

# 一种光学波束形成天线及其可行性的研究

杨文丽 刘波 吴春邦 崔兆云

中国航天科技集团五院 504 所

西安市 165 信箱, 邮编: 710000, liwenyoung@163.com

**摘要** 本文设计并实现了一种采用实时延技术的光学波束形成天线。文中首先进行了该天线的方案设计和理论分析, 详细介绍了其所依据的实时延基本原理; 然后给出了该光学波束形成天线的实验结果和数字调制信号通过该天线的光学波束形成网络的传输试验结果, 并进行了详细的性能分析; 最后进行了小结, 指出了光学波束形成技术在军用/民用卫星通信中应用的广阔前景。

**关键词** 光学波束形成天线; 实时延; 波束形成网络; 传输试验

## 1 概述

在各种军用/民用雷达、卫星、飞船、导弹、轮船、潜艇和无线通信系统中, 天线都处于信息收发的最前端, 是其中不可或缺的重要组成部分。现代大容量、多功能、超宽带综合信息系统的迅猛发展, 迫切需求多种高性能的天线。其中卫星通信在历经近半世纪的发展后对天线的波束形成与控制, 在轨重构, 快速跳变, 扫描及跟踪等性能也提出了越来越高的要求。如需要达到以下功能要求的高性能天线: 重量和体积都大幅度减小; 波束形成的带宽可从几百 MHz 到 1GHz 甚至更宽; 宽带多波束; 防电磁干扰 (EMI)、调零、自适应、赋形等。

光学波束形成技术是提高卫星, 雷达等系统中天线性能的强有力的技术。国外已经有许多专家及技术研究人员在进行这方面的研究工作, 自 Wille Ng 等人首次成功利用光纤时延线设计实验了一个光控微波相控阵天线并对其进行分析以来<sup>[1]</sup>, 美国卫星通信实验室 (SATCOM)、E-Tex 动力公司、麻省理工学院、Lockheed Martin 公司、日本 CRL 实验室、西班牙 FRG/ITACA 实验室等单位十几年来一直致力于这方面的研究并取得了很大的研究成果<sup>[2-3]</sup>。近年来, 光纤通信、光电子技术的发展也极大地推动了其在微波领域的应用, 从而使得采用光学波束形成技术的天线在雷达、军用通信以及卫星系统等领域愈来愈引起了人们的广泛重视。

本文采用实时延光纤延迟线技术, 研制了一种新型的天线—光学波束形成天线。文中给出了相应的研究和实验结果, 同时, 还介绍了数字调制信号通过该天线的光学波束形成网络的传输试验, 从而验证光学波束形成技术用于实际通信系统的可行性。

## 2 方案设计及基本原理

### 2.1 采用光学实时延技术的方案设计

如图 1 所示, 天线单元接收到的射频信号经过低噪声放大器放大后对光源进行直接强度调制, 得到调制的光波信号; 再经由不同长度的光纤延迟线耦合成一路信号; 然后到达光探测器检波, 将光信号转换成

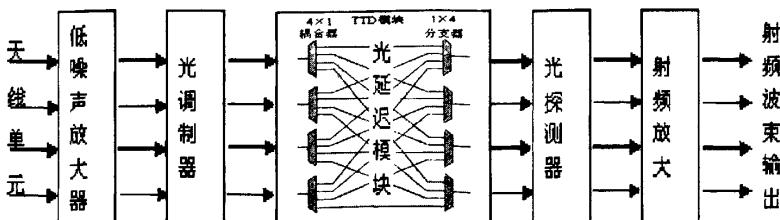


图 1 实时延光学波束形成天线的原理方案图

射频信号：微弱的射频信号被射频放大器放大，以低阻抗形式输出，供后面的信号处理电路使用，即最后输出具有较大幅度的射频信号。空间相对相位差与阵内相位差的平衡由不同的光路时延来实现（如图中光延迟模块内所示）。

设调制系数适当，激光源工作在线性区，检波器未饱和，对整个方案中的信号变化流程的分析如下：

若天线阵面接收到的射频信号为

$$E_{kr} = I_k \cos(\omega_r t + \varphi_r + k\Delta\phi) \quad (1)$$

激光源输出的信号为

$$E_{kl} = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (2)$$

经过低噪声放大器放大后对光源进行强度调制，得到的调制信号为

$$E_{km} = \frac{A_c^2}{2} [1 + k \cos(\omega_c t + \varphi_c + k\Delta\phi)] \cdot \cos^2(\omega_c t + \varphi_c) \quad (3)$$

分别经不同相对路径延迟线产生相对相位差，通过光耦合器，有

$$E'_{km} = \frac{A_c^2}{2} [1 + k \cos(\omega_c(t + t_1 + k'\Delta\tau) + \varphi_c + k\Delta\phi)] \cdot \cos^2(\omega_c(t + t_1 + k'\Delta\tau) + \varphi_c) \quad (4)$$

经包络探测器（PD）检波后输出

$$E_m = I_k [1 + k \cos(\omega_c(t + t_1 + k'\Delta\tau) + \varphi_c + k\Delta\phi)] \quad (5)$$

PD 内置隔直电容，只输出第二项，当  $k\Delta\phi + \omega_c \cdot k'\Delta\tau = 2k\pi$  时，阵列之间的空间相位差与延迟线产生的阵内相位差平衡。

## 2.2 基本原理

上述方案设计是基于实时延技术的基本原理，而实时延技术是在阵列天线波束形成原理基础上演绎而来的，它既可以由同轴线或波导来实现，也可以采用光纤、光波导或基片波导等来实现。对它的推导过程简述如下：

为简单起见，考虑一维阵列天线<sup>[4]</sup>，不同的辐射单元用不同的相移，对指向为  $\theta$  的波束，其远场方向图为：

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \sum_{i=0}^4 a_i e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \Delta\varphi_B\right)} \quad (6)$$

其中， $f(\theta, \varphi)$  为单元方向图。其波束指向为：

$$\theta_B = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi_B\right) \quad (7)$$

单元间的相差公式为：

$$\Delta\varphi_B = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (8)$$

当工作频率为一固定频率时，固定的相移  $\Delta\varphi$  可以使每个单元都满足条件，但当使用宽带信号时，若仍保持  $\Delta\varphi$  为常数，由上式可得：

$$\Delta\theta = -\frac{\Delta\omega_m}{\omega_m} \cdot \tan \theta \quad (9)$$

$\omega_m$  为微波频率，由一定的频带宽度  $\Delta\omega_m$  引起了波束偏斜  $\Delta\theta$ 。

因此传统阵列天线面临的一个难以克服的问题是：给辐射单元提供所需相位的移相器，当微波信号为宽带时，会引起波束指向倾斜，实时延技术则可以克服宽带信号引起的波束倾斜现象。

因为相差与频率和时间的关系为

$$\Delta\phi = \omega \cdot \Delta t \quad (10)$$

所以有

$$\omega \cdot \Delta t = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \theta$$

则得到实时延公式

$$\Delta t = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (11)$$

由此可见，若采用实时延技术，因为  $c = f \cdot \lambda$ ，当工作波长  $\lambda$  改变， $c$  并不产生变化，如果  $\Delta t$  不变， $\sin \theta$  就为一个常数，即是不会发生波束角  $\theta$  倾斜的现象。因此为了实现消除宽带波束倾斜现象，可以采用实时延技术<sup>[5]</sup>。

实时延技术即是把微波信号馈送到各个辐射单元时，由延时网络控制信号传输到各阵元的时间，由于波束的指向跟频率无关，因此不需要根据频率的变化而改变延迟线的长度。传统的方法是采用同轴电缆或波导作为微波延迟线，当构成大型、复杂的波束形成网络时，它们的重量和体积都比较大，尤其是在飞机、舰船、卫星等许多对体积、重量要求严格的环境中不实用；再从降低综合信息系统的整体成本、减轻重量、实现良好的电磁兼容特性等方面来看难以满足要求。这样使得实延迟线并没有因为其巨大的带宽潜力而得到普遍应用。

光电子技术的发展为光电技术应用到超宽带、大容量、多功能的高性能阵列天线中提供了新的思路，同时又以其体积小、重量轻而更加引人注目<sup>[6]</sup>。本文的方案即采用光学实时延技术来实现波束形成。

### 3 样机实验结果及波束形成网络传输试验性能分析

#### 3.1 样机实验结果

原理样机实现了光学波束形成，图 2、图 3 示出了其中的 2 个实验结果。将各个波束指向总结为表 1，得到：

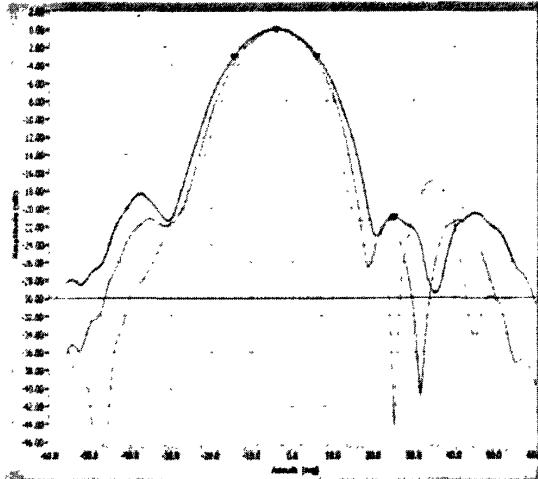


图 2 实测原理样机波束 1 方向图

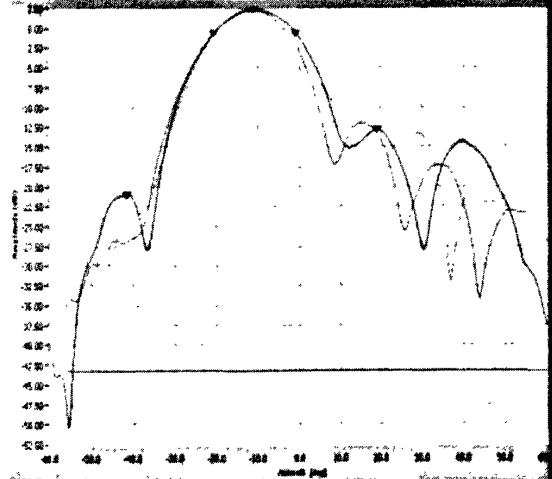


图 3 实测原理样机波束 2 方向图

从表中可以看出：1.3GHz 处各波束指向与其余各波束相比少许偏差。这是因为在设计原理样机时，假设各路信号电道上的绝对路径相同，包括天线单元之间、连接电缆之间、低噪声放大器之间的相位一致性很好；各路之间路径几乎相等；其相对时延是纯粹的光路上的时延，而实际制作中电道上的路径并不完全相同，从光波束形成网络的射频输入口到低噪声放

表 1 实测波束指向

频率	波束 1	波束 2	波束 3	波束 4
1.3GHz	-4°	-11.5°	4.5°	13°
1.5GHz	-4°	-12°	4°	12.5°
1.7GHz	-4°	-12°	4°	12.5°

大器的 4 路射频电缆并不等长，引入了一定电路上的相对时延。同时天线单元之间的互耦影响（实测互耦值在频率较低的频段内要相对大一些）。此外，由于各个频点之间的阻抗不一致性使得其真正的输入相位也不一样，导致空间相位差与阵内相位差并不平衡，从而影响了波束特性。所以实测波束指向产生了少许误差。可以采取一定的改进方法使其更准确，如改进天线阵面设计，尽量减小互耦影响等。从实测结果中可以看出采用光学波束形成技术形成的波束，指向精度高；不存在波束随频率倾斜现象；同时，样机实现了 L 波段 400MHz 带宽波束，说明波束形成网络采用光学波束形成技术，带宽很宽，对于现今采用的射频波束形成网络和数字波束形成网络存在的带宽限制问题有着极大的诱惑力。

前面的初步研究结果表明了光学波束形成技术的可实现性。一般的波束形成网络是在射频上实现或由数字波束形成网络来构成，通常认为光波频率过高，在光学上依靠光器件来实现比较困难，通过此光学波束形成原理样机的实验证明，通过光可以实现射频波束形成。

### 3.2 波束形成网络传输试验及性能分析

由于该天线用到了光调制与解调技术，它是否会引起微波信号失真及在何种情况下可以使失真现象降到最低限度甚至避免失真是一个很关键的问题，直接影响到在实际通信系统中是否可行。因为若微波信号失真，将直接导致调制在微波上的基带信号失真而使图像、语音、数据信号等无法解调出来。反之，若已调的微波信号没有因为经过了与光波的转换而发生非线性变化，则基带信号可以被解调出来。

因为本文所设计的光学波束形成天线是由天线阵面与光学波束形成网络两个模块所构成，针对上面问题，本文进行了两种具有代表性的数字调制信号（GMSK， $\pi/4DQPSK$ ）通过光学波束形成网络的传输试验，取得了预期效果，如图 3 所示：

如图 4 所示的 GMSK 信号： $BT=0.5$ ，码速率为 100 kbit/s，载波频率为 1.5GHz，它是一个恒包络信号。当此恒包络信号通过光波束形成网络即经过了一个光调制与解调过程后，再从频谱分析仪上得到的信号频谱如图 5 所示。从频谱分析上看，信号频谱几乎无变化；因为网络内置增益放大器，所以整个网络有约 27dB 的增益。

如图 6 所示的  $\frac{\pi}{4}DQPSK$  信号： $\alpha=1$ ，码速率为 100 kbit/s，载波频率为 1.5GHz，它是一个非恒包络信号。

当它通过光波束形成网络后得到的信号频谱如图 7 所示。可以看出，经过了光调制与解调及增益放大后，副瓣有所升高，这是一个非恒包络信号经过了非线性器件如检波器等后固有的现象，但是从信号频谱上看，此处副瓣的升高并不足以使信号完全淹没在噪声中。

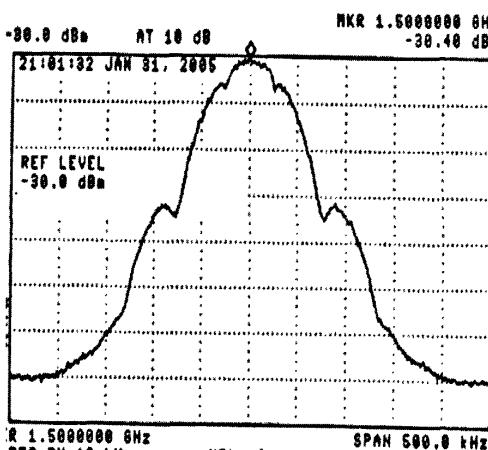


图 4 GMSK 调制信号

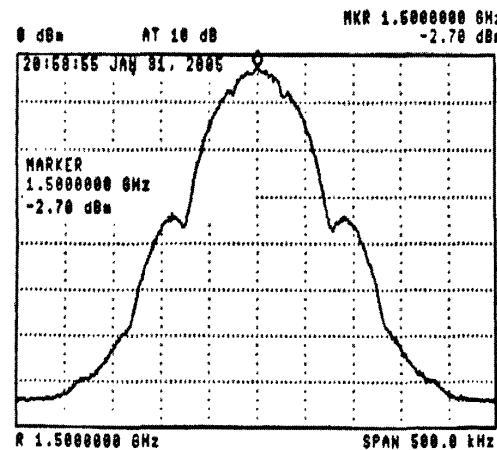


图 5 通过波束形成网络的 GMSK 调制信号

基带调制信号分为恒包络信号和非恒包络信号，上面的两种信号具有代表性。对它们经过了光调制与解调后的频谱分析可以看出：当激光源工作在线性区，PD 检波器的输入功率适当（即不饱和），则被基带信号调制的微波信号经过了光调制与解调过程后，从频谱分析上看，没有对基带信号造成影响。

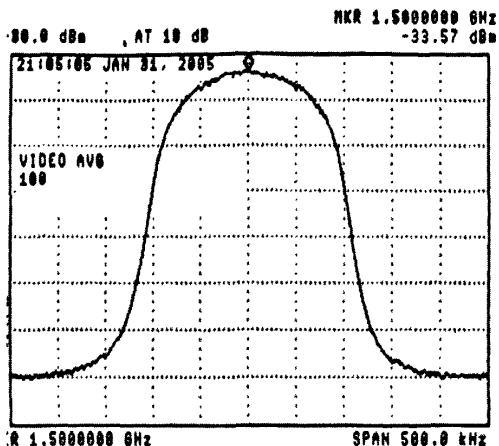


图 6  $\pi/4$ DQPSK 调制信号

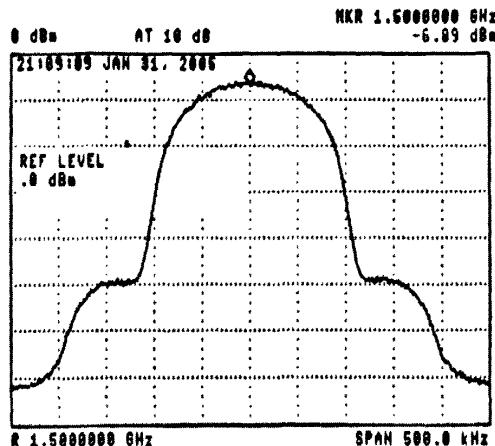


图 7 通过波束形成网络的  $\pi/4$ DQPSK 调制信号

## 5 结论

文中所用到的光器件有：激光器，探测器，光纤，光耦合器等，这些器件都已商品化。随着光电子技术和微电子技术不断取得突破，光电器件和光电子集成（OEIC）及光子集成（PIC）器件的性能水平还在不断提高，另外对光交换技术及光互连网络所进行的深入研究，也取得了大量成果，所有这些技术的不断成熟极大地推动了光电子技术在微波领域的应用。

光电子技术在阵列天线中的应用为实现天线系统性能的大幅度提高提供了独特的技术途径，同时可以更好的解决复杂天线系统庞大的体积与重量问题。所以说在卫星天线及相关领域应用光电结合技术是一项新发展起来的有着强大生命力的技术，它集中了微波、毫米波及光学的多种优点，也将使各种军用/民用雷达、卫星、空间飞行器、跟踪与数据中继卫星、飞船、导弹、轮船、潜艇和无线通信系统的技术水平得到飞跃性提高。

本文实现了采用实时延时技术的 L 波段 400MHz 带宽内波束指向无倾斜的光学波束形成天线。实际测试结果表明了光学波束形成技术的可实现性及宽带特性。同时，通过两种具有代表性的基带数字调制信号的传输试验，表明了光学波束形成技术在实际通信系统中的可行性。鉴于国内尚未有相关研究的报道，因此，本文是对光学应用于微波天线波束形成进行探索的总结。

## 参 考 文 献

- [1] Wille Ng, Andrew A. Walston, etc. The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay. SPIE Vol.1958/123-130.
- [2] Rajender Razzan, D.K.Paul, B.J.Markey. Communications performance of a multi-beam multi-carrier photonic beam-forming and beam-steering feed network for satcom phased array antenna. AIAA-96-1160-CP.
- [3] Fumio Kira , Toshikazu Hori. Beam Forming Network Design for Cluster Feeding of Scanning Antenna. IEEE 2000 pp133-135.
- [4] 汪茂光, 目善伟, 刘瑞祥. 阵列天线分析综合. 电子科技大学出版社, 1988 年.
- [5] 张光义. 相控阵雷达系统. 国防工业出版社, 1994 年.
- [6] Zhenhai Fu. SUBSTRATE-GUIDED WAVE TRUE-TIME DELAY NETWORK FOR PHASED ARRAY ANTENNA STEERING. University of Texas at Austin, 2000.
- [7] 黄章勇. 光纤通信用光电子和组件. 北京邮电大学出版社, 2001 年.
- [8] J.H.Franz, V.K.Jain 著. 徐宏杰等译. 光通信器件与系统. 电子工业出版社, 2002 年.

# An Optical Beam Forming Antenna and the Research of Its Feasibility

Yang Wenli, Liu Bo, Wu Chunbang and Cui Zhaoyun

Institute 504 of the China Academy of Space Technology

P. O. Box 165, Xi'an, 710000, liwenyoung@163.com

**Abstract** In this paper, an optical beam forming antenna is developed on the basis of TTD (true time delay). The thesis expatiates upon the project design and analyzes it firstly, and then the principles of TTD are described in details. Afterward, the paper gives the experiments on the antenna-sampler and a successful test of the digital-modulated signals through the OBFN, as well as the detailed analysis. Finally, the thesis draws a conclusion that indicates the potentials and advantages of OBFN for array antennas applied to the military/civilian communications satellites in the future.

**Key words** Optical beam forming antenna; True time delay; Beam forming network; Transfer experiment

## 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](http://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](http://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](http://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>