



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104166765 B

(45)授权公告日 2017.02.08

(21)申请号 201410404604.2

(22)申请日 2014.08.15

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104166765 A

(43)申请公布日 2014.11.26

(73)专利权人 西安电子科技大学
地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

(72)发明人 王从思 段奇君 王艳 康明魁
王猛 朱敏波 王伟 保宏
周金柱 李娜

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任
公司 61200

代理人 徐文权

(51)Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件

CN 103970943 A, 2014.08.06,

CN 103116677 A, 2013.05.22,

王从思 等.微通道冷板在有源相控阵天线上的应用.《电子机械工程》.2013,第29卷(第1期),第1-4、13页.

宋正梅.有源相控阵天线微通道冷却技术研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库-信息科技辑》.2013,(第S2期),第I136-67页.

Congsi Wang 等.Analysis of performance of active phased array antennas with distorted plane error.《International Journal of Electronics》.2009,第96卷(第5期),第549-559页.

审查员 陈鸣

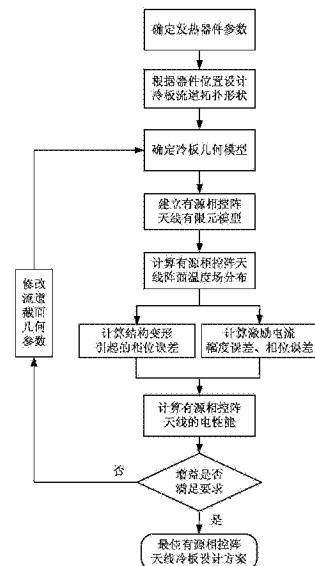
权利要求书3页 说明书10页 附图7页

(54)发明名称

基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法,包括:确定有源相控阵天线T/R组件中发热器件的参数,根据发热器件的位置,设计冷板流道的拓扑形状和天线冷板的几何模型,建立天线的有限元模型,计算天线的阵面温度场分布,计算天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差,计算有源相控阵天线的电性能,根据增益的指标要求确定有源相控阵天线冷板的设计方案。采用本发明方法可以设计出基于器件位置的有源相控阵天线冷板方案,能够有效带走发热器件所产生热量且定量分析温度变化对结构变形和激励电流幅度、相位的影响,在满足天线电性能、结构力学性能前提下达到改善温度分布、保障有效工作的目的。



1. 基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 该方法包括下述步骤:

(1) 根据有源相控阵天线T/R组件电路图, 确定其中发热器件的参数;

(2) 根据T/R组件中各发热器件的位置, 设计冷板流道的拓扑形状;

所述步骤(2)中设计冷板流道的拓扑形状, 按照以下步骤进行:

(2a) 根据T/R组件中各发热器件的位置与几何尺寸, 确定各发热器件几何中心点的坐标;

(2b) 用三次B样条曲线对冷板上所有发热器件的中心点进行曲线拟合;

(2c) 计算每相邻两发热器件中心点之间构成曲线的曲率, 若计算出来的曲率大于这两点之间距离倒数的一半, 则需在此两点间添加辅助点; 若这两相邻发热器件中心点构成曲线并未经过该两点中的任意一点, 则仍需在此两点间添加辅助点; 将此两点的坐标记为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 辅助点的坐标记为 (x, y) , 则此三点的坐标关系满足下式

$$\begin{cases} 2x = x_1 + x_2 \\ \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_1 + y_2}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} \left[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \right]; \end{cases}$$

(2d) 用三次B样条曲线对发热器件的中心点和添加的辅助点重新进行曲线拟合;

(2e) 将拟合出的曲线初始端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道入口的几何中心位置; 同样, 将拟合出的曲线末端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道出口的几何中心位置, 确定出完整的冷板流道的中心线, 从而设计冷板流道的拓扑形状;

(3) 根据冷板流道的拓扑形状, 确定流道截面的几何参数, 建立有源相控阵天线冷板的几何模型;

(4) 根据有源相控阵天线冷板的几何模型, 建立有源相控阵天线的有限元模型;

(5) 将有源相控阵天线的有限元模型结合制冷系统的特性参数, 确定流体冷却参数, 计算有源相控阵天线的阵面温度场分布;

(6) 根据有源相控阵天线的阵面温度场分布, 计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差, 以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差;

(7) 根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差, 计算有源相控阵天线的电性能, 判断天线增益是否满足要求, 若满足要求, 即可得到最佳的有源相控阵天线冷板设计方案; 否则, 修改流道截面的几何参数, 重复步骤(3)到(7), 直至满足要求。

2. 根据权利要求1所述的基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 所述步骤(1)中发热器件的参数包括功率放大器、驱动放大器、移相器和低噪声放大器LNA的位置、几何尺寸以及热功耗。

3. 根据权利要求1所述的基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 所述步骤(3)中流道截面的几何参数包括流道截面的形状和尺寸。

4. 根据权利要求1所述的基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 所述步骤(4)中有源相控阵天线的有限元模型, 包括T/R组件外壳、发热器件、

天线单元、加强筋和冷板的有限元模型。

5. 根据权利要求1所述的基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 所述步骤(5)中冷却参数包括冷却液的类型、冷却液的入口温度、入口流速和出口静压。

6. 根据权利要求1所述的基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 所述步骤(6)中计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差, 按照以下步骤进行:

(6a) 根据有源相控阵天线的阵面温度场分布, 计算有源相控阵天线由热引起的结构变形量, 分别提取各个天线单元中心节点在x, y, z方向上的位置偏移量 $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$, m、n分别表示有源相控阵天线M列、N行天线单元的编号;

(6b) 根据各个天线单元中心节点位置偏移量, 按以下公式计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(md_x + x_{m,n} - x_{1,1} \right) \sin\theta \cos\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \left(nd_y + y_{m,n} - y_{1,1} \right) \sin\theta \sin\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \left(z_{m,n} - z_{1,1} \right) \cos\theta$$

其中, 有源相控阵天线共有M×N个天线单元等间距排列, 单元间横向、纵向间距分别为 d_x 和 d_y , λ 是有源相控阵天线的工作波长, θ 、 φ 分别是远区电场目标点的俯仰角和方位角;

(6c) 根据有源相控阵天线的阵面温度场分布, 提取出T/R组件中功率放大器的温度 T_G 和移相器的温度 T_P ;

(6d) 根据T/R组件中功率放大器的温度 T_G , 按以下公式计算激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$

$$\Delta I(T_G) = \begin{cases} 0 & -30 \leq T_G < 30 \\ -0.00179T_G + 1.0536 & 30 \leq T_G < 86 \\ 0.5^{\frac{T_G-86}{6}} - 0.15 & 86 \leq T_G < 90 \end{cases};$$

(6e) 根据T/R组件中移相器的温度 T_P , 按以下公式计算激励电流相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$

$$\Delta\varphi(T_P) = \begin{cases} 0.0008T_P^2 - 0.025T_P + 2.5 & -30 \leq T_P < 0 \\ -1/130T_P + 2.5 & 0 \leq T_P < 26 \\ 2.3 & 26 \leq T_P < 50 \\ 0.03T_P + 0.8 & 50 \leq T_P < 70 \\ 2.9 & 70 \leq T_P < 90 \end{cases}.$$

7. 根据权利要求6所述的基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法, 其特征在于, 所述步骤(7)计算有源相控阵天线的电性能, 按照以下步骤进行:

(7a) 根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$ 以及温度变化引起的激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$ 、相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$, 按以下阵列天线机电热耦合公式计算有源相控阵天

线的电场分布 $E(\theta, \phi)$

$$E(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} \cdot (1 + \Delta I(T_G)) \cdot e^{j[\varphi_0 + \Delta\varphi(T_p) + \Delta\varphi]}$$

其中, f_{mn} 是天线单元在自由空间的方向图, φ_0 是激励电流的初始相位;

(7b)根据有源相控阵天线的电场分布 $E(\theta, \phi)$,按以下公式计算有源相控阵天线最大辐射方向上的增益Gain

$$Gain = 10 \log_{10} \frac{4\pi [E(0,0)]^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} [E(\theta, \phi)]^2 \sin \theta d\theta d\phi}。$$

基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及雷达天线技术领域,具体涉及基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法,可用于指导有源相控阵天线的冷板设计、机电热耦合性能分析与评价。

背景技术

[0002] 随着有源相控阵天线对高增益、高功率、轻量化的需求,其热流密度不断增长。有源相控阵天线阵面上密布着成千上万个T/R组件,热功率非常高,同时T/R组件性能对温度非常敏感。阵面温度分布的不合理将严重影响天线阵面的幅度相位控制精度,且温度分布会引起结构变形,从而使阵面天线单元的方向图发生变化。两者最终导致天线的电性能达不到要求甚至无法实现,最终使雷达目标辨别不清、作用距离缩短、波束指向不准,甚至无法发挥功效。因此,进行高效的阵面散热设计以使阵面上所有T/R组件在工作时处于合理的温度范围内,已成为我国机载有源相控阵亟待解决的关键技术之一。

[0003] 液冷冷板由于其结构简单、重量轻、冷却效率高、冷却的热载荷范围大,因此在相控阵雷达中得到了更加广泛的应用,对于高热流密度有源相控阵雷达T/R组件的冷却能起到很好的效果。现有的冷板流道拓扑结构都是在某一种特定热源排布或假设热源位置分布均匀、发热量均匀的情况下设计的,但是在实际多芯片组件封装中,T/R组件中的发热器件须根据实际电路设计的要求进行安装分布,这会导致发热器件布置的多变性和复杂性,但现有的研究难以解决这种情况下有源相控阵天线的散热问题。

[0004] 因此,有必要根据有源相控阵天线T/R组件中发热器件的位置排布,从机电热耦合的角度出发,设计出一种能有效带走发热器件所产生热量且定量分析温度对结构变形和激励电流幅度、相位影响的冷板流道形式,来达到散热降温的目的,并实现冷板的通用性和高效性。

发明内容

[0005] 针对现有的有源相控阵天线的冷板设计方法存在的不足,本发明的目的在于提供一种基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法,指导有源相控阵天线的冷板设计,使有源相控阵天线在满足天线电性能、结构力学性能的前提下,达到改善温度分布、保障有效工作的目的。

[0006] 本发明是通过下述技术方案来实现的:

[0007] 基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法,包括下述步骤:

[0008] (1)根据有源相控阵天线T/R组件电路图,确定其中发热器件的参数;

[0009] (2)根据T/R组件中各发热器件的位置,设计冷板流道的拓扑形状;

[0010] (3)根据冷板流道的拓扑形状,确定流道截面的几何参数,建立有源相控阵天线冷板的几何模型;

[0011] (4)根据有源相控阵天线冷板的几何模型,建立有源相控阵天线的有限元模型;

[0012] (5)将有源相控阵天线的有限元模型结合制冷系统的特性参数,确定流体冷却参

数,计算有源相控阵天线的阵面温度场分布;

[0013] (6)根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差;

[0014] (7)根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差,计算有源相控阵天线的电性能,判断天线增益是否满足要求,若满足要求,即可得到最佳的有源相控阵天线冷板设计方案;否则,修改流道截面的几何参数,重复步骤(3)到(7),直至满足要求。

[0015] 所述步骤(1)中发热器件的参数包括功率放大器、驱动放大器、移相器和低噪声放大器LNA的位置、几何尺寸以及热功耗。

[0016] 所述步骤(2)中根据T/R组件中各发热器件的位置,设计冷板流道的拓扑形状,按照以下步骤进行:

[0017] (2a)根据T/R组件中各发热器件的位置,确定各发热器件几何中心点的坐标;

[0018] (2b)用三次B样条曲线对冷板上所有发热器件的中心点进行曲线拟合;

[0019] (2c)计算每相邻两发热器件中心点之间构成曲线的曲率,若计算出来的曲率大于这两点之间距离倒数的一半,则需在此两点间添加辅助点;若这两相邻发热器件中心点构成曲线并未经过该两点中的任意一点,则仍需在此两点间添加辅助点;将此两点的坐标记为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,辅助点的坐标记为 (x, y) ,则此三点的坐标关系满足下式

$$[0020] \quad \begin{cases} 2x = x_1 + x_2 \\ \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_1 + y_2}{2}\right)^2 = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \end{cases}$$

[0021] (2d)用三次B样条曲线对发热器件的中心点和添加的辅助点重新进行曲线拟合;

[0022] (2e)将拟合出的曲线初始端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道入口的几何中心位置,同样,将拟合出的曲线末端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道出口的几何中心位置,确定出完整的冷板流道的中心线,从而设计冷板流道的拓扑形状。

[0023] 所述步骤(3)中流道截面的几何参数包括流道截面的形状和尺寸。

[0024] 所述步骤(4)中有源相控阵天线的有限元模型,包括T/R组件外壳、发热器件、天线单元、加强筋和冷板的有限元模型。

[0025] 所述步骤(5)中冷却参数包括冷却液的类型、冷却液的入口温度、入口流速和出口静压。

[0026] 所述步骤(6)中根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差,按照以下步骤进行:

[0027] (6a)根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,计算有源相控阵天线由热引起的结构变形量,分别提取各个天线单元中心节点在 x, y, z 方向上的位置偏移量 $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$, m, n 分别表示有源相控阵天线M列、N行天线单元的编号;

[0028] (6b)根据各个天线单元中心节点位置偏移量,按以下公式计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi = & \frac{2\pi}{\lambda} \left(md_x + x_{m,n} - x_{1,1} \right) \sin\theta \cos\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \left(nd_y + y_{m,n} - y_{1,1} \right) \sin\theta \sin\varphi \\
 [0029] \quad & + \frac{2\pi}{\lambda} \left(z_{m,n} - z_{1,1} \right) \cos\theta
 \end{aligned}$$

[0030] 其中,有源相控阵天线共有 $M \times N$ 个天线单元等间距排列,单元间横向、纵向间距分别为 d_x 和 d_y , λ 是有源相控阵天线的工作波长, θ , φ 分别是远区电场目标点的俯仰角和方位角;

[0031] (6c)根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,提取出T/R组件中功率放大器的温度 T_G 和移相器的温度 T_P ;

[0032] (6d)根据T/R组件中功率放大器的温度 T_G ,按以下公式计算激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$

$$[0033] \quad \Delta I(T_G) = \begin{cases} 0 & -30 \leq T_G < 30 \\ -0.00179T_G + 1.0536 & 30 \leq T_G < 86; \\ 0.5^{\frac{T_G-86}{6}} - 0.15 & 86 \leq T_G < 90 \end{cases}$$

[0034] (6e)根据T/R组件中移相器的温度 T_P ,按以下公式计算激励电流相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$

$$[0035] \quad \Delta\varphi(T_P) = \begin{cases} 0.0008T_P^2 - 0.025T_P + 2.5 & -30 \leq T_P < 0 \\ -1/130T_P + 2.5 & 0 \leq T_P < 26 \\ 2.3 & 26 \leq T_P < 50。 \\ 0.03T_P + 0.8 & 50 \leq T_P < 70 \\ 2.9 & 70 \leq T_P < 90 \end{cases}$$

[0036] 所述步骤(7)计算有源相控阵天线的电性能,按照以下步骤进行:

[0037] (7a)根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$ 以及温度变化引起的激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$ 、相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$,按以下阵列天线机电热耦合公式计算有源相控阵天线的电场分布 $E(\theta, \varphi)$

$$[0038] \quad E(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} \cdot (1 + \Delta I(T_G)) \cdot e^{j[\varphi_0 + \Delta\varphi(T_P) + \Delta\varphi]}$$

[0039] 其中, f_{mn} 是天线单元在自由空间的方向图(这里所有天线单元相同), φ_0 是激励电流的初始相位;

[0040] (7b)根据有源相控阵天线的电场分布 $E(\theta, \varphi)$,按以下公式计算有源相控阵天线最大辐射方向上的增益Gain

$$[0041] \quad Gain = 10 \log_{10} \frac{4\pi [E(0,0)]^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} [E(\theta, \phi)]^2 \sin \theta d\theta d\phi}。$$

[0042] 本发明与现有技术相比,具有以下特点:

[0043] 1.本发明提供一种基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法,通过对有源相控阵天线进行建模计算得到其阵面温度分布,根据阵面温度分布,计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差,进而判断其增益是否满足要求。本方法提供了一种高效的基于器件位置的冷板对有源相控阵天线的散热方案,以保证其在工作状态下能够有效工作。

[0044] 2.本发明与传统的冷板设计方法相比,适用于任意一种发热器件位置排布的有源相控阵天线,尤其能够有效解决发热器件排布比较分散杂乱时的散热问题。它能够根据发热器件的位置,综合考虑工程实际中流道的曲率加工工艺,通过添加辅助点,用三次B样条曲线对发热器件的中心点和辅助点进行曲线拟合,设计出冷板流道的中心线,使其能够尽量通过发热器件中心点,从而使冷却液能够充分地带走发热器件产生的热量,具有很强的通用性和实际的工程意义。

[0045] 3.与传统的冷板设计方法相比,本发明冷板具有更好的散热能力,发热器件的最高温度更低,不仅能够有效对有源相控阵天线进行散热,还能够有效降低温度对结构变形和激励电流幅度、相位的影响,以保证有源相控阵天线的电性能。

附图说明

[0046] 图1是本发明基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法的流程图;

[0047] 图2是T/R组件中各个发热器件位置示意图;

[0048] 图3是未添加辅助点时拟合出的冷板流道中心线示意图;

[0049] 图4是冷板流道中心线示意图;

[0050] 图5是有源相控阵天线线阵的几何模型示意图;

[0051] 图6是有源相控阵天线线阵的有限元模型示意图;

[0052] 图7是有源相控阵天线线阵的温度场分布云图;

[0053] 图8是有源相控阵天线阵面的位移分布云图;

[0054] 图9是有源相控阵天线线阵的增益方向图。

[0055] 图5中序号分别表示:1.天线单元;2.四通道T/R组件;3.冷板;4.冷却液流道;5.冷却液流道入口;6.冷却液流道出口。

具体实施方式

[0056] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步说明。

[0057] 参照图1所示,本发明基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法,步骤如下:

[0058] 步骤1,确定发热器件的参数

[0059] 根据有源相控阵天线T/R组件电路图,确定其中发热器件的参数。发热器件的参数

包括T/R组件中功率放大器、驱动放大器、移相器和低噪声放大器LNA的位置、几何尺寸以及热功耗。

[0060] 步骤2,根据器件位置设计冷板流道拓扑形状

[0061] 设计冷板流道的拓扑形状,按照以下步骤进行:

[0062] (2a)根据T/R组件中各发热器件的位置与几何尺寸,确定各发热器件几何中心点的坐标;

[0063] (2b)在Matlab中输入个发热器件几何中心点坐标,用三次B样条曲线对冷板上所有发热器件的中心点进行曲线拟合;

[0064] (2c)计算每相邻两发热器件中心点之间构成曲线的曲率,若计算出来的曲率大于这两点之间距离倒数的一半,则需在此两点间添加辅助点;若这两相邻发热器件中心点构成曲线并未经过该两点中的任意一点,则仍需在此两点间添加辅助点。将此两点的坐标记为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,辅助点的坐标记为 (x, y) ,则此三点的坐标关系满足下式

$$[0065] \quad \begin{cases} 2x = x_1 + x_2 \\ \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_1 + y_2}{2}\right)^2 = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \end{cases}$$

[0066] (2d)用三次B样条曲线对发热器件的中心点和添加的辅助点重新进行曲线拟合;

[0067] (2e)将拟合出的曲线初始端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道入口的几何中心位置,同样,将拟合出的曲线末端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道出口的几何中心位置,确定出完整的冷板流道的中心线,从而设计冷板流道的拓扑形状。

[0068] 步骤3,确定冷板几何模型

[0069] 根据冷板流道的拓扑形状,确定流道截面的几何参数,建立有源相控阵天线冷板的几何模型。其中流道截面的几何参数包括流道截面的形状和尺寸。

[0070] 步骤4,建立有源相控阵天线有限元模型

[0071] 根据有源相控阵天线冷板的Pro/E几何模型,将其和T/R组件外壳、冷板、发热器件、加强筋、天线单元的几何模型进行装配,建立有源相控阵天线冷板的几何模型。将有源相控阵天线冷板的几何模型导入CFX软件的ICEM CFD模块中进行网格划分,建立有源相控阵天线的有限元模型。其中有源相控阵天线的有限元模型,包括T/R组件外壳、发热器件、天线单元、加强筋和冷板的有限元模型。

[0072] 步骤5,计算有源相控阵天线阵面温度场分布

[0073] 将有源相控阵天线的有限元模型结合制冷系统的特性参数,确定流体冷却参数,计算有源相控阵天线的阵面温度场分布。其中冷却参数包括冷却液的类型、冷却液的入口温度、入口流速和出口静压。

[0074] 确定有源相控阵天线线阵的有限元模型的各部分物性参数,在CFX-Pre中设置有源相控阵天线线阵的发热边界条件和流体的冷却参数,在CFX-Solver中计算有源相控阵天线线阵的温度场分布,并在CFX-Post中提取功率放大器和移相器的温度分别记为 T_G 和 T_P 。

[0075] 步骤6,计算结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差

[0076] 根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差,按照以下步骤进行:

[0077] (6a)根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,计算有源相控阵天线由热引起的结构变形量,分别提取各个天线单元中心节点在 x, y, z 方向上的位置偏移量 $(x_{m,n}, y_{m,n}, z_{m,n})$, m, n 分别表示有源相控阵天线 M 列、 N 行天线单元的编号;

[0078] (6b)根据各个天线单元中心节点位置偏移量,按以下公式计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$

$$[0079] \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(md_x + x_{m,n} - x_{1,1} \right) \sin\theta \cos\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \left(nd_y + y_{m,n} - y_{1,1} \right) \sin\theta \sin\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \left(z_{m,n} - z_{1,1} \right) \cos\theta$$

[0080] 其中,有源相控阵天线共有 $M \times N$ 个天线单元等间距排列,单元间横向、纵向间距分别为 d_x 和 d_y , λ 是有源相控阵天线的工作波长, θ, φ 分别是远区电场目标点的俯仰角和方位角;

[0081] (6c)根据有源相控阵天线的阵面温度场分布,提取出T/R组件中功率放大器的温度 T_G 和移相器的温度 T_P ;

[0082] (6d)根据T/R组件中功率放大器的温度 T_G ,按以下公式计算激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$

$$[0083] \quad \Delta I(T_G) = \begin{cases} 0 & -30 \leq T_G < 30 \\ -0.00179T_G + 1.0536 & 30 \leq T_G < 86 \\ 0.5^{\frac{T_G-86}{6}} - 0.15 & 86 \leq T_G < 90 \end{cases};$$

[0084] (6e)根据T/R组件中移相器的温度 T_P ,按以下公式计算激励电流相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$

$$[0085] \quad \Delta\varphi(T_P) = \begin{cases} 0.0008T_P^2 - 0.025T_P + 2.5 & -30 \leq T_P < 0 \\ -1/130T_P + 2.5 & 0 \leq T_P < 26 \\ 2.3 & 26 \leq T_P < 50 \\ 0.03T_P + 0.8 & 50 \leq T_P < 70 \\ 2.9 & 70 \leq T_P < 90 \end{cases}.$$

[0086] 步骤7,计算有源相控阵天线的电性能

[0087] 根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差以及温度变化引起的激励电流幅度误差、相位误差,计算有源相控阵天线的电性能,按照以下步骤进行:

[0088] (7a)根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$ 以及温度变化引起的激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$ 、相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$,按以下阵列天线机电热耦合公式计算有源相控阵天线的电场分布 $E(\theta, \varphi)$

$$[0089] \quad E(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f_{mn} \cdot (1 + \Delta I(T_G)) \cdot e^{j[\varphi_0 + \Delta\varphi(T_P) + \Delta\varphi]}$$

[0090] 其中, f_{mn} 是天线单元在自由空间的方向图(这里所有天线单元相同), φ_0 是激励电流的初始相位;

[0091] (7b) 根据有源相控阵天线的电场分布 $E(\theta, \phi)$, 按以下公式计算有源相控阵天线最大辐射方向上的增益 Gain

$$[0092] \quad Gain = 10 \log_{10} \frac{4\pi [E(0,0)]^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} [E(\theta, \phi)]^2 \sin\theta d\theta d\phi}$$

[0093] 步骤8, 判断增益是否满足要求

[0094] 根据有源相控阵天线的电性能, 判断天线增益是否满足要求, 若满足要求, 即可得到最佳的有源相控阵天线冷板设计方案; 否则, 修改流道截面的几何参数, 重复步骤(3)到(7), 直至满足要求。

[0095] 本发明可以通过以下仿真实验进一步说明:

[0096] 1. 确定有源相控阵天线线阵参数

[0097] 为验证基于器件位置的有源相控阵天线冷板机电热耦合设计方法的正确性, 先将基于器件位置的有源相控阵天线冷板应用于X波段9.375GHz的有源相控阵天线线阵。冷板、T/R外壳、加强筋和天线单元的材料为铝, 发热器件的材料为砷化镓, 冷却液的类型为水。

[0098] 表1铝、砷化镓、水的物性参数

[0099]

	热传导率(W/m·K)	比热容(J/kg·K)	密度(kg/m ³)
铝	217.7	880	2700
砷化镓	45	325	5330
水	0.593	4182.6	1000

[0100] 8个天线单元等间距排列组成有源相控阵天线线阵, 即 $M=8, N=1$, 取有源相控阵天线工作波长 $\lambda=32\text{mm}$, 各天线单元的间距 $d_x=0.5\lambda=16\text{mm}$, $d_y=0\text{mm}$ 。

[0101] 2. 计算有源相控阵天线线阵阵面的温度场分布

[0102] 有源相控阵天线线阵阵面温度场分布可以通过以下五步得到:

[0103] (1) 确定发热器件的参数

[0104] 根据有源相控阵天线T/R组件电路图, 确定其中发热器件的参数。T/R组件中发热器件包括功率放大器、驱动放大器、移相器和低噪声放大器LNA。功率放大器的尺寸为 $3.5 \times 3.4 \times 0.5\text{mm}$, 热功耗为3.2W, 驱动放大器的尺寸为 $2.7 \times 1.8 \times 0.5\text{mm}$, 热功耗为0.8W, 移相器的尺寸为 $2.1 \times 1.5 \times 0.5\text{mm}$, 热功耗为0.25W, 低噪声放大器的尺寸为 $2.4 \times 2.1 \times 0.5\text{mm}$, 热功耗为0.35W。T/R组件中各个发热器件位置如图2所示。

[0105] (2) 根据器件位置设计冷板流道拓扑形状

[0106] 设计冷板流道的拓扑形状,按照以下步骤进行:

[0107] (2a)根据发热器件的位置,确定各发热器件几何中心点的坐标。将冷板外框的左下角设为坐标原点,得到低噪声放大器的中心点坐标分别为(14,53.25),(31,53.25),(48,53.25),(65,53.25),(83,53.25),(100,53.25),(117,53.25),(134,53.25);移相器的中心点坐标分别为(14,74.5),(31,74.5),(48,74.5),(65,74.5),(83,74.5),(100,74.5),(117,74.5),(134,74.5);功率放大器的中心点坐标分别为(23.5,73),(40.5,73),(57.5,73),(74.5,73),(92.5,73),(109.5,73),(126.5,73),(143.5,73);驱动放大器的中心点坐标分别为(23.5,60.35),(40.5,60.35),(57.5,60.35),(74.5,60.35),(92.5,60.35),(109.5,60.35),(126.5,60.35),(143.5,60.35);

[0108] (2b)在Matlab中输入各发热器件几何中心点坐标,用三次B样条曲线对冷板上所有发热器件的中心点进行曲线拟合,得到未添加辅助点时拟合出的冷板流道中心线示意图如图3,将此曲线分为如图中所示的31段;

[0109] (2c)计算每相邻两发热器件中心点之间构成曲线的曲率,计算出来第4、8、12、16、20、24、28段曲线的曲率大于这两点之间距离倒数的一半,所以需要在构成此7段曲线的两发热器件中心点中间添加7个辅助点;

[0110] 从图3中可以看出,第2、6、10、14、18、22、26、30段曲线并未经过构成该段曲线的两发热器件中心点中的任意一点,则仍需要在构成此8段曲线的两发热器件中心点中间添加8个辅助点。

[0111] 按以下公式计算辅助点的坐标。针对添加辅助点的某段曲线,将构成这段曲线的两发热器件中心点的坐标记为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,辅助点的坐标记为 (x, y) ,则此三点的坐标关系满足下式

$$[0112] \quad \begin{cases} 2x = x_1 + x_2 \\ \left(x - \frac{x_1 + x_2}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_1 + y_2}{2}\right)^2 = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2] \end{cases}$$

[0113] 计算出需要添加的15个辅助点按照横坐标从小到大的顺序排列,其坐标分别为(18.75,80.55),(27.25,64.10),(35.75,80.55),(44.25,64.10),(52.75,80.55),(61.25,64.10),(69.75,80.55),(78.25,64.10),(87.75,80.55),(96.25,64.10),(104.75,80.55),(113.25,64.10),(121.75,80.55),(130.25,64.10),(138.75,80.55);

[0114] (2d)用三次B样条曲线对发热器件的中心点和添加的辅助点重新进行曲线拟合;

[0115] (2e)将拟合出的曲线初始端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道入口的几何中心位置坐标为(14,0),同样,将拟合出的曲线末端用与该点处切线斜率相同的直线与冷板边缘相交确定流道出口的几何中心位置坐标为(143.5,0),这样就可以确定出完整的冷板流道的中心线,从而设计冷板流道的拓扑形状,得到冷板流道中心线如图4所示。

[0116] (3)确定冷板几何模型

[0117] 根据冷板流道的拓扑形状,确定流道截面的几何参数,建立有源相控阵天线冷板的几何模型。其中流道截面形状为矩形,尺寸为2.5mm×3.5mm。

[0118] (4)建立有源相控阵天线有限元模型

[0119] 根据有源相控阵天线冷板的几何模型,建立有源相控阵天线的有限元模型。其中有源相控阵天线的有限元模型,包括T/R组件外壳、发热器件、天线单元、加强筋和冷板的有限元模型。

[0120] 本发明根据有源相控阵天线冷板流道的设计方案,在Pro/E中确定冷板流道几何模型;建立四通道T/R组件的几何模型,并将2个相同的四通道T/R组件2与冷板3、冷却液流道4、加强筋以及8个天线单元1的几何模型进行装配,建立有源相控阵天线线阵的几何模型如图5所示,5为冷却液流道入口,6为冷却液流道出口。四通道T/R组件2从左到右依次命名为T/R组件1、T/R组件2,天线单元1从左到右依次命名为天线单元1'、天线单元2'……天线单元7'、天线单元8',四通道T/R组件2中的功率放大器从左到右依次命名为功放1、功放2……功放7、功放8,T/R组件中的移相器从左到右依次命名为移相器1、移相器2……移相器7、移相器8。在ICEM_CFD中对有源相控阵天线线阵的几何模型划分网格,建立有源相控阵天线线阵的有限元模型如图6所示。

[0121] (5)计算有源相控阵天线阵面温度场分布

[0122] 将有源相控阵天线的有限元模型结合制冷系统的特性参数,确定流体冷却参数,计算有源相控阵天线的阵面温度场分布。其中冷却参数包括冷却液的类型、冷却液的入口温度、入口流速和出口静压。

[0123] 确定有源相控阵天线线阵的有限元模型各部分物性参数,在CFX-Pre中设置有源相控阵天线线阵的发热边界条件和流体的冷却参数,冷却液入口温度为35℃,入口流速为0.8m/s,出口静压为0Pa,收敛残差设置为 10^{-5} ;迭代步长设置为150步。在CFX-Solver中计算有源相控阵天线线阵的温度场分布,得到有源相控阵天线线阵的温度场分布云图如图7,在CFX-Post中提取出各个功率放大器和移相器的温度值如下表:

[0124] 表2各个功率放大器和移相器的温度值

[0125]

功放编号	1	2	3	4	5	6	7	8
温度/ °C	40.83	40.96	41.18	41.26	41.46	41.48	41.57	41.79
移相器编号	1	2	3	4	5	6	7	8
温度/ °C	37.56	37.86	38.04	38.21	38.35	38.51	38.64	38.73

[0126] 3.设计结果

[0127] 根据以上步骤计算得到的有源相控阵天线的阵面温度场分布,在ANSYS中通过网格节点插值匹配、施加温度场分布计算有源相控阵天线线阵由热引起的结构变形量,得到有源相控阵天线阵面的位移分布云图如图8,分别提取各个天线单元中心节点在x,y,z方向上的位置偏移量($x_{m,1}, y_{m,1}, z_{m,1}$)如下表:

[0128] 表3天线单元中心节点位置偏移量(单位:mm)

[0129]

M	1	2	3	4	5	6	7	8
$x_{m,1}$	0.0010	0.0010	0.0008	0.0004	0.0000	-0.0004	-0.0008	-0.0009
$y_{m,1}$	0.0000	0.0003	-0.0002	-0.0003	-0.0003	-0.0003	-0.0002	0.0000
$z_{m,1}$	0.0036	0.0039	0.0036	0.0037	0.0037	0.0037	0.0036	0.0037

[0130] 根据各个天线单元中心节点位置偏移量,按以下公式计算有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (md_x + x_{m,1} - x_{1,1}) \sin\theta \cos\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (y_{m,1} - y_{1,1}) \sin\theta \sin\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (z_{m,1} - z_{1,1}) \cos\theta$$

[0132] 根据各个功率放大器和移相器的温度值,计算出每个天线单元上激励电流的幅度误差 $\Delta I(T_G)$ 、相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$ 如下表所示:

[0133] 表4各个天线单元上激励电流的幅度误差、相位误差值

[0134]

天线单元编号	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
幅度误差/dB	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
相位误差/°	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3

[0136] 根据有源相控阵天线结构变形引起的相位误差 $\Delta\varphi$ 以及温度变化引起的激励电流幅度误差 $\Delta I(T_G)$ 、相位误差 $\Delta\varphi(T_P)$,在机电热耦合公式中计算有源相控阵天线线阵的电场分布 $E(\theta, \varphi)$,然后计算出有源相控阵天线最大辐射方向上的增益 $\text{Gain}=8.85\text{dB}$,得到的有源相控阵天线线阵的增益方向图如图9所示。

[0137] 计算理想情况下的有源相控阵天线最大辐射方向上的增益 $\text{Gain}=9.03\text{dB}$,可得出该工作状态下的有源相控阵天线线阵的增益损失为 0.18dB ,满足工程上对于增益损失小于 0.5dB 的要求。上述仿真数值试验证明,采用本发明可以根据机电热耦合思想设计出基于器件位置的有源相控阵天线冷板方案,有效带走发热器件所产生热量且定量分析温度变化对结构变形和激励电流幅度、相位的影响。

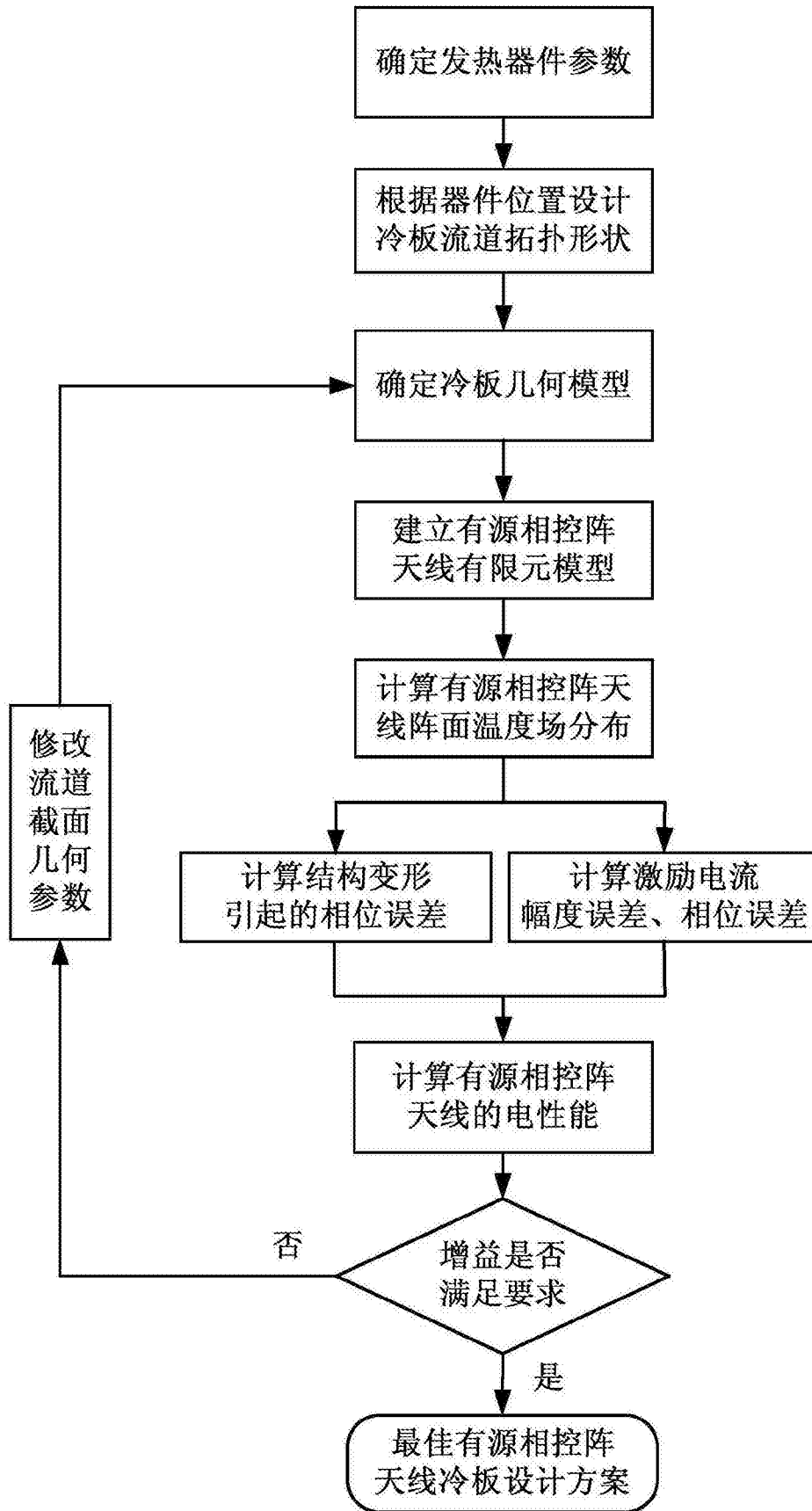


图1

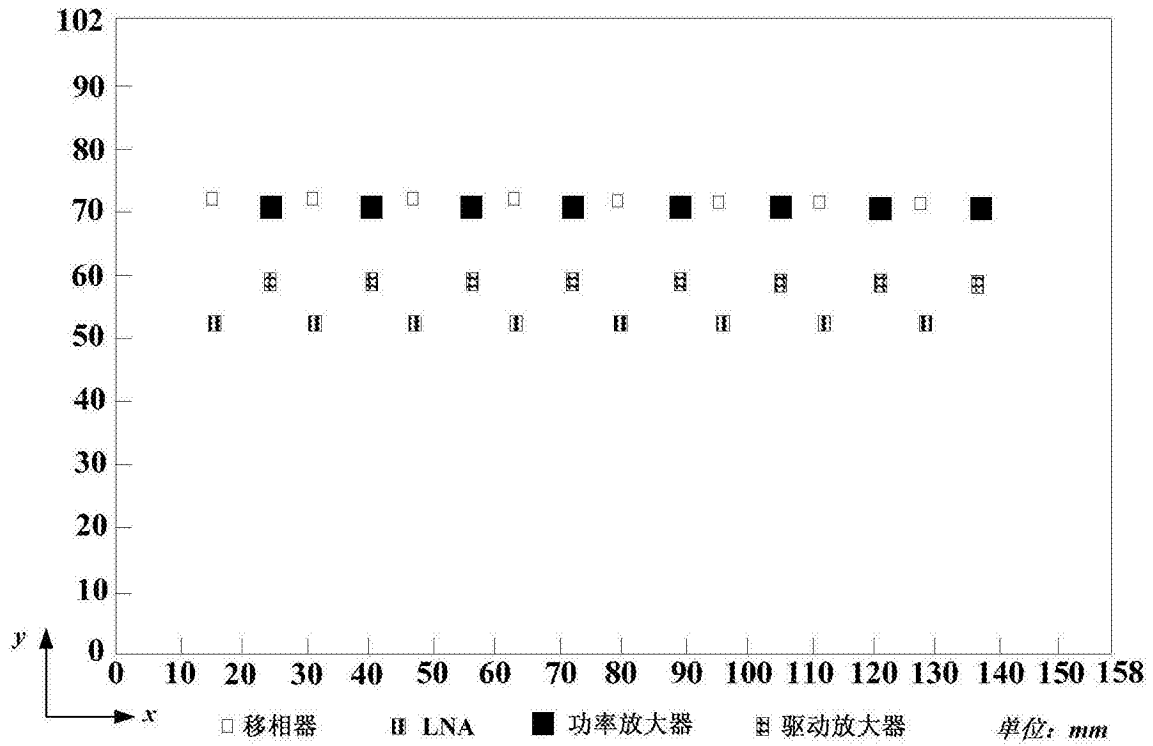


图2

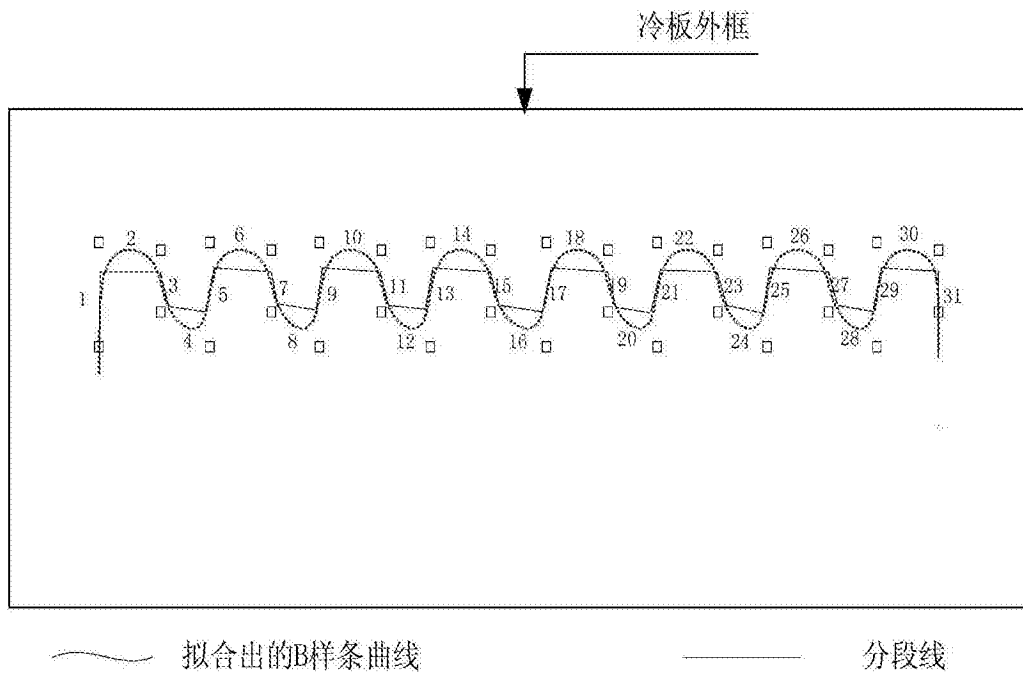


图3

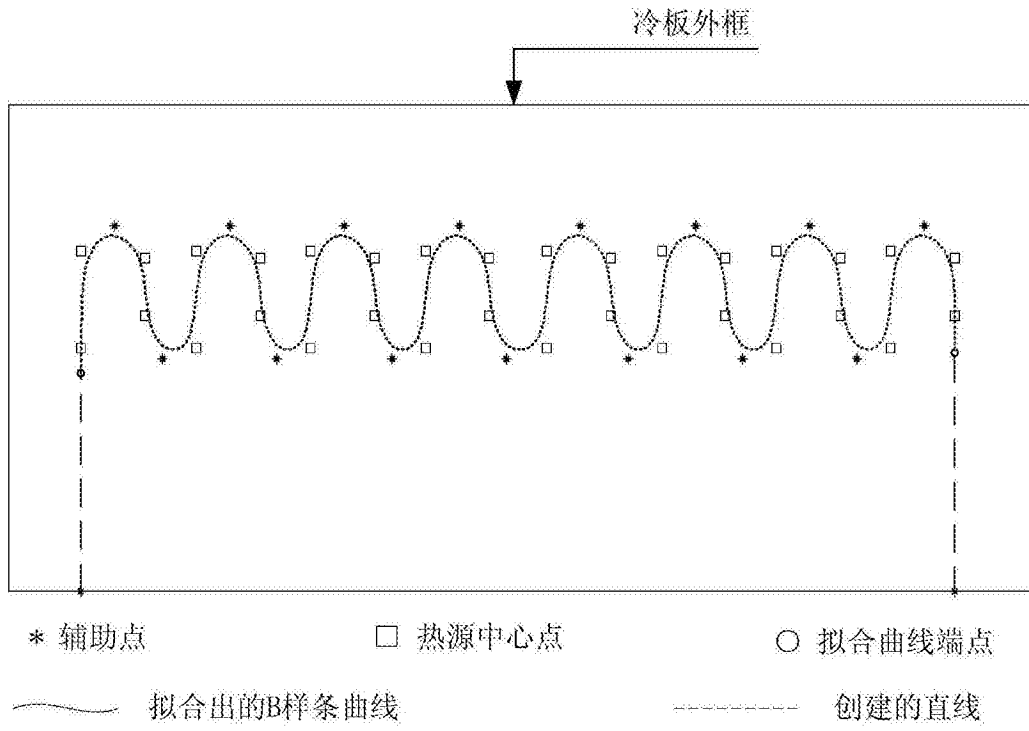


图4

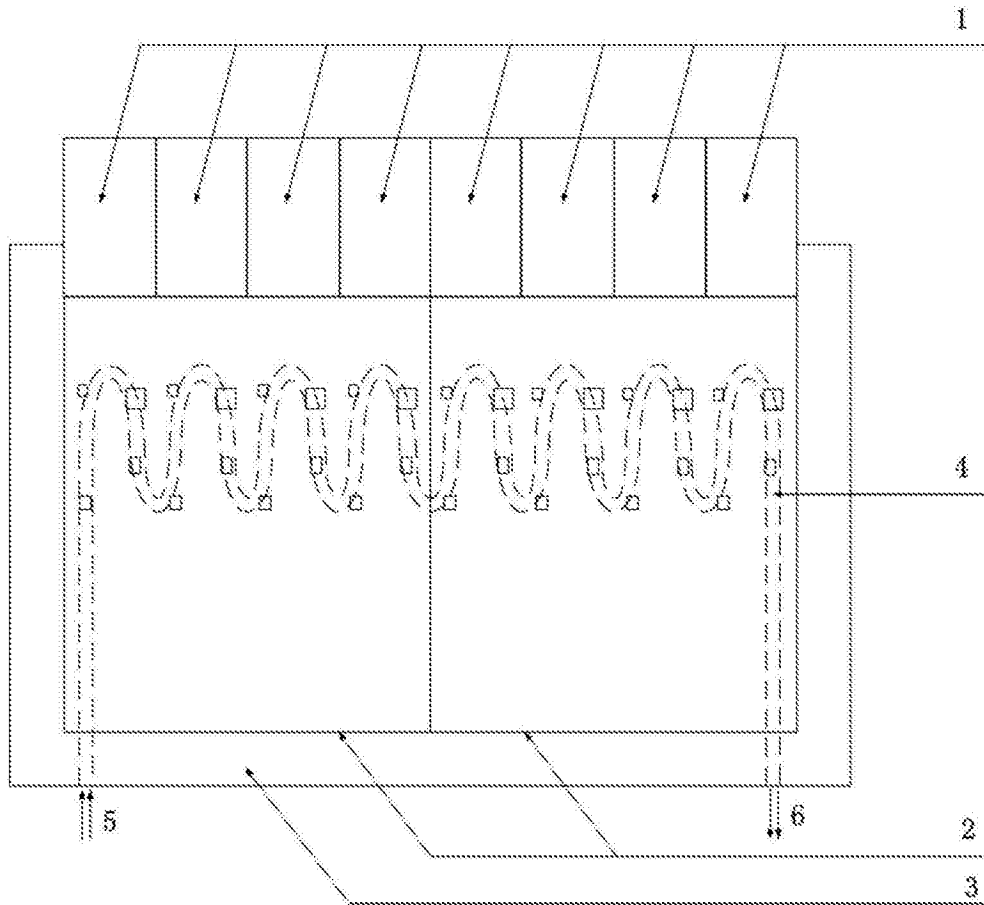


图5

ANSYS

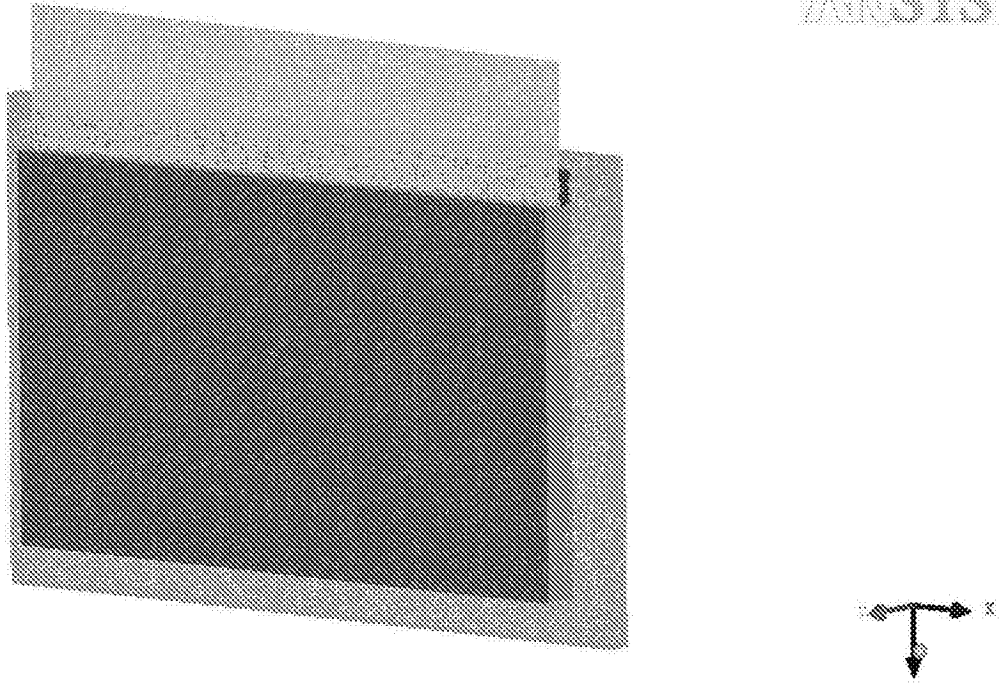


图6

ANSYS

Temperature
Contour 1

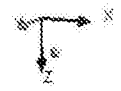
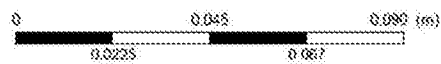
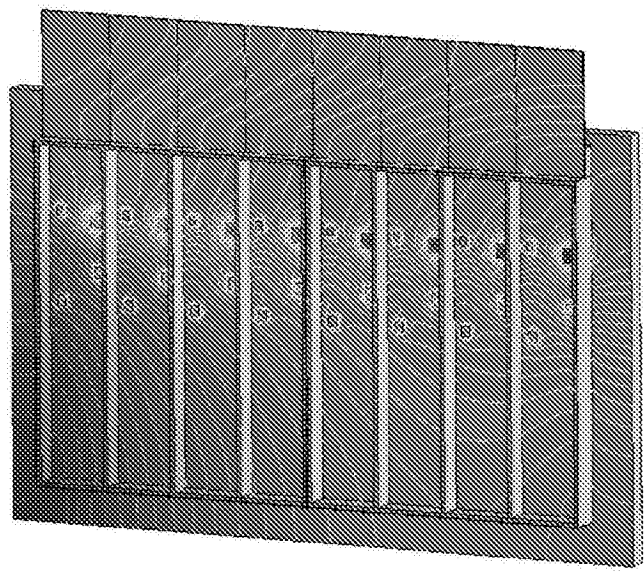
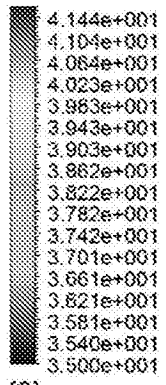


图7

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.445E-05
SMX =.445E-05

ANSYS
FEB 26 2014
13:44:19

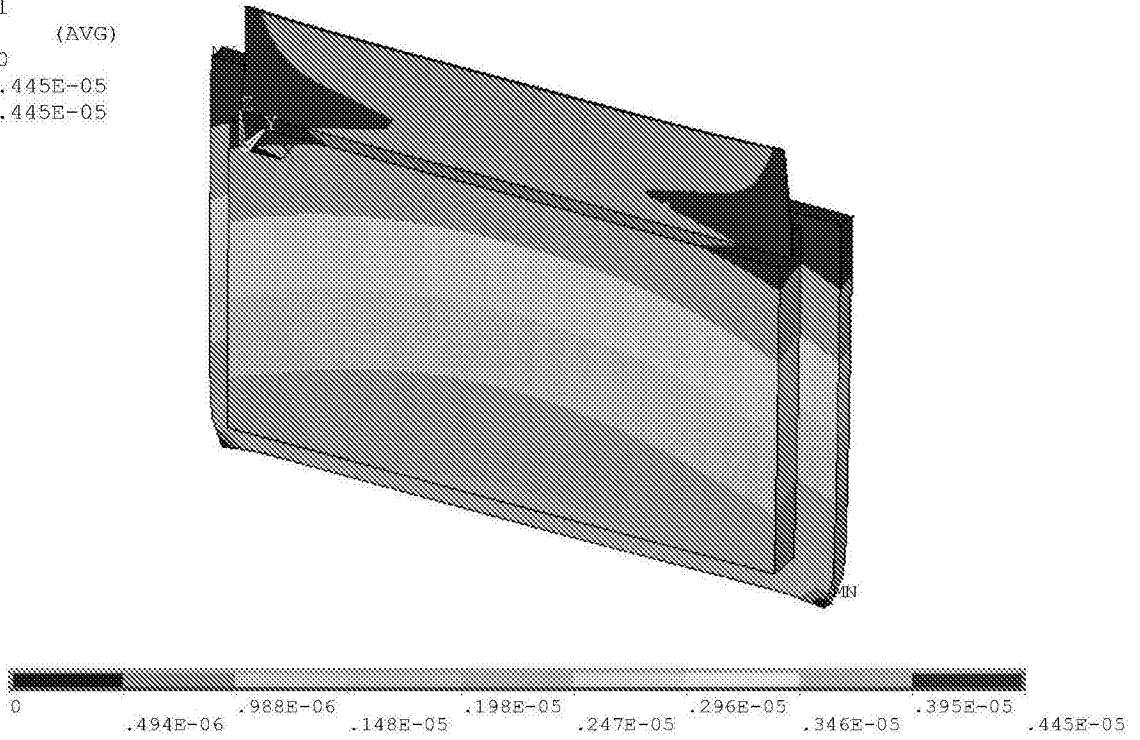


图8

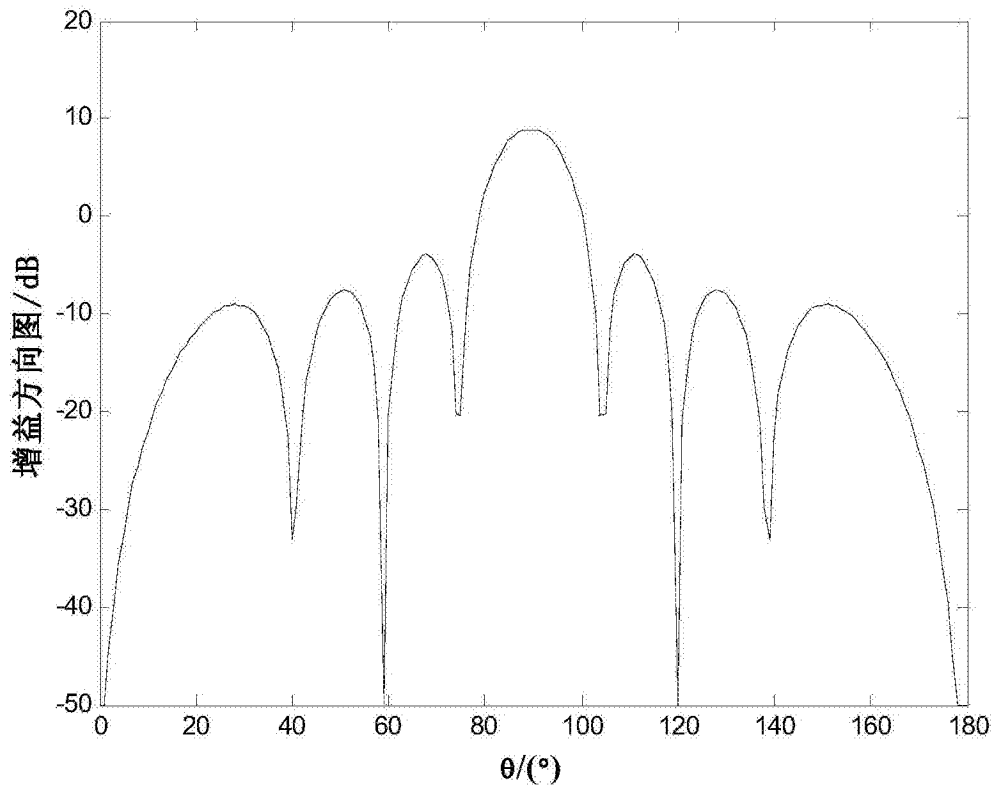


图9