

非交叉馈电的印刷对数周期天线的频域特性

1 引言

对数周期天线是一种离散天线阵列结构，具有自相似的特点，它的电性能随着频率的对数做周期性的重复，所以也被称为频率无关天线，具有超宽带特性。该天线自 1957 年被 r. h. duhamel 提出，先后出现了面齿对数周期天线、梯齿对数周期天线、线梯形对数周期天线等多种形式，现在普遍应用的是对数周期偶极天线，采用圆柱形振子制成，具有较大的体积和重量。自 20 世纪 70 年代以来，随着印刷电路技术的发展，出现了平面型的印刷对数周期天线，该类天线具有剖面低、重量轻以及易于制作和集成的优点，从而获得了广泛的应用。但是传统的对数周期天线的馈电均采用从短振子端（辐射端）进行交叉馈电的方法，这种馈电方法多数要采用同轴线，从而使天线与电路的集成受到了很大限制。采用半模基片集成波导馈电，实现了从长振子一端馈电，使得天线更易于集成，但是也采用了交叉馈电的方法。

本文提出了一种非交叉馈电的、从长振子一端的集合线直接馈电的印刷型对数周期天线，为了测试方便，对集合线的馈电采用了 sma 型同轴接头。设计了一个过渡结构以保证 sma 型同轴接头对集合线的馈电是平衡的。所有的振子分支均印刷在介质基片的一侧，其中一半的分支与印刷在介质基片另一侧的集合线分支通过金属化的过孔相连接，以保证振子的对称性。

2 天线结构

天线的结构如图 1 所示，其中介质板上表面印刷了所有的 10 副对称振子和一条集合线分支，集合线的另一分支印刷在介质下表面，通过金属化的过孔与上表面的 10 个振子分支相连接。整个天线的主要参数为集合线宽度 w 、对称振子数目 n 、最大对称振子的分支长度 l 、天线的间隔因子 σ 以及比例因子 τ 。这些参数主要依靠文献[1]和[5]提供的公式（1）- 公式（4）进行计算获得初值，然后通过软件仿真获得最终符合要求的最终结果。天线的参数最终结果列在表 1 中。

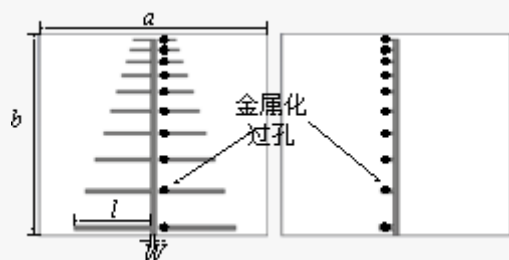


图 1 非交叉馈电印刷对数周期天线示意图

$$\tau = \frac{l_n}{l_{n-1}} = \frac{w_n}{w_{n-1}} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{d_n}{4l_n} \quad (2)$$

$$l_1 = \frac{c}{4f_{\min} \sqrt{\epsilon_e}} \quad (3)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w_1}} \quad (4)$$

表 1 天线参数的优化结果

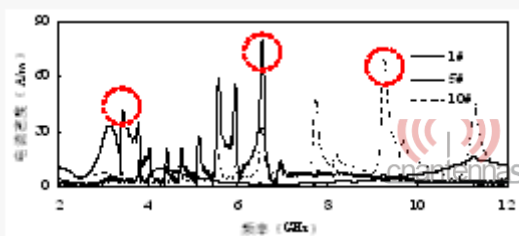
参数	数值
介质板长度 a	40mm
介质板宽度 b	35.5mm
介质板厚度 h	1 mm
介质板相对介电常数 ϵ_r	4.4
集合线宽度 w	1 mm

对称振子数目 n	10
间隔因子 σ	0.12
比例因子 τ	0.85
最大振子分支长度 l	13.4mm
最大振子分支宽度 w	0.8mm

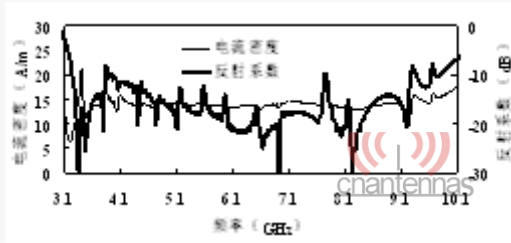
3 仿真分析

所设计的对数周期天线在频域的特性主要有超宽带特性和定向辐射特性。可以从天线金属的表面电流的仿真结果对上述两个特性的产生机理进行解释。3.1 宽带特性分析

通过对印刷在介质基片正面的 10 副对称振子的馈电点处的电流密度进行仿真，取 1、5、10 号三个典型振子的馈电电流进行分析，如图 2(a)所示。三个对称振子的谐振频率分别为 3.4ghz、6.3ghz、9.5ghz，频率跨度很大，如果振子的数目足够并且间距适当，必然会使天线成为超宽频带的天线，本文天线的振子数目为 10 个，最终天线馈电处的电流就形成了如图 2(b)所示的具有超宽频带的电流，从而使天线的反射系数在超宽频带内（3.23–9.84ghz）低于-10db，如图 2(b)所示。



(a) 振子表面电流

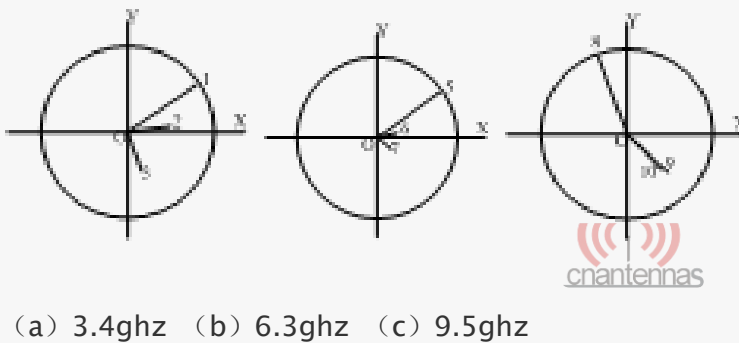


(b) 集合线表面电流

图 2 天线金属表面电流仿真结果

3.2 定向辐射特性分析

通过对印刷在介质基片正面的 10 副对称振子的馈电点处的电流密度进行仿真，根据仿真结果绘制了 3 个频点处的各个对称振子的馈电幅度（归一化后）值和相位值，如图 3 所示。

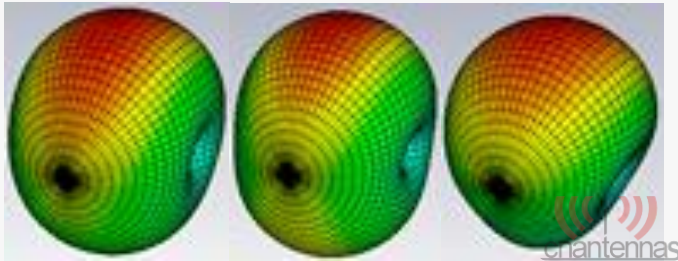


(a) 3.4ghz (b) 6.3ghz (c) 9.5ghz

图 3 3 个频点处的各个对称振子的馈电幅度和相位

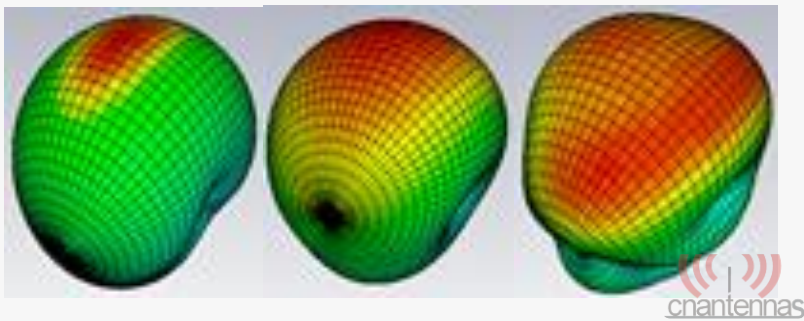
图 3(a)表明，在 $f_1=3.4\text{ghz}$ 处，按照电流幅度值由大到小排列，前三位是 1-3 号振子，也就是较长的三个振子，将这三个振子的电流密度用相量表示，则 1-3 号振子的相位依次减小。同样地，在 $f_2=6.3\text{ghz}$ 和 $f_3=9.5\text{ghz}$ 的典型频率处有类似的规律。电流幅度前三位的振子辐射就可以基本上描述整个 10 个对称振子所组成的天线阵的辐射规律。由于振子的序号越大，则其上的电流相位越小，则根据天线阵的理论可以说明天线的辐射是向着短振

子一端辐射。图 4-图 5 给出了三个主要振子所组成的天线阵的和数周期天线在相应的典型频点处的辐射方向图的仿真结果,说明对数周期天线在工作频带内的固定频点处的辐射特性可以用谐振于这个频点附近的三个主要对称振子所组成的阵列等效计算。这样就解释了本文所设计的非交叉馈电的印刷型对数周期天线的辐射机理。



(a) 3.4ghz (b) 6.3ghz (c) 9.5ghz

图 4 等效阵列辐射方向图



(a) 3.4ghz (b) 6.3ghz (c) 9.5ghz

图 5 对数周期天线辐射方向图 4 实验结果

根据仿真所得到的天线参数制作了一个天线样机(图 6),并在微波暗室内用 agilent e8363b 型矢量网络分析仪进行了测试,测试内容包括反射系数、方向图和增益,测试结果列于图 7-图 9 及表 2 中。测试结果表明,天线在 3.1-10.6ghz 的频率范围内的反射系数低于-10db,与仿真所得到的 3.23-9.84ghz 略有差异;增益测试结果比仿真结果要小 1db;方向图的测试结果在主瓣范围内与仿真结果相差不大,而副瓣相差较大。总体来说,

天线满足 **uwb** 通信的技术指标。造成实验结果和仿真结果差异较大的原因是：（1）印刷基片采用的是普通的 **fr-4** 型板，这种材料的损耗是较大的，其损耗正切约为 10^{-2} 量级，远大于常用的 **rogers** 系列的材料（ 10^{-4} 量级），所导致的能量损耗会使得天线的反射系数和增益下降；（2）天线焊接的影响以及天线方向图测试夹具的影响会影响天线方向图副瓣电平的测试结果，并且 **fr-4** 材料的不稳定性也会影响天线方向图的测试结果。



(a) 天线样机图 (b) 馈电结构图

图 6 天线样机及平衡馈电结构图

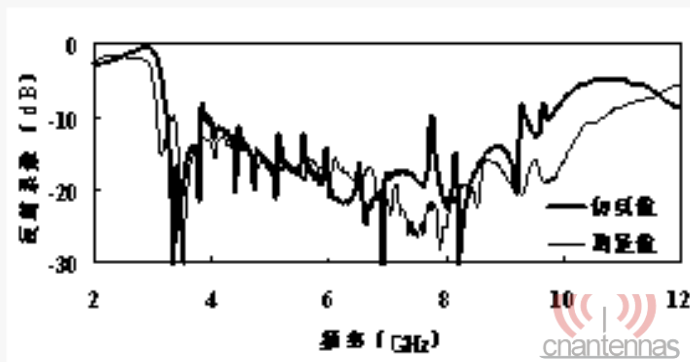
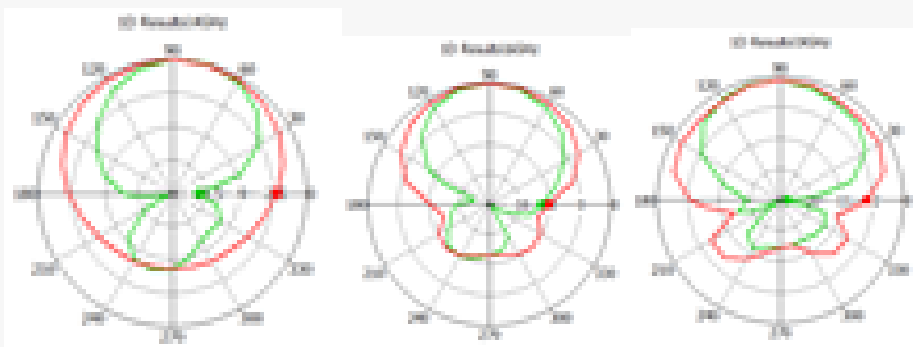
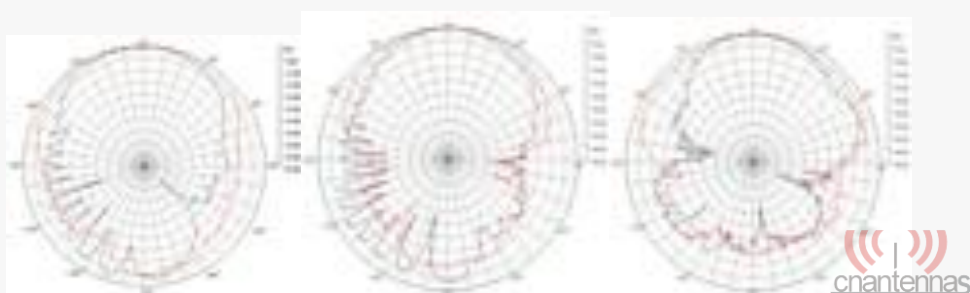


图 7 天线反射系数测试结果



(a) 4ghz (b) 6ghz (c) 9ghz

图 8 天线方向图仿真结果



(a) 4ghz (b) 6ghz (c) 9ghz

图 9 天线方向图测试结果

表 2 天线增益

频率 (ghz)	3	5	7	9
仿真结果 (db)	1.4	6.8	8.1	6.1
测试结果 (db)	0.5	5.5	6.7	4.5

在天线样机的制作中, 需要注意的是 sma 同轴接头馈电的平衡-不平衡转换问题, 文中对于 sma 接头的焊接如图 6 (b) 所示, 同轴接头与集合线的焊点是一个渐变的图形, 这样

就可以使给印刷对数周期天线馈电的结构为同轴线-渐变准微带线-集合线（平衡微带线），从而使馈电达到平衡。

5 结论

提出了一种非交叉馈电的印刷对数周期天线，通过软件仿真分析了天线金属的表面电流，解释了天线具有超宽频带的原因；并且根据表面电流的仿真结果，提出了与该印刷型对数周期天线具有等效辐射特性的独立馈电的对称振子天线阵列模型，解释了天线的辐射特性。实验结果表明，该天线可以工作于 3.1-10.6ghz 的频率范围内，工作频带内的增益典型值为 6db，可以应用于 uwb 领域，另外，该天线所采用的非交叉馈电以及从长振子一侧馈电的方法可以不引入同轴线，因此可以广泛适用于毫米波以及集成电路系统中的天线设计领域