

利用纳米技术研制纳米管阵列天线的可能性

朱 旗¹, 陈 畅¹, 丁文武², 鲁加国³

(1. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027; 2. 天津大学, 天津 230031; 3. 华东电子技术研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 在分析传统天线工作机理的基础上, 基于纳米物理原理, 本文提出了利用纳米管研究纳米管阵列天线的概念. 由于纳米管内电子运动固有的弹道输运效应, 使得纳米管阵列天线具有辐射效率高的优点. 同时, 由于纳米管阵列不受趋肤效应影响, 在口径面及空间内按一定规律布排纳米管阵列, 并形成需要的电流分布, 可进一步提高纳米管阵列天线的辐射增益. 计算表明, 除具有辐射效率高以外, 纳米管阵列天线的辐射方向性优于相同面积上的微带天线. 本文同时对纳米管阵列天线可能的馈电方式进行了探讨.

关键词: 天线; 天线效率; 增益; 纳米管天线

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09-1698-04

The Possibility of Designing Nano-Tube Array Antenna with Nano-Technology

ZHU Qi¹, CHEN Chang¹, Ding Wenwu², LU Jianguo³

(1. Dept of EEIS, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China; 2. Tianjing University, Tianjing 230031, China; 3. Electronic Technology Institute of East China, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Based on the analysis of traditional antennas and nano physics, the concept of design of antennas with nanotube array is proposed here. The intrinsic ballistic transportation of electrons in nanotube makes it possible for antennas consisting of nanotube array to radiate with higher efficiency. Meanwhile, because there is no skin effect among nanotubes, required current distribution can be achieved by arranging nanotubes in a giving aperture and space, thus the gain of present antenna can be further enhanced. Calculation results indicate that, except for the high efficiency, directivity of nanotube array is better than traditional microstrip antenna with the same area. Possible feed method of nanotube array is also discussed.

Key words: antenna; antenna efficiency; gain; nanotube antenna

1 引言

为了满足现代通讯对适时性、灵活性以及安全性的要求, 高性能的相控天线已成为现代通讯的首选天线形式. 特别是, 由于具有重量轻、体积小、易于和载体共型等优点, 微带天线相控阵在现代通讯应用中更是独树一帜. 但是在天线的实际应用中, 往往存在着整机系统限制和天线技术指标相矛盾的情况. 一个典型的例子就是卫星天线的应用. 卫星有效载荷限制了天线阵单元的数目、功耗, 而卫星远距离通讯的特点又要求天线具有很高的增益及灵活的相控扫描方式. 从天线设计角度出发, 造成这种局面的原因在于天线增益对天线口径面积的依赖, 面积越大, 增益越高, 一定的面积才能达到一定的增益. 如果能设计一种天线突破目前天线增益和面积的低效率关系, 将具有十分重要的意义. 下面以微带天线作为参考, 探讨从纳米物理原理出发设计高性能纳米管天线的可能性.

2 纳米管天线的可行性研究

2.1 传统天线增益分析

作为天线最重要的指标, 天线增益 G 的定义为

$$G = \eta \times D \tag{1}$$

其中, 天线效率 η 为天线辐射功率与输入天线系统的功率之比, 两者之差为天线系统存在的各种损耗. 以微带天线为例, 在除去系统回波损耗外, 天线损耗还包括导体损耗、介质损耗、表面波损耗等. 而天线的方向性系数 D 则描述了天线的定向辐射性能.

由电动力学^[1], 除围绕原子核作圆周运动的电子外, 直线加速运动的电子向外不断地作电磁辐射, 单个加速运动电子的辐射功率为:

$$P(t) = \frac{e^2 F^2}{6\pi \epsilon_0 m^2 c^3} \times \frac{1}{1 - v^2/c^2} \tag{2}$$

在传统天线中, 电子在作热运动的同时, 在外电场 F 的作用下作定向加速运动, 并因此产生电磁辐射. 电子的这种热运动使得其和其他电子、离子等微观粒子发生碰撞, 由此产生电阻并造成损耗, 从而降低了天线效率. 同时, 由于存在趋肤效应, 金属辐射体真正起辐射作用的仅仅是金属表面, 金属辐射体的整体利用率不高. 例如微带天线, 由微带天线的等效模型^[2], 微带天线辐射由两个位于微带天线边缘的等效缝隙天线辐射构成, 其方向图等同于该缝隙天线的二元阵方向图.

从以上分析可知,现代天线由于散射以及趋肤效应等因素的影响,没能充分利用其体积和能量,存在一定的损耗,辐射方向性也不高,这也是目前天线面积利用率不高的原因。

2.2 单个运动电子辐射效率分析

从微观上看,天线电流辐射可看作是大量加速运动电子辐射的宏观效应。在不考虑由碰撞引起的电阻损耗、运动电子间互耦的情况下,宏观天线的辐射功率可表达为:

$$\text{宏观辐射功率} = \text{单个带电粒子辐射功率} \times \text{参与辐射的微观粒子数} \quad (3)$$

其中,在单个带电粒子的辐射功率计算中,应以电子的有效质量代替电子的真实质量,以表征金属内部势场的影响。由于电子的有效质量和电子实际质量相差不大,从单个运动电子的辐射功率计算式(2)来看,很难找到能有效提高单个电子辐射功率的方法。因而,只能从增加参加辐射电子数或减小电子辐射损耗的角度来探讨提高电子辐射效率的途径。而通过增加材料大小或数量的方式增加电子数目,实际上就是增大天线的体(面)积和重量,这种方法没有解决上述矛盾,因而寻找降低损耗是提高天线效率的首选途径。解决问题的关键在于找到一种电子运动的载体,使得电子在其中运动时,不存在散射。目前有三种可能的载体:真空、超导和纳米管。真空和超导条件过于苛刻,这样,基于纳米物理原理的纳米管天线成了我们的最佳选择。

2.3 利用纳米管制作纳米管天线的可能性

由纳米物理^[4,6]可知,由于具有弹道输运效应,电子在纳米管中运动时几乎不和其他电子或粒子散射。和传统金属中运动的电子相比,纳米管中运动的电子将没有传导电阻以及传导电阻引起的能量损耗,因而可以预见,其能量向电磁辐射能的转化效率将高于传统天线。以下将纳米管中运动电子辐射特性和微带天线辐射特性作简单计算比较。

2.3.1 纳米天线增益和微带天线增益的比较

2.3.1.1 辐射效率比较

(1) 微带天线辐射效率的计算

现以工作在 100GHz 的微带天线为例,计算微带天线的效率,波长 $\lambda_0 = 3\text{mm}$ 。令微带天线的长宽分别为半个波长 $0.5\lambda_0$,介质的厚度 $h = 0.25\text{mm}$,介电常数, $\epsilon_r = 2.55$, $\tan\delta = 0.001$,天线的辐射频率,微带天线总消耗功率 P 为

$$P = P_r + P_c + P_d + P_{sw} \quad (4)$$

P_r, P_c, P_d, P_{sw} 分别为辐射损耗、导体损耗、介质损耗和表面波损耗, $Q_r, Q_c, Q_d,$

Q_{sw} 是由这些损耗所引起的对应 Q 值。TM₀₁ 模工作的微带天线的 Q_r, Q_c, Q_d, Q_{sw} 以及辐射效率可依据文献[2]、[3] 计算如下。

$$Q_r = \frac{3\lambda_0\epsilon_r}{8h} = 11.475, Q_c = \frac{h}{\Delta_c} = 444.83$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan\delta} = 1000, Q_{sw} = 27.7274 \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1/Q_r}{1/Q_r + 1/Q_c + 1/Q_d + 1/Q_{sw}} = 0.6891 \quad (6)$$

(2) 纳米管天线辐射效率的计算

与金属宏观电阻不同,纳米尺寸内材料的电导率取决于电子运动自由程、相位弛豫长度以及费米波长,特别是针对具有弹道输运特性的纳米管,其电阻包括传导电阻和接触电阻,其中传导电阻接近零,而接触电阻可表示为^[6]:

$$R_c = \frac{h}{2e^2} \cdot \frac{1}{M} = \frac{12.9064 \times 10^3}{M} \Omega \quad (7)$$

上式中, M 为纳米管中由于两端电极电位不同而存在于纳米管中的亚能量允带数, M 随两端电极电位不同而不同,如 0.01 毫米长的纳米管上施加 1 伏特的电压,则 $M \sim 10^7, R_c \sim 10^{-3}$ 。而由于趋肤效应,长、宽分别取半个波长的微带天线的电阻可达:

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{1}{5.8 \times 10^3} \frac{\lambda/2}{\lambda/2 \times \text{趋肤深度}} = \frac{1}{5.8 \times 10^3 \cdot 2.09 \times 10^{-4}} \sim 1 \Omega \gg R_c \quad (8)$$

比较式(7)和式(8)可发现纳米管的接触电阻远小于传统半波长微带天线的电阻

实际上,公式(7)只是外加电极和纳米管间的接触电阻,而非电子在纳米管中运动的传导电阻。如果通过空间馈电方式,实现对纳米管中电子的无接触馈电,就可以避免上述接触电阻。同时,由纳米管阵列构成的天线不需要传统微带天线的接地金属,因而在纳米管阵列天线中,无表面波损耗^[2]。这样,由于导体、表面波产生的损耗为零,其辐射效率为:

$$\eta = \frac{1/Q_r}{1/Q_r + 1/Q_d} = 0.9887 > 0.6891 \quad (9)$$

其辐射效率要大于传统天线的效率。

2.3.1.2 纳米管天线阵列方向性系数和传统微带天线方向性系数比较

由电动力学^[1],加速度方向平行于运动方向的电子,在其速度远小于光速时,辐射角类似于电基本振子的辐射角,因而,可以利用电基本振子短电流辐射作为纳米管中电子加速运动辐射模型。同时,由于碳纳米管可呈阵列生长,可以将碳纳米管阵列作为纳米管阵列天线的子阵;将这些子阵按一定规律在衬底材料上布排成天线阵,以获得较大增益;同时,由于纳米管阵列天线不受趋肤效应影响,如果需要进一步增加辐射功率或达到更高增益,可以进一步组成多层纳米管天线

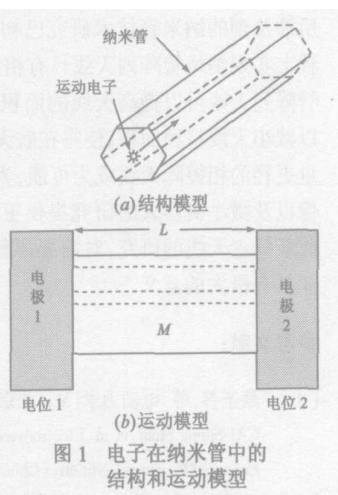


图 1 电子在纳米管中的结构和运动模型

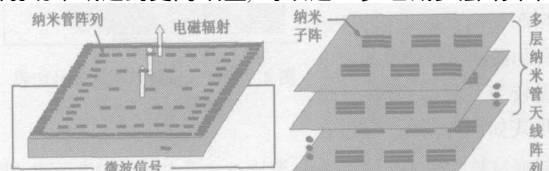


图 2 密度呈倒钢盔分布纳米阵列天线示意图

图 3 多层纳米天线阵列结构示意图

阵,如图 2 所示.下表列出了 $\frac{1}{2}\lambda \times \frac{1}{2}\lambda$ 口面内,微带天线方向系数和按密度呈倒钢盔分布纳米管阵列时,单层和多层方向性系数比较.

表 1 微带天线、单层和多层倒钢盔密度分布纳米管阵列天线方向性系数比较

	方向性系数(dB)
微带天线	7.02
单层纳米管阵列天线	7.63
5层纳米管天线 层间距 $\lambda/8$	11.05
5层纳米管天线 层间距 $\lambda/4$	11.91

综上所述,由于具有弹道输运等特性,纳米管天线阵列没有导体损耗及表面波损耗,因而其辐射效率高于传统微带天线.同时,由于纳米管阵列天线可在单层内按需要布排,并可以沿纵向组成阵列,提高了对天线载体表面积的利用率,进而可以达到提高增益的目的.

2.3.2 产生微波辐射所需纳米管的长度 由电动力学^[1],作简谐振动电子的电磁波辐射频率仅由电子简谐振动的频率 f_0 决定.设电子在纳米管中作简谐振动,则其运动方程和加速度方程可表示如下:

$$x(t) = A \sin \omega t, a(t) = -A \omega^2 \sin \omega t \quad (10)$$

若电磁波频率为 10GHz,周期 T 为 10^{-10} s. 设纳米管长度 L , 电子周期简谐运动的平均速度 \bar{v} , 在一个周期内电子运动的距离为 $2L$, 则有

$$\bar{v} = 2L/T \quad (11)$$

下表列出不同平均运动速度下,产生 10GHz 电磁波辐射,所需纳米管的最小长度,目前,0.01mm 以下的纳米管阵列是实验室可制备的.

表 2 不同平均运动速度下,产生 10GHz 电磁波辐射所需纳米管的最小长度

纳米管长度 L	电子运动速度,与光速间的关系
0.1mm	2×10^6 m/s, 小于光速的 1/100
0.01mm	10^6 m/s, 小于光速的 1/1000
0.001mm	10^5 m/s, 小于光速的 1/10000 (晶体中电子运动速度)

2.3.3 纳米管天线可能

采用的馈电方式 由于碳纳米管极小,无法对其直接馈电;同时,为避免外加电极和纳米管间直接接触所产生的接触电阻,采用外加微波信号的空间馈电是较为可行的,具体馈电形式如图 4 所示.通过在

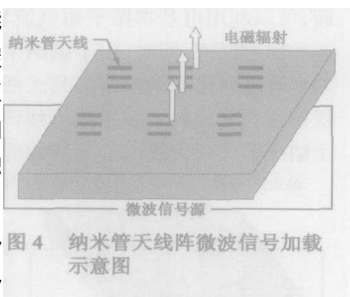


图 4 纳米管天线阵微波信号加载示意图

衬底材料两端加载微波信号,激励纳米管中电子加速运动,进而构成辐射.注意,这里是碳纳米管中电子作加速运动构成辐射,不是电极上的位移电流构成辐射.

3 纳米阵列天线的优点及其应用背景

3.1 纳米天线的优点

由于具有一维量子线结构及弹道输运特性,纳米管中电子的辐射效率大于传统天线中电子的辐射效率;同时,由于纳米管阵列天线可在单层内按需要布排,并可以沿纵向组成阵列;因而,在相同面积下,纳米天线的增益将高于传统微带天线.这一优点在航天航空领域中的应用是显而易见的.

3.2 可能的应用背景

3.2.1 规则排列天线阵 由于不存在金属的趋肤效应,为了更好地提高天线阵增益,可将多个纳米管阵列天线在一定厚度内排列构成天线阵,这样可以增大天线的面积利用效率,规则排列天线阵示意图如图 2 所示.

3.2.2 不规则排列天线阵 由于纳米管阵列天线是以纳米管为基本辐射元的,因而单个辐射元所占面积非常小.对于一些无法提供完整平面以构成天线阵的载体,如小卫星等,可以将纳米管阵列天线布置在卫星可提供的分散表面上,然后优化这些任意分布天线阵的相位、幅度以达到满足天线阵方向图的目的.这样既降低了卫星有效载荷,也避免了占用较多的天线表面,从而为卫星总体设计提供更大的灵活性.

3.2.3 微小侦察单元 目前,微小侦察单元获得了越来越广泛的应用.为了将微小侦察单元所获信息传给后方或卫星,必须在微小侦察单元上安装高增益的天线.小面积的传统天线无法胜任此项任务,而安装大口径天线,又使微小侦察单元失去其应用意义,因而发展可应用于微小侦察单元上的高增益纳米管阵列天线极具重要意义.

4 结论

本文从纳米物理概念出发,在分析传统天线工作原理的基础上,提出了利用纳米管研究纳米管阵列天线的概念,并对其可行性、辐射效率和方向性系数进行了初步分析,得出了纳米管阵列天线阵具有较高面积增益效率的结论.由于本方案所涉及到的纳米管技术研究已初具规模,因而,在理论上、工程上实现纳米管阵列天线具有相当的可能性.同时,由于纳米管阵列天线可以提高天线的面积利用效率,在一定增益下可以减小天线口径面积,使得在航天航空领域采用体积更小、重量更轻的相控阵天线成为可能,为卫星通信、卫星微波探测成像以及微小机器人的研究提供更有力的技术支持.因而开展此新概念天线的研究,对需要原创性知识产权的我国国防事业具有极大的意义.

参考文献:

- [1] 蔡圣善,等.电动力学[M].北京:高等教育出版社,2002. CAI Sheng Shan, et al. Electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002, second edition. (Chinese Source)
- [2] 钟顺时(编).微带天线理论与应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,1991. ZHONG Shun Shi. Theory and Applications of Microstrip Antennas [M]. Xi'an: XIDIAN University Press, 1991. (Chinese Source)

- [3] B Nauwelaers, A Van de Capelle. Surface wave losses of rectangular microstrip antennas[J]. Electronics Letters, 1989, 25(11): 696- 697.
- [4] David K Ferry, Stephen M Goodnick. Transport in Nanostructures[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [5] 徐克尊(编). 高等原子分子物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
XU Ke Zun. Advanced Physics of Atoms and Molecules[M]. Beijing: Science Press, 2000. (Chinese Source)
- [6] R Saito, et al. Physical Properties of Carbon Nanotubes[M]. London: Imperial College Press, 2002.
- [7] 解思深. 碳纳米管研究进展[M]. 北京: 全国第二届纳米材料和技术应用会议(大会特邀报告), 2001.
XIE Si shen, The Development of research of Carbon Nanotube[M].

Beijing: The 2nd Conference of Nano Materials & Applications, 2001. (Chinese Source)

作者简介:

朱 旗 男, 1996 年于南京航空航天大学获博士学位, 1998 年中国科学技术大学电磁场与微波技术博士后出站, 主要研究方向为: 微带天线理论分析及设计技术、电磁场数值方法、微波集成电路分析与设计等. E mail: zhuqi@ustc.edu.cn.

陈 畅 男, 硕士生, 2002 年本科毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系.

丁文武 男, 天津大学在读博士生, 现工作于信息产业部.

鲁家国 男, 1986 年毕业于西安电子科技大学, 现工作于电子科技大学集团第三十八所.

书 讯

王国宏、孔敏、何友编著的《Hough 变换及其在信息处理中的应用》一书 2005 年 6 月由兵器工业出版社出版. 目前国内目前关于 Hough 变换及其应用的第一部专著, 是在综合了作者们的研究成果以及国内外大量文献资料的基础上编写成的, 全面系统地介绍了 Hough 变换及其在信息处理应用方面的进展与最新研究成果.

该书系统和详尽地概括了 Hough 变换在信息处理各个领域的算法、实现和研究结果, 并包含大量作者自身的研究成果, 叙述自成系统; 理论和实际相结合, 不仅给读者系统的理论背景, 也给出大量的应用实例, 对从事信号信息处理研究人员有很好的参考价值; 内容全面, 书中较全面地收集了国际上到 21 世纪初为止的各种 Hough 变换技术的应用, 包含了大量计算曲线和大量计算数值表格, 对各种方法的性能进行了比较和对比; 内容新颖, 其中三维空间的 Hough 变换是应用中迫切需要但现有资料中极少见到的, 将 Hough 变换用于微弱信号检测以及用于多传感器 多目标跟踪等内容都是目标检测与跟踪领域的前沿内容; 此外, 本书还首次从理论和仿真角度完整、系统地分析了基于 Hough 变换的检测器在四种杂波背景下对非起伏四种 Swerling 起伏目标的检测性能, 建立了完整的基于 Hough 变换的检测体系. 书中每章都有大量引证的国内外参考文献, 便于读者查阅和检索, 文字可读性比较好.

全书共分八章, 包括 Hough 变换的各种形式介绍, Hough 变换在图像处理、信号检测、雷达目标跟踪、被动跟踪、多目标多传感器跟踪以及其它方面的应用, 适用于多个领域的读者.

本书的读者对象是各领域内从事信息处理的科研工作技术人员, 以及信息与信号处理类各专业的研究生、高年级本科生.

全书 28.4 万字, 176 页, 售价 30 元.

邮购联系电话: 0535- 6635607

联系人: 徐珂文

地 址: 山东烟台海军航空工程学院教务处

邮政编码: 264001