

光通信技术在相控阵天线中的应用

江苏中博通信有限公司 沈顺元

摘要:在简要介绍微波相控阵天线基本特性的基础上,详细介绍了用于微波相控阵天线的光子实时时延(TTD)波束形成网络及其性能特点。

关键词:光纤通信;相控阵天线;实时时延;波束形成网络

采用光通信技术的光控相控阵天线克服了微波延时线的固有缺点,能构成快速动态可重构的宽带多功能天线阵列符合未来相控阵天线系统发展的方向。在无线接入网中,光通信技术的应用领域主要在两个方面。第一,基站与网络中心之间由大量的光纤链路来互联,采用波分复用(WDM)技术,构成一个可扩展、易管理的光纤传播网。网中的子系统能完成各种功能,如E/O(电/光)、O/E(光/电)转换及微波信号的光处理等;第二,采用光控相控阵技术,构建智能天线,用于固定和移动的宽带无线接入系统。另外,由于光纤损耗低(在1550 nm波长上仅为0.2 dB/km),因此可以将信号处理、波束控制、数据处理等设备放置在离天线较远的地方,这有利于提高雷达的生存能力,或将大的雷达阵面分散成若干较小阵面,配以适当的数据处理,以获得更高的实孔径角分辨能力和测角、定位精度。

1 微波相控阵天线的基本特性

图1为由N个线辐射阵元构成的微波相控阵天线结构示意图。两个阵元之间的距离为d。为了操纵控制波束的方向,激励每一个辐射单元的微波信号(频率 ω_m)从射频(RF)输入端输入后,首先要通过由N个移相器构成的RF相移单元,再送到每一个阵元。各个阵元的辐射在 θ 方向合成天线的辐射波束。

设相移单元的RF输出输入之比为 $a_n \exp(i\varphi_n)$,式中 a_n 为单个阵元的辐射图形, φ_n 为移相器产生的相移。为了简化,设每个辐射元的

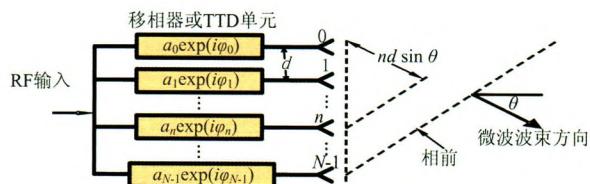


图1 微波相控阵天线结构示意图

辐射图是无方向性的,则沿 θ 方向的天线波束远场图可表示为

$$E(\theta, t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \exp(i\omega_m t) \exp[i(\varphi_n + nk_m d \sin \theta)] \quad (1)$$

式中, $k_m = \omega_m / c$ 为辐射波束的微波波数, c 为光速。 $E(\theta, t)$ 的时间不相关部分正比于天线的阵列系数。相前如图1中的虚线所示,因此辐射波束的方向,就可以通过电子控制阵列相邻辐射元之间的相对相位来指向。例如,若波束指向角为 θ_0 ,则相移 φ_n 的值应设定为

$$\varphi_n = -nk_m d \sin \theta_0 \quad (2)$$

在相控阵天线中,在固定的频率范围内,微波“移相器”能提供特定的相移值。

对式(2)微分,立即可见:对于一个固定的 φ_n 值,如果微波频率瞬间改变了 $\Delta\omega_m$,则辐射波束方向会产生 $\Delta\theta_0$ 的偏移。

$$\Delta\theta_0 = -\tan\theta_0 \frac{\Delta\omega_m}{\omega_m} \quad (3)$$

这种波束方向的偏移是不希望的,因为它导致了 θ_0 方向天线增益的下降。这种现象通常称为“波束偏移(beam squint)”。

为了获得宽的瞬时带宽,可以考虑采用“延时器(time shifters)”来代替上述的“移相器(phase-shifters)”,以建立阵元之间的相对相移。所谓的“实时时延(TTD)”方法,实际上就是通过延长馈入到辐射阵元(该阵元与微波相前之间的路径较短)的微波传输时间,以补偿两个阵元之间的路径差。采用一组固定的延时线,就能补偿相当于一个特定指向角 θ_0 的所有频率上的路径差。特别是,激励第 $n+1$ 个天线元的微波,传播通过了一条长度为 $nL(\theta_0)$ 的额外延时线。设计这条延时线的长度,使第 $n+1$ 个时延单元产生的时延为

$$t_n(\theta_0) = (nd \sin \theta_0) / c \quad (4)$$

如果微波在该延时线中的群速为 v_m ,则有

$$L(\theta_0) = (v_m d \sin \theta_0) / c \quad (5)$$

对于所有的频率 ω_m ,相移 φ_n 可以表示为

$$\varphi_n = -\omega_m t_n(\theta_0) \quad (6)$$

将式(6)代入式(1),可以发现:式(6)能够使得在 θ_0 方向所有的频率上产生结构性干涉。即使是 ω_m 瞬时地改变,辐射的波束也不会从 θ_0 方向产生偏移。这种TTD指向天线所固有的宽瞬时带宽特性很容易得到证实:当 ω_m 从一个频率跳到另一个频率时没有出现波束偏移。

虽然对于TTD波束形成网络的宽带其潜力早就认识到了,但很长时间以来没有能够实际实现,因为传统的微波同轴电缆/波导延时线体积大、重量重,难以构成大规模的天线阵列。

2 光子TTD波束形成网络

采用光子实时时延(TTD)技术的相控阵波束形成系统能克服同轴线/波导微波延时线的缺点,实现实用的TTD波束形成,是当前光控相控阵天线的主要研究方向。

图2为光控相控阵天线(PAA)的结构配置示意图,其中的关键之一是光子TTD网络,它为后面的天线阵元提供需要的实时时延。图中的多波长光源(MWL)发射 N 个独立的光波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$,波长数与PAA的阵元数相同;这 N 个波长进入电光调制器(EOM)被同一个微波(RF)信号调制后,传输通过TTD波束形成网络,每个波长产生不同的时延;然后,这 N 个经过延时的调制光载波被波分复用复用器分离开,经光电二极管(PD)检测还原出调制的微波信号,最后分别送入对应的PAA阵元。

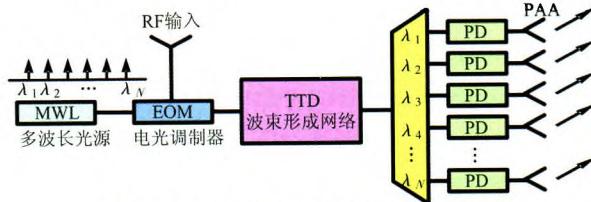


图2 光控TTD相控阵天线的结构示意图

光子TTD波束形成网络主要分为两类,即路径交换时延网络和调制传播速度时延网络^[1]。路径交换时延线是一种模仿微波TTD波束形成的方法:采用一组不同长度的光纤,串以 2×2 的光开关,通过光交换选择一定长度的光纤组合,以得到希望的某个时延值 $\Delta_t = DL \Delta \lambda$ 。其中 D 为光纤的色散系数, L 为光纤的长度, $\Delta \lambda$ 为光载波的波长间隔。例如,用4个 2×2 的光开关,中间串以三根长度为 $L, 2L, 4L$ 的标准单模光纤,即可构成一个有8个不同组合、3bit的光子波束形成网络,对应于8个不同的天线指向角,见图3。采用这种TTD网络的例子非常多,一个例子是工作在42.7GHz、用于固定和移动宽带无线接入网的实验系统^[2]。另一个典型的实验中,采用交换光源和检测器的方法,实现了96个(24×4)阵元的指向,扫描范围 $\pm 60^\circ$,带宽50%^[3]。然而,像微波波束形成网络一样,采用这种延时线的光TTD波束形成网络受到分辨率问题的限制,除非其基础相移器能提供可变的相移。为了产生大的时延,需要长光纤,而这种时延可能伴有色散所致的RF信号衰减,限制系统的瞬时带宽。

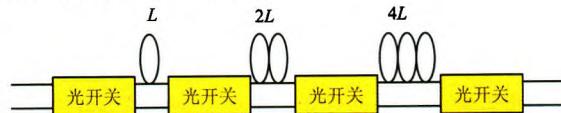


图3 路径交换光纤延时线TTD网络

调制传播速度的技术看来是所有光子TTD波束形成网络方案中最有希望的,该波束形成网络为每个天线阵元提供一个与波长相关的时延,该时延正比于相应阵元在阵列中的位置。为此,需要在阵列上采用渐变的光色散。而只要调谐光源的波长,就能将这种色散渐变转换成天线上的时延渐变,进而产生时间指向的辐射图形。色散渐变的实现方法有:色散光纤、色散棱镜或光纤布拉格光栅(FBG)。当然,这些方案需要采用可调谐光源,因此价格较高。

图4为一个典型的由FBG构成的TTD网络,当调谐光源(TLS)的波长时,利用FBG的对不同波长的反射特性,合理配置FBG在空间的位置分布,每个波长有不同的来回反射时间延时,实现不同的时延。

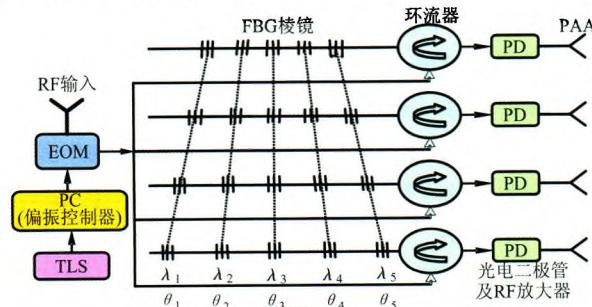


图4 采用FBG的光相控阵波束形成装置

尽管这些方法在原理上的可行性已经得到了验证,但它们

在实际应用中的局限性也是明显的：它们只能提供分立的而不是连续的时延变化，因而只能获得分立的波束指向；同时，这类结构也缺乏扩展成更大阵列的能力，通过波束形成网络的信号响应时间也较大。另外，在采用 FBG 的结构中，如果 FBG 之间的间隔非常小，制造难度大。

3 连续可变光子 TTD 波束形成系统

为了实现阵列波束的连续指向，采用调谐光载波波长或调谐啁啾光栅的啁啾速率的方法，能很好地满足对阵列的重构及波束扫描速度等的性能要求，因此是一种最有希望的技术。其中，啁啾光纤光栅(chirped-FBG)是一种能实现连续时延及具有潜在快速调谐能力的简单技术，因此很有可能在未来用于实际的光子相控阵天线系统中。已经提出了多种采用啁啾光纤光栅的光子相控阵系统方案。例如：采用单条啁啾光纤光栅的连续 TTD 波束形成网络^[4]，采用可调谐啁啾光纤光栅延时线的连续 TTD 波束形成系统^[5]，采用多信道啁啾光纤光栅的连续可变 TTD 波束形成系统^[6]等。

图 5 为采用多信道啁啾光纤光栅(MCFG)的连续可变 TTD 波束形成系统，再结合波分复用技术，从而既能缩短需要的光栅长度和制造难度，又降低了每个波长上的插入损耗。因此，该方案不但能拓展到较大的实用上所要求的阵元数，同时又能保持紧凑简单的结构，采用低价格的元件，能满足阵列波束扫描和重构速度的系统要求。

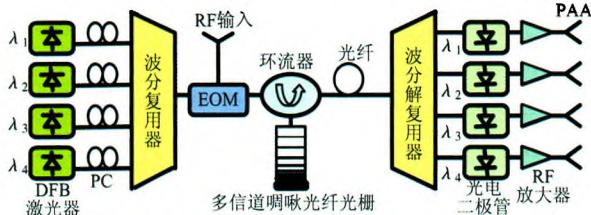


图 5 多信道啁啾光纤光栅 TTD 光子波束形成装置

文献[6]还报道了实验的结果。制造了一个长度约为 80 mm 的 8 信道光栅(实验中仅用了 4 个信道)，光栅间隔 150 GHz，每个信道的时延超过 300 ps、反射带宽约 0.6 nm 及反射率约 80%。该 MCFG 原设计是供支持 8 个阵元的系统，频率范围 8~16 GHz，阵元间隔为半波长，波束指向范围为 $\pm 40^\circ$ 。这就要求每个信道的最大时延为 187 ps。用 4 个商用分布反馈(DFB)激光器，进行了 4 信道的实验。这样，只需要可用的 300 ps 时延中的 88 ps。这些激光器通过热调谐覆盖了整个光栅的反射谱。

为了指向天线，需要把每个光源的波长调谐到相应于每个阵元指向要求的时延。图 6 为时延要求与波束指向角的关系，图 6 中也示出了每个信道相对于每个光栅短波长端(信道 1)要

求的波长调谐范围。例如，对于 30° 的波束角，信道 2 的相对信道 1 的时延约为 20 ps，而相应的波长变化约为 45 pm。

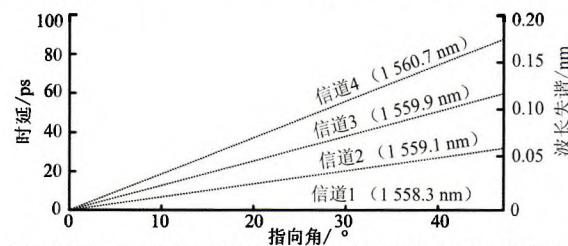


图 6 四阵元天线的时延和相应的波长变化与指向角关系

将每个激光器光源调谐到它相应信道的前沿，就能获得一个瞄准线的波束图形，这导致每个调制的载波之间产生零相对时延。对 8~16 GHz 频率范围内测量的瞄准线波束图形表明，对于这些希望的指向角的波长设定，是与 RF 频率是无关的。也就是说，调制信号变化时不会影响波束指向的方向。这也是 TTD 波束形成网络的特性。

按照图 6 选择每个信道的波长，提供调制载波之间要求的差分时延，就能获得阵列辐射图形的指向。对于一个 4 阵元的系统，波束指向要求的最大时延，最大的波长调谐范围约 0.17 nm。预期在目前的光栅制造水平，MCFG 的长度可达 15 cm。这样，阵元数可超过 100 个，信道间隔 100 GHz 时，仍可保持 70% 的反射率，每个信道的群时延脉动仍保持足够的低。如果降低信道间隔和信道带宽，并进一步增加光栅长度，阵元数还能进一步增加。但由于制造光栅时光纤中折射率变化的饱和，信道反射率会下降。光栅长度增加时，一般会使群时延的脉动增加。因此，如果要求的阵元数较多时，该方案存在一定的局限性。

参考文献：

- [1] MINASIAN R A, ALAMEH K E. Optical-fiber grating-based beam forming networks for microwave phased arrays [J]. IEEE Trans MTT, 1997, 43(12): 2378~2386.
- [2] CRUZ J L. Chirped fiber Bragg gratings for phased-array antennas [J]. Elec Lett, 1997, 33(7): 545~546.
- [3] ORTEGA Beatriz. Variable delay line for phased-array antenna based on a chirped fiber grating [J]. IEEE Trans on MTT, 2000, 48(8): 1352~1360.
- [4] LIU Y, YANG J, YAO J P. Continuous true-time-delay beam forming for phased array antenna using a tunable chirped fiber grating delay line [J]. IEEE Phot Tech Lett, 2002, 14(8): 1172~1174.
- [5] LIU Y, YAO J P. Wideband true time-delay beam former employing a tunable chirped fiber grating prism [J]. Appl Opt, 2003, 42(13): 2273~2277.
- [6] HUNTER David B. Demonstration of a continuously variable true-time delay beamformer using a multichannel chirped fiber grating [J]. IEEE Trans on MTT, 2006, 54(2): 861~867.

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>