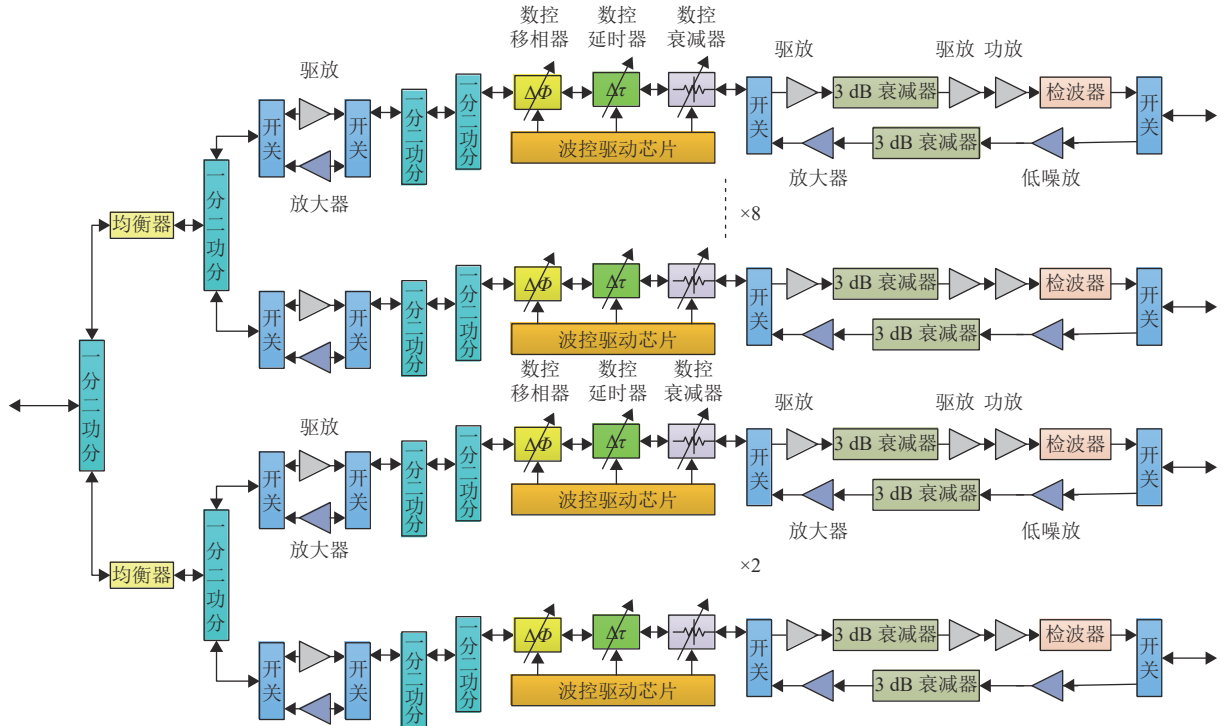


图 5 超宽带 T/R 组件射频链路设计

### 3.2 超宽带 T/R 组件结构设计

8 通道 T/R 组件共包含 8 个射频通道，每个射频通道均包含独立的收发链路，通道间通过腔体进行隔离，其内部结构如图 6 所示。2 通道 T/R 组件共包含 2 条独立的收发链路，射频通道间通过腔体进行隔离，其内部结构与 8 通道 T/R 组件相似。

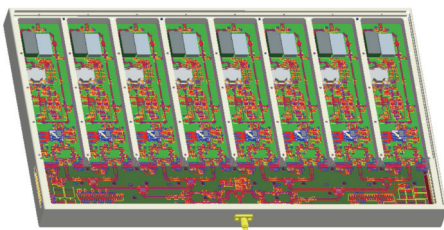


图 6 8 通道 T/R 组件内部结构图

### 3.3 瞬时带宽分析

超宽带相控阵天线带宽主要受天线波束指向的偏移(合成波束的空间色散)以及天线孔径渡跃时间(信号波形的时间色散)的限制。对于一维线阵最后一个天线单元所需要的时间延迟为：

$$\Delta\tau = \frac{(N-1)d\sin\theta}{c} \quad (1)$$

式中， $N$  为一维线阵天线单元数目； $d$  为天线单元间距； $\theta$  为扫描角度； $c$  为光速。

对于该一维有源相控阵系统来说，10 个通道

间的相位不一致性，可通过该通道上的移相器配平。 $N=10$ ， $d=0.037\text{ m}$ ， $\theta=45^\circ$ ，所需要的延时  $\Delta\tau=785\text{ ps}$ ，在移相器后级联了对频率不敏感的延时器，最大延时量为  $1\ 280\text{ ps}$ ，延时步进  $5\text{ ps}$ ，可提供波束扫描所需的真时延，因而不会产生波束指向的空间色散效应。

针对线性调频脉冲压缩信号，当天线的孔径渡越时间  $T_{A0}$  大于其信号带宽  $\Delta f$  的倒数时，阵列两端单元接收到的信号经过脉冲压缩后，在时间上会完全分开，不能合成，产生信号波形的时间色散。因此，信号瞬时带宽对  $T_{A0}$  的限制是  $T_{A0} \leq 1/\Delta f$ ，通常，要求严格一点，取：

$$T_{A0} \leq \frac{1}{10} \times \frac{1}{\Delta f} \quad (2)$$

当通道插入长度为  $l$  的延时线时，其延时量为  $\tau_0 = l/c$ ，则此时天线的孔径渡跃时间  $T_{A0}$  下降为  $\Delta T = T_{A0} - \tau_0$ ，于是，上式变为<sup>[14]</sup>：

$$\Delta f \leq \frac{1}{10\Delta T} = \frac{1}{10} \times \frac{c}{((N-1)d\sin\theta - l)} \quad (3)$$

对于该一维有源相控阵系统来说，可提供  $l=785\text{ ps}$  时延， $\Delta f \leq \infty$ ，瞬时工作带宽可覆盖有源相控阵天线系统全频段。

### 4 波控供电板设计

电源模块完成电源转换功能, 将输入的+28 V 电压转换为有源阵列天线系统所需直流电压, 以给超宽带 T/R 组件、控制电路供电。波控模块通过与显控系统的通信接口, 把上位机的控制指令, 送入板内 FPGA, 在 FPGA 内部进行指令解算, 对 T/R 组件下发波束切换、收发控制等功能指令, 同时, 把温度等信息回传给显控系统。波控供电板组成框图如下图 7 所示。

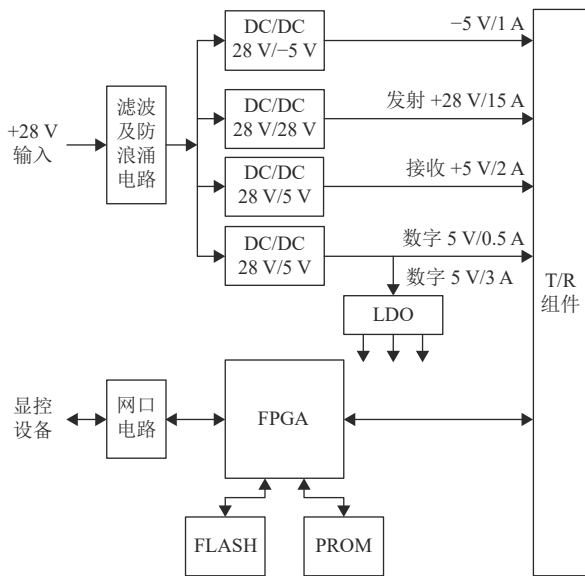


图 7 波控供电板组成框图

DC/DC 28V/5V 和 28V/-5V 分别采用 ADI 公司的 LTM4613 和 LTM8074 电源模块, 控制模块选用 Xilinx XC7A50T FPGA, FLASH 芯片选用镁光 MT28EW128ABA1LPC, 网口电路采用 WIZnet 公司的 W5500 芯片。波控软件作为控制波束指向和收发模式切换的核心, 包括时钟复位模块、指令收发模块、角度解算模块、外设控制模块。主要用于接收基带处理板输出的控制指令和角度信息, 进行幅相数据解算、分发后控制各个通道的幅相状态, 从而实现波束预定、扫描或实现波束特性控制、收发控制。

### 5 超宽带有源阵列散热设计

超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统采用风冷散热方式, 在 T/R 组件背面直接贴装散热器进行散热。同时, 进行热仿真分析, 保证器件工作温度满足一级降额要求。

天线中器件热源分布如表 1 所示, 总热耗 121.8 W, 发热方式为连续工作模式。散热路径如图 8 所示。

表 1 T/R 组件射频芯片热耗统计

器件名称	单个热耗/W	数量	总热耗/W
LNA1	0.2	12	2.4
驱放1	0.23	10	2.3
驱放2	1.24	10	9.92
LNA2	0.3	24	7.2
功放	10	10	100

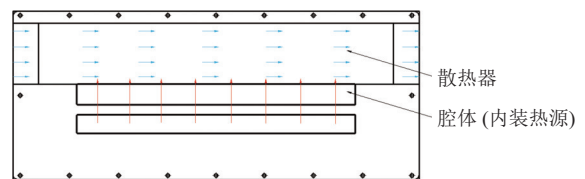


图 8 散热路径示意图

设置环境温度为 25℃, 考虑辐射散热, 表面发射系数 0.8, 功放安装到金属载板上, 其余器件采用铅锡焊焊接到 PCB 板上, 器件下方位置 PCB 板做金属过孔散热, 风机 PQ 性能如图 9 所示。

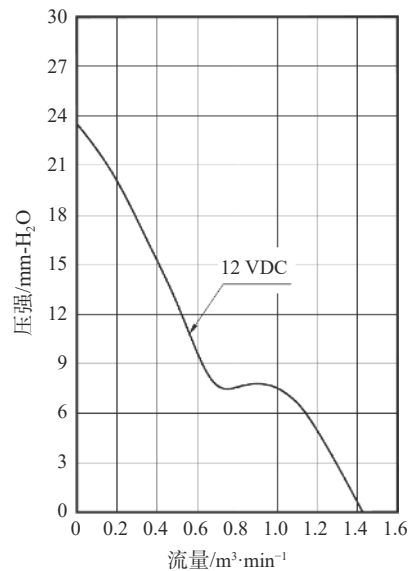


图 9 风机 PQ 性能曲线

器件仿真温度与芯片内热阻引起的温升相加得到仿真结温如表 2 所示。由仿真结果可知, 超宽带宽角扫描有源相控阵天线系统内主要发热器件, 连续工作达到稳态后, 其结温最大为 83.85℃, 满足一级降额要求。

表 2 T/R 组件射频芯片温度符合性表

元器件	片内热阻/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$	热阻温升/ $^{\circ}\text{C}$	仿真壳温/ $^{\circ}\text{C}$	仿真结温/ $^{\circ}\text{C}$	一级降额额定结温/ $^{\circ}\text{C}$	是否满足要求
LNA1	41	8.2	37.12	45.32	100	满足
驱放1	41	9.43	36.75	46.18	100	满足
驱放2	31	38.44	44.55	82.99	100	满足
LNA2	47	14.1	37.63	51.73	100	满足
功放	4.3	43	40.85	83.85	115	满足

## 6 超宽带有源阵列暗室测试

在微波暗室条件下,对超宽带有源阵列远场方向图及波束扫描能力、 $G/T$ 值和 EIRP 值进行测试。研制的超宽带宽角扫描有源相控阵天线实物如图 10 所示,微波暗室远场测试场景如图 11 所示。待测超宽带有源阵列天线架设于转台之上,测试喇叭天线为双脊喇叭天线,位于与超宽带有源阵列天线同样高度的远区场,达到远场测试条件。



图 10 超宽带宽角扫描有源相控阵天线实物图

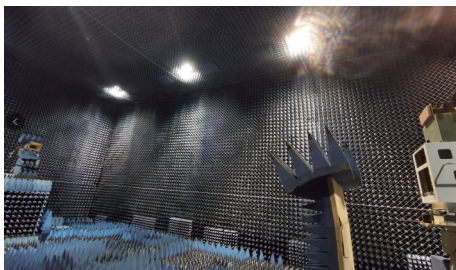


图 11 超宽带宽角扫描有源相控阵天线微波暗室远场测试场景图

本工作所设计的超宽带有源阵列天线工作频率为 1~4 GHz,测试时选取典型频点 1、2、3、4 GHz 进行波束成形及扫描测试,用以说明天线在频段内均可正常工作。图 12~图 15 分别为超宽带有源阵列天线在频率 1、2、3、4 GHz,旋转角 0/180°条件下,离轴角从 0°~45°扫描方向图,可见波束形状正常无畸变,波束指向正常,高频段时

波束扫描角最大可达 $\pm 45^{\circ}$ 以上,阵列尺寸仅为 1 GHz 波长的 1.25 倍,受限于阵列尺寸较小,低频段宽角扫描能力受限,通过扩展阵列尺寸,可在 1~4 GHz 频段内实现超宽带宽角扫描。

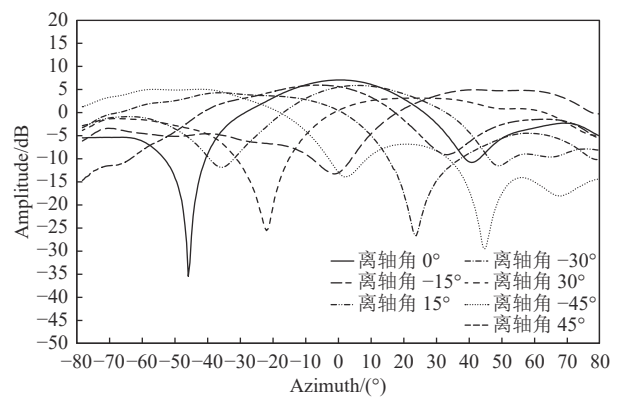


图 12 1 GHz(离轴角 0°~45°, 旋转角 0°/180°) 辐射方向图

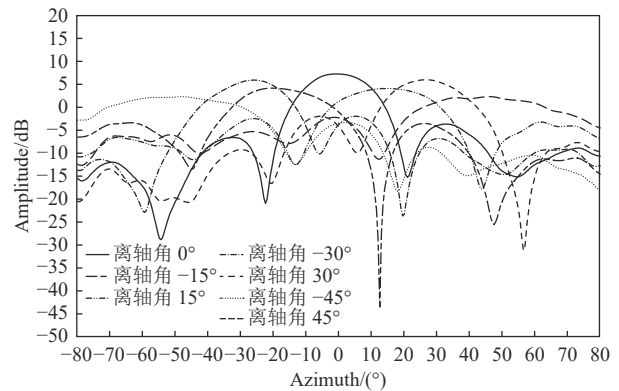


图 13 2 GHz(离轴角 0°~45°, 旋转角 0°/180°) 辐射方向图

超宽带有源阵列  $G/T$  值计算为:

$$G/T = 10\log_{10}[kB(Y_2 - 1)Y_1/(Y_1 - 1)] + L_F - P_t \quad (4)$$

式中,  $k=1.38 \times 10^{-23}$  J/K 为波尔兹曼常数;  $B$  为接收系统中频滤波器带宽;  $L_F$  为接收链路自由空间损耗:  $L_F=32.44+20\log_{10}d+20\log_{10}f$ ,  $d$  为测试喇叭天线和被测超宽带有源阵列距离,  $f$  为被测超宽带有源阵列工作频率;  $P_t$  为发射喇叭天线入口处的功率;  $G_t$  为发射喇叭天线增益;  $Y_1 = P_2/P_1$ ,  $Y_2 =$

$P_3/P_2$ ; 其中,  $P_1$  为测试环境的噪声功率,  $P_2$  为  $P_1$  功率叠加上被测超宽带有源阵列通道的噪声功率,  $P_3$  为  $P_2$  功率叠加上被测超宽带有源阵列通道的信号功率。

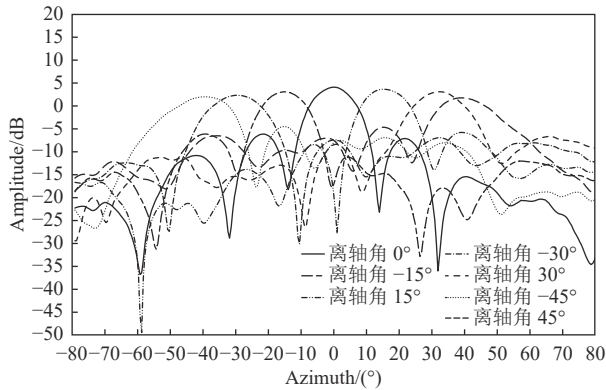


图 14 3 GHz(离轴角 0°~45°, 旋转角 0°/180°) 辐射方向图

超宽带有源阵列 EIRP(dBW) 计算为:

$$EIRP = P + L_T + L_F - G_R - 30 \quad (5)$$

式中,  $P$  为功率计收到的总信号功率;  $L_T$  为从标准

喇叭天线至功率计间的总插入损耗;  $G_R$  为测试用标准喇叭天线的增益;  $L_F$  为接收链路自由空间损耗。

表 3 和表 4 为超宽带有源阵列在 1、2、3、4 GHz, 在微波暗室远场条件下的实测  $G/T$  和 EIRP 值。由表可知, 该超宽带有源阵列  $G/T$  和 EIRP 良好, 在 1~4 GHz 频段具备优良的信号接收和向外发射能力。

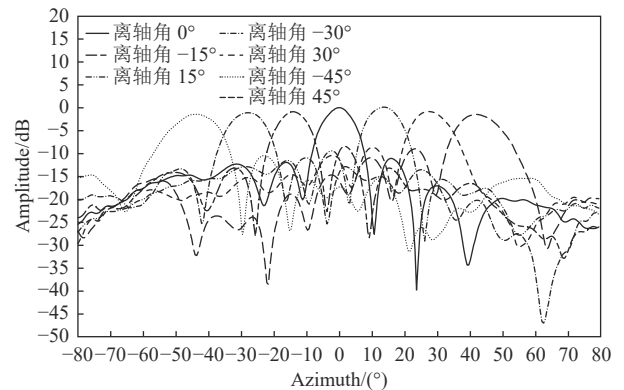


图 15 4 GHz(离轴角 0°~45°, 旋转角 0°/180°) 辐射方向图

表 3 超宽带有源阵列  $G/T$  值测试数据表

$f/\text{MHz}$	$P_1/\text{dBm}$	$P_2/\text{dBm}$	$P_3/\text{dBm}$	$\frac{G}{T}/\text{dB} \cdot \text{K}^{-1}$	$P_t/\text{dBm}$	$d/\text{m}$	$L_F/\text{dB}$	$G_t/\text{dB}$
1 000	-88.00	-53.67	-3.58	-29.60	-12	11.023	53.29	9.39
2000	-67.40	-45.93	12.86	-16.30	-12.6	11.023	59.31	11.45
3 000	-86.00	-54.50	1.06	-15.92	-13.7	11.023	62.83	12.42
4 000	-84.50	-54.60	-3.22	-16.48	-14.35	11.023	65.33	11.95

表 4 超宽带有源阵列 EIRP 值测试数据表

$f/\text{MHz}$	$d/\text{m}$	$L_F/\text{dB}$	$G_R/\text{dB}$	$P/\text{dBm}$	EIRP/dBm	$L_T/\text{dB}$
1 000	11.023	53.29	9.39	6.27	50.17	-4.00
2000	11.023	59.31	11.45	4.07	51.93	-7.00
3 000	11.023	62.83	12.42	0.30	50.71	-7.00
4 000	11.023	65.33	11.95	-2.00	51.38	-4.00

## 7 结束语

该文研制和设计了 1×10 规模全孔径紧耦合超宽带宽角扫描有源相控阵天线样机。超宽带宽角扫描阵面在组阵方向采用垂直金属壁取代哑元作为宽角阻抗匹配层的支撑, 实现全端口馈电。在不组阵方向阵列边缘采用延长型偶极子, 消除截断效应, 有效降低低频段的有源驻波。多通道 T/R 组件采用“砖块式”结构, 在射频链路采用了移相器加频率

不敏感的延时器, 实现了瞬时大带宽大角度扫描, 不产生波束空间色散及波形时间色散。微波暗室远场实测结果表明, 该阵列天线可跨 4 倍频段工作, 扫描范围可达到±45°,  $G/T$  和 EIRP 性能优良, 瞬时工作带宽可覆盖全频段, 在全频段内具备优良的信号接收和向外发射能力。可满足侦察干通多功能一体化载荷系统对于低剖面、轻量化、超宽带宽角扫描综合孔径的需要, 对实现卫星功能在轨演进、降低成本、提高灵活性具有重要意义。



## 参 考 文 献

- [1] 吴启星. 软件定义卫星研究现状与技术发展展望[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2021, 16(4): 333-337.  
WU Q X. State of the art and development analysis of software defined satellites[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2021, 16(4): 333-337.
- [2] 陈显舟, 杨旭, 周琪, 等. 多功能可重构电磁信号发射接收及处理技术[J]. *电子科技大学学报*, 2023, 52(2): 214-223.  
CHEN X Z, YANG X, ZHOU Q, et al. Multifunctional reconfigurable electromagnetic signal transmitting receiving and processing technology[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2023, 52(2): 214-223.
- [3] 胡元奎, 靳学明, 范忠亮. 多功能综合射频系统技术研究[J]. *雷达科学与技术*, 2015, 13(3): 233-239.  
HU Y K, JIN X M, FAN Z L. Research on multi-function integrated rf system technology[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(3): 233-239.
- [4] 张雪莲. 多功能综合射频技术发展研究[J]. *现代雷达*, 2020, 42(7): 78-81.  
ZHANG X L. A study on integrated multifunction rf technology trends[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(7): 78-81.
- [5] KINDT R W, PICKLES W R. Ultra-Wideband all-metal flared-notch array radiator[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(11): 3568-3575.
- [6] YAN J B, GOGINENI S, CAMPS-RAGA B, et al. A dual-polarized 2-18 GHz vivaldi array for airborne radar measurements of snow[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 64(2): 781-785.
- [7] MUNK B A, TAYLOR R, DURHARN T, et al. A low-profile broadband phased array antenna[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2003: 448-451.
- [8] MUNK B A. Finite antenna arrays and FSS[M]. Hoboken, NJ: John Wiley, 2003.
- [9] CHEN X Z, WANG B J, YANG X, et al. An  $8 \times 8$  ultra-wideband tightly coupled dipole active phased array[J]. *Int JRF Microw Comput Aided Eng*, 2022. DOI: 10.1002/mmce.23411.
- [10] MEROLA C S, VOUVAKIS M N. UHF planar ultra-wideband modular antenna (PUMA) arrays[C]//IEEE International Symposium on Antennas & Propagation & Usnc/ursi National Radio Science Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2017: 1803-1804.
- [11] TZANIDIS I, SERTEL K, VOLAKISJ L. UWB low-profile tightly coupled dipole array with integrated balun and edge terminations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(6): 3017-3025.
- [12] CHEN Y K, YANG S W, NIE Z P. A novel wideband antenna array with tightly coupled octagonal ring element[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 124(8): 55-70.
- [13] LEE H, NAM S. A dual-polarized 1-D tightly coupled dipole array antenna[J]. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(9): 4511-4518.
- [14] 陈泳, 张玉华, 肖达, 等. 宽带相控阵雷达的延时实现方法[J]. *现代雷达*, 2020, 42(5): 70-75.  
CHEN Y, ZHANG Y H, XIAO D, et al. Time delay method in wideband phased array radar[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(5): 70-75.
- [15] 俞志强. 多功能地基相控阵雷达原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.  
YU Z Q. Principle and technology of multi-functional foundation phased array radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.

编辑 税红