

光开关串扰及其对光控相控阵列系统的影响研究

高瑜翔 何子述 徐继麟 韩春林

(电子科技大学电子工程学院 1611 实验室 成都 610054)

摘要 建立了光开关时延波束形成网络中光开关串扰和光控相控阵列的模型, 在此基础上, 通过计算机数值仿真, 研究了光开关串扰对光控阵列方向图, 包括最大值指向偏移、旁瓣电平的影响以及对阵列接收的线性调频(LFM)雷达信号的脉冲压缩的影响。仿真结果表明光开关的串扰比应小于 20dB。

关键词 光控相控阵雷达, 开关串扰, 方向图, LFM 脉冲压缩

中图分类号: TN958.92, TN249

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0647-03

Study of Optical Switch Crosstalk and Its Influence on Optically Controlled Phased Array Radar System

Gao Yu-xiang He Zi-shu Xu Ji-lin Han Chun-lin

(College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract In this paper, numerical simulation models of crosstalk for optical switch in time-delay beamforming network and of optically phased array are built. Based on the computer simulation, influences of crosstalk on pattern, including pointing deviation and sidelobe level, and on compression of LFM received by an array are studied. Simulation results indicate that the crosstalk ratio in optical switch must be less than 20dB.

Key words Optically phased array radar, Switch-crosstalk, Pattern, LFM pulse compression

1 引言

光控相控阵雷达中采用光真实延时技术(True Time Delay, TTD), 通过将整个阵列划分成许多子阵, 在子阵上采用光开关可变延时网络实现宽带宽角扫描和波束形成, 从而大大改善了普通移相相控阵的瞬时带宽工作能力^[1,2]。但是, 光开关时延网络中的光开关由于并不是一个理想的开关器件, 从而对光控阵列方向特性和系统性能存在着较大的影响, 特别是开关的串扰特性会严重影响阵列的方向特性, 如指向产生偏斜和旁瓣电平变化, 这样又限制了相控阵列的工作带宽。在参考文献[3]和文献[4]中, 研究了光开关中的串扰对光链路噪声的影响和转换, 而未研究光开关串扰对整个阵列方向特性及其阵列接收的线性调频雷达信号的脉冲压缩的影响。本文将建立光开关的串扰模型和光控阵列的数值模型并通过计算机仿真来研究此问题。文中的分析和研究结果将为光控相控阵列系统中光开关的选用指标和研究提供理论依据; 同时, 虽然重点研究了光开关的串扰影响, 但对光控阵列中存在的其它类似的串扰与耦合同样适用。

2 光控相控阵列和光开关串扰的数学模型

由于光开关串扰对相控阵的影响十分复杂, 很难通过解析推导得到理论结果。要研究光开关串扰对光控相控阵列方向特性及其系统的影响, 只有建立相应的数值模型, 通过计算机仿真来实现。

2.1 具有子阵级 TTD 的光控相控阵列模型

对于一维均匀直线阵列, 按照如图1所示的配置, 整个阵列采用子阵的结构形式。阵列天线的波束指向和扫描是通过各个单元的移相器和子阵上的TTD元来完成的。设整个阵列由N个单元构成, 并将其分成M个子阵, 每个子阵内的单元数为 n_s 。

设阵列总的各单元空间时延算子向量为

$$\bar{S} = [\bar{s}_1^T, \dots, \bar{s}_i^T, \dots, \bar{s}_M^T]^T \quad (1)$$

其中 $\bar{s}_i = [\dots, (M-i)\tau', (n_s-l)\tau_s, \dots]_{n_s \times 1}^T$; i 为子阵序号, $i=1, 2, \dots, M$; l 为子阵内天线单元序号, $l=1, 2, \dots, n_s$ 。 $\tau' = n_s\tau_s$, 表示子阵间的空间时延量, $\tau_s = d\sin\theta/c$, 表示相邻单元的空间时间差, d 为单元间距, θ 为方向角, c 为光速。

设阵列总的各单元上波束指向相移向量为

$$\bar{A}_B = [[\bar{a}_B]_1^T, \dots, [\bar{a}_B]_i^T, \dots, [\bar{a}_B]_M^T]^T \quad (2)$$

其中

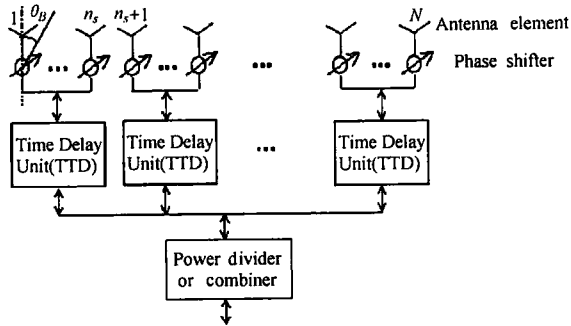


图1 子阵级延时的光控相控阵列结构
Fig.1 Configure for optically controlled phased array with TTD at subarray

$$\bar{a}_B = [1, \dots, e^{-j(l-1)\varphi_B}, \dots, e^{-j(n_s-1)\varphi_B}]^T_{n_s \times 1} \quad (3)$$

表示每个子阵内各单元的波束指向相移向量，而 $\varphi_B = k_0 d \sin \theta_B$ ， θ_B 为指向角， $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ， λ_0 为设计频率对应的波长。

又设阵列总的子阵提供的、各单元时延算子向量如下：

$$\bar{T}_B = [\bar{T}_{B1}^T, \dots, \bar{T}_{Bj}^T, \dots, \bar{T}_{BM}^T]^T_{N \times 1} \quad (4)$$

其中 $\bar{T}_{Bj} = [-(i-1)\tau, -(i-1)\tau, \dots, -(i-1)\tau]^T_{n_s \times 1}$ ，表示每一子阵延时单元提供的、子阵内各单元的时延算子向量，其中， $\tau = n_s \tau_B$ ， $\tau_B = d \sin \theta_B / c$ 。从而具有TTD的光控阵列的模型为

$$\bar{T} = [\bar{T}_B \odot \bar{A}_B]^T \cdot \bar{S} \quad (5)$$

\odot 表示向量对应元素相乘；注意，算子向量 \bar{T}_B 和 \bar{S} 作用于信号，表示对信号延时，并不就是直接相乘。该模型表达式既是光控相控阵列的物理构成模型的抽象表示，又能方便地用于计算机仿真。

2.2 TTD 延时网络及开关串扰模型

图 1 中的 TTD 延时单元一般采用可变时延开关网络来实现，其构成如图 2 所示。它由 m 个由 TTL 电平控制的光开关 K_1, K_2, \dots, K_m 和 m 个分支耦合器及 m 个不同长度的时延段组成。该时延网络为 m 位可提供 2^m 个时延单位；改变开关的控制电平，就可以控制各开关的导通和截止状态，从而每个 TTD 时延网络的时延值就可以根据系统的扫描与指向的波控码，在 2^m 个时延单位中任意改变，完成波束扫描和指向。

为了分析开关串扰对相控阵列方向特性的影响，必须对其建立恰当的数学模型。由于分析问题和描述开关的状态、衰减和串扰特征的必要，下面采用矩阵模型来表示开关。

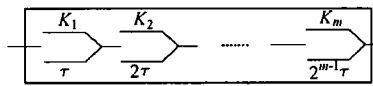


图2 TTD时延单元开关网络构成示意图
Fig.2 Structure of switchable time-delay network for TTD

描述开关的状态矩阵可表示为

$$S_{ip} = [s_{ip} \quad 1 - s_{ip}] \quad (6)$$

其中 s_{ip} 为第 i 个延时单元(TTD)的第 p 个开关的状态； $s_{ip} = 1$

表示开关处于延时导通， $s_{ip} = 0$ 表示开关处于零延时导通； $p = 1, 2, \dots, m$ ；

描述开关的衰减和串扰特征的矩阵可表示为

$$A_{ip} = \begin{bmatrix} L_{ip} & \alpha_{ip} \\ \alpha_{ip} & L_{ip} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 L_{ip} 表示第 i 个延时单元的第 p 个开关导通时衰减量； α_{ip} 表示第 i 个延时单元的第 p 个开关的串扰系数或耦合度；一般情况下，假定每一个开关的衰减和串扰系数都分别相同，以简化分析过程，而不影响分析结果。

描述开关的时延矩阵可表示为

$$D_{ip} = \begin{bmatrix} e^{j\omega\tau_{ip}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 τ_{ip} 表示第 i 个延时单元的第 p 个开关的时延值。

将式(6)，式(7)，式(8)相乘，则整个开关可表示为

$$SW_i = S_{ip} \cdot A_{ip} \cdot D_{ip} \quad (9)$$

式(9)清晰而完整地表示了考虑串扰特性后开关的数学模型，使用它可以使分析光开关串扰问题变得较为简单。从而第 i 个子阵上的 TTD 时延单元可表示为

$$D_i = SW_{i1} \cdot SW_{i2} \cdot \dots \cdot SW_{im} \quad (10)$$

在仿真时，用这里的 D_i 代替式(4)中的 \bar{T}_{Bi} ，则考虑了光开关串扰的、阵列总的子阵提供的各单元时延算子向量变为

$$\bar{T}_{B-Cross} = \left[[D_1, \dots, D_1]_{1 \times n_s}, \dots, [D_i, \dots, D_i]_{1 \times n_s}, \dots, [D_M, \dots, D_M]_{1 \times n_s} \right]^T_{N \times 1} \quad (11)$$

所以，考虑了TTD中光开关串扰的光控阵列的模型为

$$\bar{T}_{Cross} = [\bar{T}_{B-Cross} \odot \bar{A}_B]^T \cdot \bar{S} \quad (12)$$

由式(12)便可以通过计算机较方便地研究整个时延网络中所有开关存在的串扰对光控阵列的方向特性及其系统的影响。

3 串扰对光控相控阵方向特性的影响分析

在 2.1 节和 2.2 节中建立的数学模型基础上，通过计算机，便能够分析光开关串扰对阵列方向特性的影响。将信号代入式(12)，就可以进行计算机仿真了。

设阵列单元数 $N=32$ ，子阵数 $M=4$ ，指向角 $\theta_B=60^\circ$ ，信号频率 $f_0=1.3\text{GHz}$ ，波长 $\lambda_0=c/f_0$ ，单元间距 $d=\lambda_0/2$ 。根据上述条件，可以得到有关光开关串扰对方向图影响的仿真结果，如图 3、图 4 和图 5 所示。

图 3 为不同的开关串扰(耦合度)大小对阵列方向图的影响情况。从图中知，开关串扰对阵列方向图的最大值偏移、旁瓣电平和主瓣宽度均有影响，特别是对方向图的指向存在突出的影响，最大偏移达到 6° 。图 4 为开关串扰对方向图偏移影响，它表明随着串扰增加，阵列的指向偏移增大。图 5 表示了开关串扰对阵列方向图旁瓣电平的影响，随着串扰增加，方向图旁瓣呈现抬高的趋势。综合图 4，图 5 可以得到，

当开关的串扰比小于 -20dB 时, 串扰对方向图的影响可以忽略。仿真结果表明, 开关串扰将造成光控阵列指向误差从而损失了光控阵列的瞬时工作带宽, 降低了系统的目标定位准确性以及造成了因旁瓣电平抬高带来的旁瓣干扰的恶化。

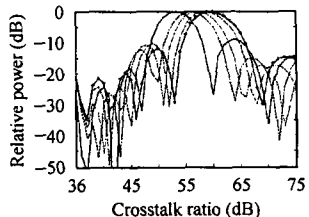


图 3 串扰对阵列方向图的影响
Fig.3 Effects of crosstalk on pattern

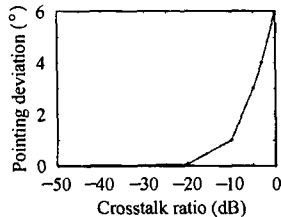


图 4 串扰对指向偏移的影响
Fig.4 Effects of crosstalk on pointing

4 串扰对 LFM 脉冲压缩的影响分析

在此仍然需要通过计算机仿真来研究光开关存在串扰时, 对阵列接收的线性调频脉冲信号被压缩后的影响。设输入阵列的 LFM 信号为 $s(t) = \exp(j(\omega_1 t + \pi u t^2))$, ω_1 为初始角频率, u 为调频斜率; 在此假设 $\omega_1 = 1.2 \times 10^9 \times 2\pi \text{ rad/s}$, $u = 2^{12} \text{ Hz/s}$ 。仿真时, 由于线性调频信号不是单频信号而是占有一定带宽的带通信号, 故需先将式(8)修改, 然后将 LFM 信号 $s(t)$ 代入式(12), 便得到阵列的输出信号 $s_0(t)$; 再假定接收信号经过 t_0 时间的延迟后压缩输出, 在此设 $t_0 = 50\mu\text{s}$, 则对 $s_0(t)$ 的脉冲压缩公式可写为

$$y(t) = s_0(t) \otimes s^*(t_0 - t) \quad (13)$$

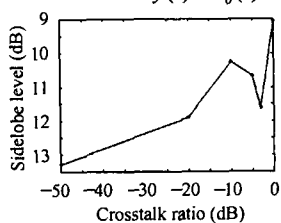


图 5 串扰对旁瓣电平的影响
Fig.5 Effects of crosstalk on sidelobe

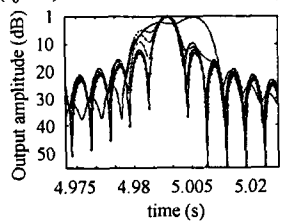


图 6 开关串扰对脉冲压缩的影响
Fig.6 Effects of crosstalk on pulse compression

⊗ 表示卷积, * 表示共轭。按照式(13)通过计算机仿真得到脉

冲压缩输出的归一化幅值如图 6 所示结果。从图中可知, 开关串扰对脉冲压缩影响很大, 随着串扰比的增大, 脉冲压缩后主瓣展宽及旁瓣升高, 这将会使得系统的目标距离分辨能力降低。仿真结果表明, 当开关耦合度小于 20dB 时, 串扰对系统的 LFM 脉冲压缩的影响甚微。

5 结束语

本文建立了光开关串扰和光控相控阵列的数值模型, 通过计算机数值仿真, 说明了光开关串扰不仅对光控阵列方向图, 包括最大值指向偏移、旁瓣电平存在着较大影响; 而且在接收阵列对 LFM 信号脉冲压缩后造成主瓣展宽及旁瓣抬高。故在研究和设计光开关时延波控网络时, 必须认真考虑光开关的串扰特性指标; 从计算机仿真结果知, 开关的串扰比应小于 -20dB, 才能忽略串扰对光控阵列方向和系统性能的影响。本文有关研究结果对光控相控阵列雷达系统设计有着十分重大的意义。

参考文献

- [1] Mailloux R J. Phased Array Antenna Handbook [M]. Boston-London: Artech House, 1994: 50 - 53.
- [2] Lee J J. Photonic wideband array antennas[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1995, 43(9): 966 - 981.
- [3] Schaffer Christian. Influence of crosstalk in switchable optical time-delay networks for microwave array antennas[J]. *IEEE Trans. on Microwave and Techniques*, 1995, 45(8): 1519 - 1521.
- [4] Schaffer Christian, Lubeck F H, Stephensonstr, et al.. Phase noise conversion in switchable time delay networks for microwave signal processing [J]. *MWP'97, International Topical Meeting on Microwave photonics*. Essen, Germany, 1997, 9(3-5): 265 - 267.

高瑜翎: 男, 1970 年生, 博士生, 从事宽带阵列天线和智能天线系统、光控相控阵雷达及其信号处理方面的研究。

何子述: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 从事阵列信号处理、智能天线、相控阵雷达、光控相控阵技术等方面的研究工作。

徐继麟: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事电路与系统、雷达系统、超宽带雷达、软件无线电等方面的研究。