

一维光子晶体对 TD - SCDMA 定向天线 性能改善的理论分析

湖南移动通信公司岳阳分公司 张长青

引言：

光子晶体（photonic crystals 简称：PC）是八十年代末提出的新概念和新型人造材料^[1,2]。它一出现就取得了异常发展，因为这种几乎都是人造的新型材料有一个显著的特点，这就是它可以如人们所愿望的那样控制光子和电磁波的运动方向^[3-5]，就像电子在半导体晶体中一样。由于这种独特的控制特性，光子晶体可以制作成全新原理或以前完全不能制作的高性能的光学器件和通讯器件，尤其是在光通讯等现代高新技术方面有着重要的应用前景。TD - SCDMA 智能定向天线是我国具有自主知识产权的 3G 移动通信的重要部件，是一种安装在室外的移动无线接入系统基站的天线阵列，它通过一组带可编程电子相位关系的固定天线单元，获取基站和移动台之间各个链路的方向特性，使无线电信号导向具体的方向，产生空间定向波束使天线主波束对准用户信号到达的方向，而共旁瓣或零陷对准干扰信号到达的方向，从而达到高效利用移动用户信号并消除或抑制干扰信号的目的。目前普遍应用在 TD - SCDMA 系统的定向天线在其振子组背后都有一块反射板，目的就是尽可能地保证振子产生的电磁波向指定方向辐射。如果将振子组背后的反射板改为一维没有吸收损耗的非金属介质的光子晶体，既可以避免因金属吸收损耗带来的反射效率降低，更可以利用光子晶体的特殊性能提高反射效率，改善天线辐射电磁波的环境。下面我们就从 TD - SCDMA 天线结构出发，利用一维光子晶体的特征矩阵法全面分析一维光子晶体的反射特性，从而证明采用指定的几何尺寸和介质折射率，就可以保证在 TD - SCDMA 工作波长范围内的高反射率。

一、TD - SCDMA 天线架构简介

目前应用于 TD - SCDMA 中的智能天线是一种由多个阵元组成的阵列天线元组，分别是 8 个、6 个和 4 个天线阵元的组合形式，各阵元间距一般取半个波长或小于半个波长，组合简图如图 1 所示。

其中的定向智能天线是平板结构，主要包括反面的金属反射板、若干辐射单元列组成的辐射列阵振子、并联馈电、校准网络、屏蔽盖、射频接头和天线罩等。

阵列天线中的振子的设计，一般采用半波对称振子，使用线路板馈电网络，校准采样多使用耦合方式，外罩则用玻璃钢材料。由于 TD - SCDMA 的工作频率范围是 1880 ~ 2025 MHz，因此这种半波对称振子的长度可以根据下面公式得到：

$$\text{中心频率} = \sqrt{\text{上限频率} \times \text{下限频率}} = \sqrt{1880 \times 2025} = 1950 \text{ (MHz)}$$

$$\text{中心频率波长} = \frac{\text{光速}}{\text{频率}} = \frac{300}{1950} = 0.15 \text{ (m)} = 15 \text{ (cm)}$$

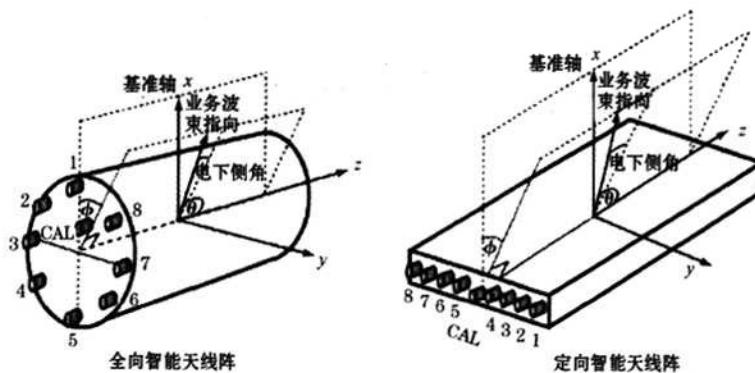


图 1 全向智能天线和定向智能天线

考虑缩短效应等外加条件，振子一般使用用长为 68~74mm，宽为 12~35mm，厚为 1~1.5mm 的铝板制作，振子简图如图 2 所示，左图是双叶振子^[1]，右图是四叶振子^[2]。

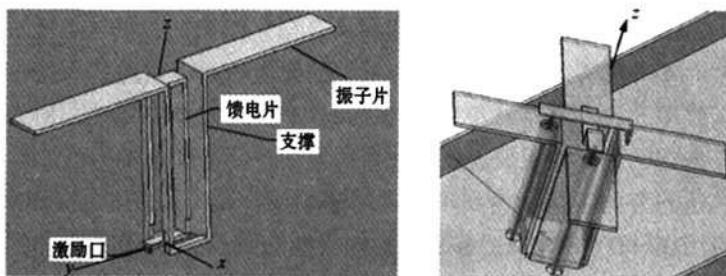


图 2 双叶振子和四叶振子

显然，位于振子后面的定向天线的金属反射板的反射性能是定向天线电磁波定向辐射性能的重要保证。既然是定向天线，我们就希望振子产生的电磁波应该尽可能多的向前辐射，实际上振子产生的电磁波向前向后是完全一样的，所以这就要求反射板能够尽可能多的将向后反射的电磁波又重新向前反射回去。一般来讲，由于空气与金属表面上的阻抗的不连续性，对向后传输的入射电磁波将会产生反射，虽然金属对电磁波具有较强的屏蔽和反射作用，但因其趋肤效应及感应电流的存在，总有部分电磁波在金属内部形成涡流发热而被吸收，部分电磁波在金属内部直接传到金属的另一界面再次被分成反射波和透射波，其中的第一次内部反射磁波还在金属内部多次反射和多次透射，这种透射既有向的也有向后的，再加上电磁波的绕射，从理论上讲再好的反射板的背后也总有部分透射波，也就是说，作为电磁波反射的金属反射板的反射率总是小于 1 的，透射率也总是大于 0 的。作为应用于 TD-SCDMA 的定向天线，我们总是希望天线的定向传输的电磁波越强越好。

二、光子晶体简介

光子晶体是一种介质的折射率或介质的介电常数在空间周期性分布的介电结构的人造晶体材料，其介质的介电常数变化的周期和作用电磁波的波长在同一个数量级上。光子晶

体也被称为光子带隙材料 (photonic bandgap materials), 还有人把它叫做电磁晶体 (electromagnetic crystals), 其原因就是它在控制光子方面存在可调的“导带”和“禁带”。众所周知, 电子在周期性势场中传播时, 由于电子波受到周期势场的布拉格散射, 会形成能带结构, 带与带之间可能存在带隙。电子波的能量如果落在带隙中, 传播是禁止的, 这种带隙称为“禁带”。其实, 不管什么波, 只要受到相关物理性周期性结构的调制, 都会产生能带结构, 也就都有可能出现带隙现象, 能量落在这样的带隙中的波同样是不能传播的, 这就是光子晶体控制电磁波的基本原因。

光子晶体的周期性结构按空间分布可以分为一维、二维和三维 (见图 3 所示), 虽然自然界也存在少量不为人们关注的光子晶体, 如蛋白石和蝴蝶翅膀等, 但真正能为我们所用的还是人造光子晶体。从工艺方面来看, 光子晶体的制备是有一定的难度的, 因为光子晶体的晶格尺度和光的波长具有相同的数量级, 如光通信波段的波长是 1.55 m, 这就要求光子晶体的晶格只能在 0.5 m 左右。尤其是三维光子晶体的制备更难。近些年来, 人们通过胶体颗粒自组织生长和胶体溶液自组织生长等有机化学方法制备了一些三维光子晶体, 但效果仍不理想。然而一维光子晶体的制备方法就要简单得多了, 因为它就是我们通常所说的光学薄膜。一维光子晶体的介质折射率只在一个方向上周期性地变化, 它由不同折射率的介质薄层周期性地叠加而成, 在结构上是多层介质膜, 制备简单、成本低廉、精度更高。

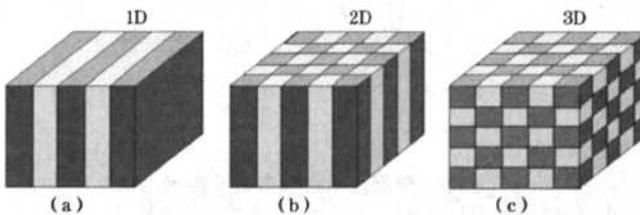


图 3 一维、二维、三维光子晶体简图

值得关注的是, 光子晶体中的完全光子晶体禁带, 这种完全光子晶体禁带是指在一个确定的频率范围内, 任何方向入射的任何模式的电磁波 (TE 波或 TM 波) 均不能在光子晶体中传播。如果我们采用这种完全禁带条件的一维介质光子晶体, 不仅能使某些频率范围的光子无法穿越, 而且因其是普通的非金属介质材料, 理论上没有任何吸收, 也就不存在金属表面对电磁波产生的镜像现象和耗损, 从而可以产生透射率接近 0, 反射率接近 1 的高效率的反射效果。十几年来, 介质和金属周期排列构成的金属介电型光子晶体研究一直进行, 人们发现这种结构的光子晶体不仅具有电磁禁带, 还能降低金属对电磁波的吸收损耗^[3-5]。H.C 等人用一维金属介电型光子晶体制成微波全反镜, 反射率由 96% 提高到 99% 以上^[6]。如果我们采用完全非金属介质的光子晶体, 其反射效果将会如何呢?

三、一维光子晶体的特征矩阵方法

一维光子晶体是典型的光学薄膜结构, 完全可以用薄膜光学中的等效光纳解析方法求解, 目前一维光子晶体普遍采用的方法是特征矩阵法。下面我们就用特征矩阵法分析一维光子晶体带隙理论的计算过程。

一维光子晶体结构简图如图 4 所示。图中红色区是光子晶体介质一, 黄色区是介质

二, 蓝色区是光子晶体的基板, θ_0 是平面电磁波的入射角, θ_t 是透过光子晶体后的折射角, n_0 是光子晶体表面介质(空气)的折射率, n_s 是光子晶体的基板折射率, n_1 是光子晶体介质一的折射率, n_2 是光子晶体介质二的折射率, d_1 是光子晶体介质一的厚度, d_2 是光子晶体介质二的厚度。

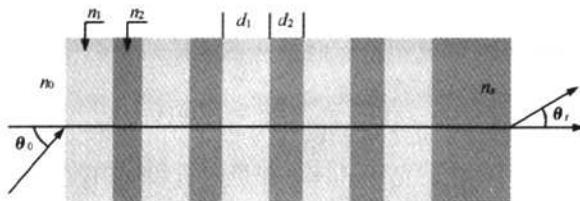


图 4 光子晶体结构简图

假设光子晶体沿 Z 方向呈周期性排列, 周期数为 s。波长为 λ 的电磁波以 θ_0 入射角入射到光子晶体表面, 电磁波通过 s 组光子晶体后最后以 θ_t 折射角从基板透出。虽然每种介质的界面处都存在反射和折射, 每种介质中都有多次反射和折射出现, 但光子晶体周期结构产生的布拉格散射出现的长消现象, 从而使总的反射率或透射率发生重大变化。

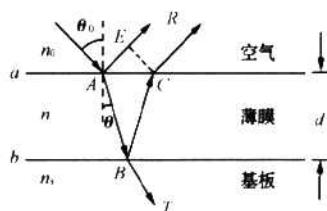


图 5 单层光学薄膜电磁波传播

首先我们用光学导纳理论来了解电磁波在单层薄膜中的传输情况(见图五), 对于入射角为 θ_0 、界面折射率为 n_0 、基板折射率为 n_s 、薄膜折射率为 n 、薄膜厚度 d 、薄膜内折射角为 θ 的情况, 特征矩阵及其参数分别为:

$$\begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{i}{\eta} \sin\delta \\ i\eta \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix}, \quad \delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd \cos\theta.$$

上式特征矩阵中的 η 是等效折射率, 在 P 偏振(TM 模)时: $\eta = n/\cos\theta$, 在 S 偏振(TE 模)时为 $\eta = n \times \cos\theta$ 。对于无损薄膜介质, η 对应介质的常用折射 n , 对于金属介质, 因为损耗存在, η 是复数, 一般表达为 $\eta = n + i\kappa$, 其中 n 是金属介质复数折射率的实部, κ 是虚部, 该虚部正是复数折射率的损耗部件, 金属的折射率就是复数折射率。 δ 是电磁波在薄膜上下层的相位移。

根据光学导纳方法, 单膜的特征矩阵还可以用下式矩阵表达:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{i}{\eta} \sin\delta \\ i\eta \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}.$$

其中 η_s 为基板的等效折射率。而单层光学薄膜的光学导纳定义为: $Y = C/B$ 。

根据光学导纳 Y , 我们可以求出单层光学薄膜的反射系数 r 和透射系数 t , 即

$$r = (\eta_0 \times B - C) / (\eta_0 \times B + C);$$

$$t = 2 \times \eta_0 / (\eta_0 \times B + C);$$

最后求出单层光学薄膜的反射率 R 和透射率 T , 即

$$R = |r|^2 = \left[\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right] \left[\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right]^*.$$

$$T = \frac{Re(\eta s)}{\eta_0} |t|^2 = \frac{4\eta_0 Re(\eta s)}{[\eta_0 B + C][\eta_0 B + C]^*}.$$

上面研究的单层薄膜, 其实对多层薄膜我们完全可以用等效导纳方法将多层薄膜等效为单层薄膜, 这样对于一个由 L 元组合的介质周期组的多层光学薄膜——光子晶体中的每个介质对应的传播特征矩阵 m_i 和参数就可以用下列矩阵表示:

$$m_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix}, \quad \delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j.$$

同样, η_j 、 n_j 、 d_j 、 δ_j 分别是第 j 号介质的等效折射率、薄膜介质折射率、薄膜厚度和电磁波通过该薄膜上下层后的相位移。

我们再将多层光学薄膜组成一个等效薄膜, 即由 L 元介质组合后的多层光学薄膜——光子晶体, 在一个周期内的传播特征矩阵 m 为:

$$m = \prod_{j=1}^L m_j = \prod_{j=1}^L \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix}.$$

最后, 由 S 个周期数组成的一维光子晶体的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^S m \begin{bmatrix} 1 \\ \eta s \end{bmatrix}.$$

根据单膜光学导纳中的反射系数公式 $r = (\eta_0 \times B - C) / (\eta_0 \times B + C)$ 和透射系数公式 $t = 2 \times \eta_0 / (\eta_0 \times B + C)$, 我们就可以求得电磁波入射到一维光子晶体面上的反射系数 r 和透射系数 t , 以及反射率 R 和透射率 T 。

四、一维光子晶体材料对 TD-SCDMA 辐射波段的反射性能分析

目前用于 TD-SCDMA 的阵列天线的背板都是金属铝片, 金属表面虽然具有较高的电磁波反射率, 却因吸收较大而无法获得高反射率。如果采用完全光子禁带的一维光子晶体, 其反射效果将更优于金属反射面。所以, 对于没有吸收损耗构成的光子晶体, 在其完全光子禁带中, 任何模式的电磁波在各个方向的透射率为 0, 反射率为 1 的一维光子晶体又称为全方位反射镜, 显然它弥补了金属反射面的不足, 可提高 TD-SCDMA 的阵列天线的电磁波强度和方向性。

下面取由两种介质组成的二元系一维光子晶体, 其中第一种介质折射率 $n_1 = 4.6$, 第二种介质折射率 $n_2 = 1.6$, 第一种介质的光学厚度 $n_1 d_1 = 4.6 \times 1.08$ (cm) = 1, 第二种介质的光学厚度 $n_2 d_2 = 1.6 \times 3.33$ (cm) = 1, 周期数为 3。考虑这组光子晶体直接放置在空气中, 所以晶体的上方介质和下方介质均为 1, 即 $n_0 = 1$, $n_s = 1$ 。入射波长我们使用 TD-SCDMA 中心频率入射波长 = 15cm。最后利用笔者自己编写的《薄膜光学分析工具》软件, 可以算出多种情况来分析 TD-SCDMA 天线的最佳设计方案。

1、光子晶体周期数确定

根据计算我们发现，如果取两种介质的厚度 d 都为 1，这种二元系光子晶体随着周期数的增加，S 偏振的 TE 模和 P 偏振的 TM 模的电磁波的反射率都将增加，下面图 6 中的曲线，表示的是周期数为 1 的 TE 模和 TM 模是绿线和宝蓝线，周期数为 2 的 TE 模和 TM 模是浅蓝线和桃红线，周期数为 3 的 TE 模和 TM 模是蓝线和橙红线。曲线表明，当入射角为 0 时，一组二元光子晶体的反射率约为 73%，二组二元光子晶体的反射率就上升到约 94%，三组二元光子晶体的反射率就接近 100% 了。同样考虑天线结构的空间大小，建议取组二元光子晶体为天线后面的反射板。

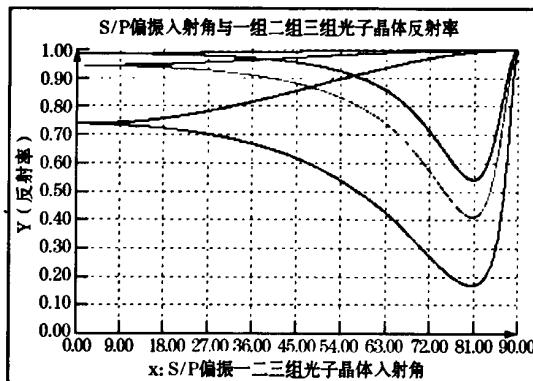


图 6 不同组数的一维光子晶体的入射角与反射率的关系

2、光子晶体厚度确定

TD-SCDMA 定向天线的体积有限，这就决定了作为天线反射板的光子晶体的厚度不能太大。下面图 7 中的曲线表示的是：在上面三组二元系光子晶体中，当第二介质折射率和光学厚度确定后第一介质的光学厚度与反射率的关系曲线（绿线），当第一层介质折射率和光学厚度确定后第二层介质的光学厚度与反射率的关系曲线（红线）。图 8 中的曲线表示的是：同样在上面三组二元系光子晶体中，当第二介质折射率和厚度确定后第一介质的厚度与反射率的关系曲线（绿线），当第一层介质折射率和厚度确定后第二层介质的厚度与反射率的关系曲线（红线）。计算中取入射角为 0 度，所以 TE 模与 TM 模简并为一条曲线。

从曲线上可知第二介质的高反射率禁带对应的光学厚度和厚度要宽得多，尤其是介质厚度变化方面，第一层和第二层介质的高反射率共同厚度区域在 0.8 ~ 1.2cm 处。而第一层介质和第二层介质的高反射率光学厚度共同区域则分布在 4 ~ 5 之间，我们完全可以根据介质折射率和厚度的乘积来实现这个条件。

3、光子晶体折射率确定

前面我们选择的二元系光子晶体的折射率是任意选择的，在实际的生产中，我们可能很难找到这类具有这种折射率的适合天线加工的材料。另外，这种折射率的选择也未必是最好的数据。为此，我们还应该了解二元系光子晶体两种介质的折射率与反射率的关系，从而全面了解选择二元光子晶体折射率的更多信息。

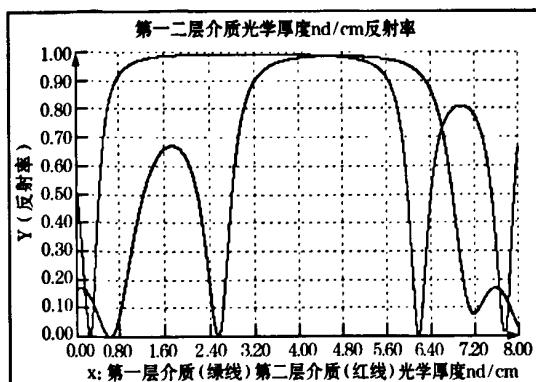


图 7 第一层与第二层介质不同光学厚度的光子晶体与反射率的关系曲线

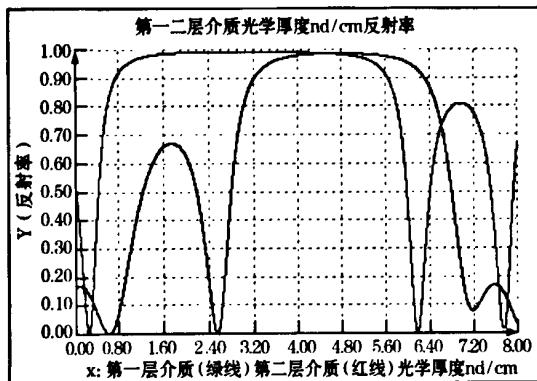


图 8 第一层与二层介质不同厚度的光子晶体与反射率的关系曲线

下面图 9 中的曲线同样是在满足上面条件后，其中入射角为 0，薄膜厚度为 1，在确定第二种介质折射率后求第一种介质折射率与反射率的曲线（绿线）和确定第一种介质折射率后求第二种介质折射率与反射率的曲线（蓝线）。从图中我们发现，蓝线（第二层介质）覆盖的高反射率折射率区域更大，且折射率值也更小，因为它的高反射率范围覆盖 1 ~ 5.9。所以，改变第二介质的折射更有利于天线的设计。

为了更好的分析光子晶体折射率的变化规律，我们还计算出了第一层介质和第二层介质的厚度分别在 0.4cm、0.8cm、1cm 时的折射率与反射率的曲线关系。图 10 所示的曲线是第一层介质厚度不同取值时，折射率与反射率的关系，图 11 所示的曲线是第二层介质厚度不同取值时，折射率与反射率的关系。从图我们不难发现，高反射率禁带区随着介质的厚度增加而折射率向低值区移动，且第二层介质的折射率向低值区移动的要大得多。这进一步说明对在同样介质厚度的前提下，第二层介质折射率的选择更有利提高光子晶体的反射率。

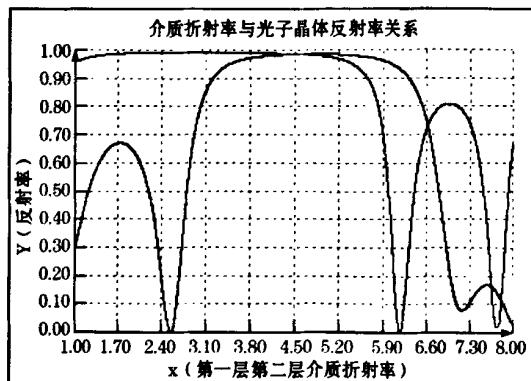


图 9 不同折射率的一维光子晶体与反射率的关系

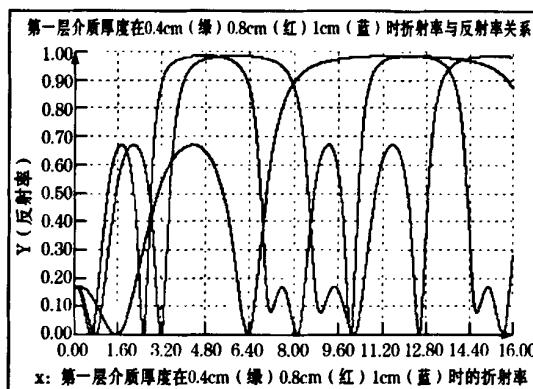


图 10 第一层介质厚度不同取值时，折射率与反射率的关系

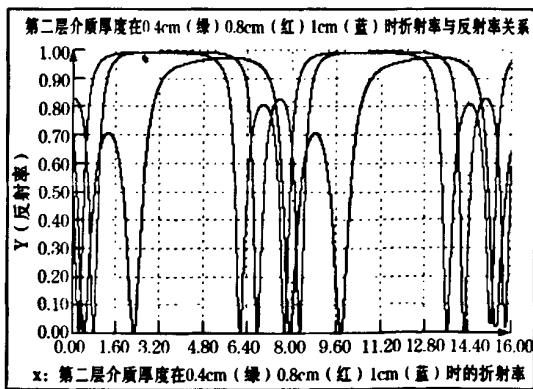


图 11 第二层介质厚度不同取值时，折射率与反射率的关系

光子晶体与折射率的关系还表现在随着入射波长变化时，高反射率介质折射率区也将发生变化，且是向长波长方向发展。下面图 12 和图 13 中的曲线表示的是，当第二层介质折射率保持不变时第一层介质折射率的变化情况和第一层介质折射率保持不变时第二层介质折

射率的变化情况，其中绿线对应入射波 $\lambda = 14\text{cm}$ ，蓝线对应入射波 $\lambda = 15\text{cm}$ ，紫线对应入射波 $\lambda = 16\text{cm}$ 。不难发现两种情况下，高反射率区域都向长波长区移动，只是移动范围不大。

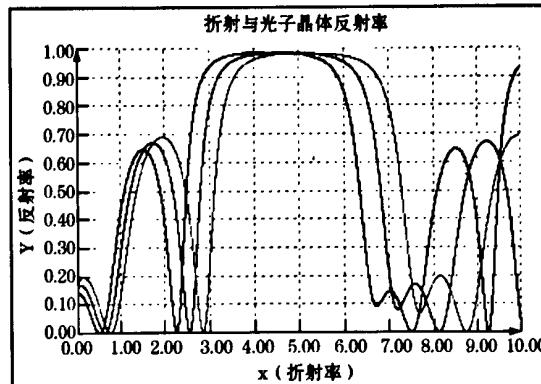


图 12 三种入射波长下第一层介质折射率与反射率的关系

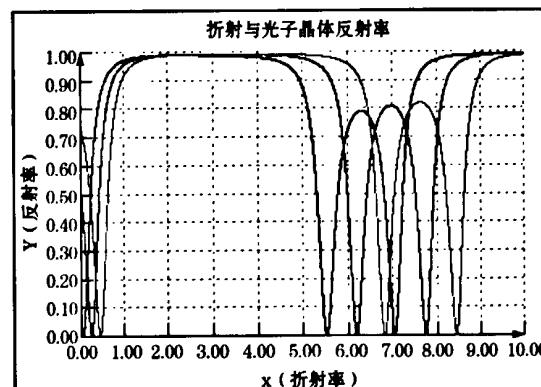


图 13 三种入射波长下第二层介质折射率与反射率的关系

4、光子晶体与入射波的关系

TD-SCDMA 的工作频率范围是 $1880 \sim 2025\text{MHz}$ ，所以它的工作波长范围是 $14.8 \sim 15.9\text{cm}$ ，作为发射天线，光子晶体在满足更高的反射条件的同时，当然要考虑它所能覆盖的波长范围。下面图 14 中的曲线显示，采用这种二元系三组光子晶体，其高反射率区涵盖了 $5 \sim 8\text{cm}$, $11 \sim 19\text{cm}$ 波段，完全适应 TD-SCDMA 的工作频率范围要求。

另外，入射波与光子晶体的高反射率与其入射在晶体表面的角度的大小没有多大影响，下面图 15 中曲线中的绿线的入射角 $\theta = 0^\circ$ ，桃红线的入射角 $\theta = 40^\circ$ ，宝蓝线的入射角 $\theta = 80^\circ$ ，这三条曲线在有效入射波长范围内基本上没有多大变化，这说明这种光子晶体的反射性能是很好的，在很大的入射角范围内的反射率的变化很小，这也光子晶体作为反射板可以改善天线辐射性能的重要原因。

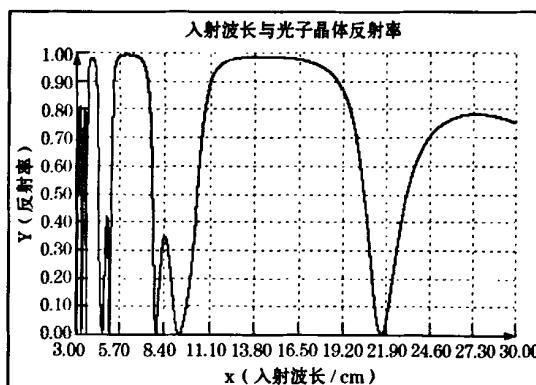


图 14 入射波长与反射率的关系

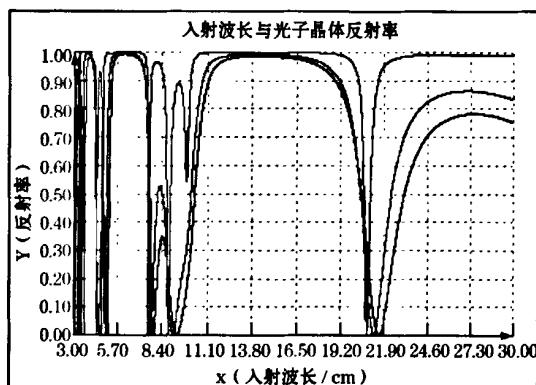


图 15 不同入射角下入射波与反射率的关系

五、总结

我们在这里分析了光子晶体在 TD - SCDMA 辐射波段范围内的反射性能，分析完全是在没有任何金属基板的前提下进行的，这说明设计这样的光子晶体天线完全可以不需要金属后壳或金属反射板，也就是说除了振子外，整个天线不需要其它金属支架和金属外壳，这不仅可以免除因金属外壳或金属反射板对电磁波产生的镜像而直接影响天线辐射区对正确设计波瓣分布的影响，减少金属外壳和金属反射板因高频趋肤产生的涡流对发射功率的损耗和感应电磁波的反向干扰，还可以降低天线成本，若反射板采用满足折射率要求的非金属介质材料，不仅没有任何损耗，还可以避免因长期暴露在外而引起的金属严重腐蚀现象。特别是当我们对光子晶体电磁波反射板作适当的设计后，还可以人为地控制反射电磁波的波瓣分布，从而提高智能天线的性能。

作者简介

张长青，男，湖南移动通信公司岳阳分公司，高级工程师，92 年毕业于中科院长春物理研究所，获理学硕士学位。主要在公司从事计算机软硬件及网络维护工作。曾在国内各大主要计算机刊物发表计算机软硬件网络等专业技术文章 170 余篇。业余主要利用 MATLAB、FORTRAN 和 DELPHI 研究 FDTD 对电磁场理论及光子晶体的计算机仿真过程。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>