

光纤链路相频特性对光控阵列影响的研究

高瑜翔^① 徐庆^① 何子述^②

^①(成都信息工程学院实时数字信号处理与应用重点实验室 成都 610225)

^②(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 通过光控相控阵列的数值模型和成对回波理论, 理论分析并仿真了光路相频特性的波动及其各子阵光路相频特性波动对光控相控阵列方向图与脉冲压缩的影响。结果表明光纤链路相频特性对阵列方向图和脉冲压缩存在一定影响, 但是由于阵列叠加作用, 这种影响可能被削弱。

关键词: 光控相控阵雷达; 相频特性; 阵列方向图; 脉冲压缩

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-1014-03

Influence of Optic-Link Phase Characters on Optically Controlled Phased Array

Gao Yu-xiang^① Xu Qing^① He Zi-shu^②

^①(Key Lab for Real Time Digital Signal Processing and Applications, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

^②(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the numerical simulation model of OCPAR and paired-echo theory, the phase fluctuation of optic-link, and the pattern and pulse compression of an array, which are influenced by optic-link's phase characteristics, are analyzed theoretically and simulated. The results indicate that the pattern and pulse compression of OCPAR are affected by the phase fluctuation of optic-link somewhat. But the influence may be weakened with the combination function of array.

Key words: OCPAR; Phase characteristics; Array pattern; Pulse compression

1 引言

光控相控阵雷达(Optically Controlled Phased Array Radar, OCPAR)采用光电子技术, 通过光纤真实延时(True Time Delay, TTD)改善普通相控阵雷达的瞬时带宽等诸多性能^[1-3]。文献[3]中给出了光控相控阵列的光延时链路的基本配置结构和方式, 本文的分析与研究以此为基础。由于各子阵上采用的光纤延时链路或延时网络, 其传输特性的实际幅频和相频特性并非理想的^[4-8], 必然存在着幅度和相位的波动, 但是这种波动对光控阵列的方向图和阵列信号的脉冲压缩是否存在影响, 如何影响以及产生的影响程度大小如何呢? 这是光控阵列与光链路系统设计时必须细致分析和研究的一个系统问题, 本文将围绕这些问题通过计算机仿真和成对回波理论进行分析和研究。

2 相频特性波动分析

光链路相频特性对光控阵列方向图和脉冲压缩的影响主要分为以下3种情况: 各子阵上光路相频特性一致时的情况; 各光路相频特性只是波动幅度不同时的情况; 各光路相

频特性只是不同步波动时的情况。本文仅讨论各光路相频特性只是不同步波动时对阵列方向图和脉冲压缩的影响。需要特别指出, 在此讨论光链路相频特性的影响时, 不考虑幅频特性的影响, 将其视为理想不变的。

理想的光纤链路相频特性应为频率的线性函数, 而实际的相频特性曲线并非一条直线, 而是存在着非线性波动, 在此假设光路相频特性是正弦波动的, 所以各子阵延时光路的相频特性可表示为

$$Ph_i(f) = (2\pi(f - f_0)t_g + \psi_0 \sin(2\pi(f - f_0)/B - \phi_i)) \quad (1)$$

ψ_0 为相位波动幅度值, ϕ_i 表示各路相位波动时不同的初始相位, B 为波动周期, f 表示频率, f_0 为所关心频带的中心频率, t_g 表示群延时。在研究光路相频特性波动对系统的影响时, 假定其幅度不波动, 恒为1, 并设 $t_g = \text{常数}$, 所以考虑了光路相频特性波动的各光路传输函数为

$$H_i(f) = e^{-j[2\pi(f - f_0)t_g + \psi_0 \sin(2\pi(f - f_0)/B - \phi_i)]} \quad (2)$$

图1是4个子阵上延时光路相位只是不同步波动时的相频特性, 它表明各个光路的相频特性不仅不是频率的线性函数, 且各光路的相频变化并非同步的, 相互间依次存在着一定的相位差。

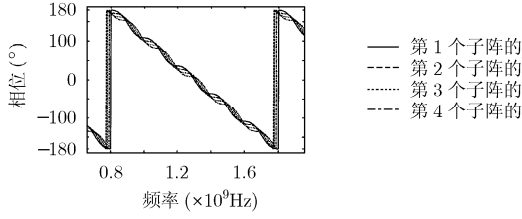


图1 4子阵上光路的相频特性的波动

3 光路相频特性对方向图的影响

将各个子阵上光路传递函数 $H_i(f)$ 分别与参考文献[9、10]中的每一子阵阵内时延算子向量 \bar{T}_{Bi} 相乘后, 得到受光路传递函数相频特性影响的阵列总的阵内时延算子向量变为

$$\bar{T}_{B-OAM} = [H_1(f)[\bar{T}_{B1}]^T, \dots, H_M(f)[\bar{T}_{BM}]^T]_{N \times 1}^T \quad (3)$$

所以, 考虑了光路传递函数相频特性影响的时延光控均匀线型阵列模型变为

$$\bar{T}_{OAM} = [\bar{T}_{B-OAM} \odot \bar{A}_B]^T \bar{S} \quad (4)$$

按照式(4)通过计算机仿真各光路相频特性不同步波动幅度时, 对光控阵列方向图的影响。阵列条件为 $N=32$, $M=4$, 各单元特性相同, LFM 信号带宽 200MHz, 中心频率 $f_0=1.3\text{GHz}$, 带宽 $B=200\text{MHz}$, 调频斜率 $u=2 \times 10^{12}\text{Hz/s}$, 本文其余分析和仿真的阵列条件与此相同。

图2是光路相位仅不同步波动时不同相位波动幅度下的方向图, 其中图2(b)为2(a)的归一化结果。从图中可知, 光路相位不同步波动对方向图指向和宽度没有明显影响, 只是随着相位波动幅度增大, 主瓣稍微展宽, 方向图的零陷深度减小较明显。

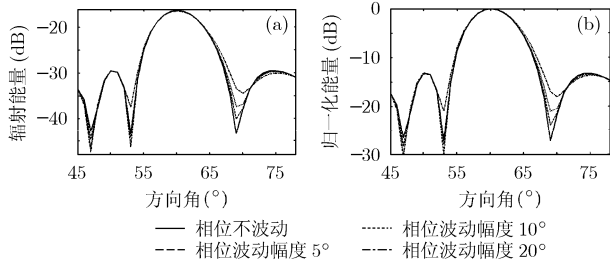


图2 相频特性仅不同步波动时不同波动幅度下的方向图

4 光路相频特性对脉冲压缩的影响

光路相频特性不同步波动对阵列信号脉冲压缩的影响分析, 可以由成对回波理论推导得到。根据参考文献[9,10]中的数学模型, 第 i 个子阵输出的信号可表示为

$$y_i(t) = \sum_{l=1}^{n_s} s(t + \tau_{i,l}) e^{-j\varphi_{i,l}} \Big|_{i=\text{定值}} \quad (5)$$

设作为参考的线性调频信号为

$$s(t) = e^{j(f_0 t + u t^2 / 2)} \quad (6)$$

由于 $\tau_{i,l}$ 和 $\varphi_{i,l}$ 分别为 $\tau_{i,l} = (i-1)(n_s \tau_\theta - \tau) + (l-1)\tau_\theta$ 和

$\varphi_{i,l} = (l-1)\varphi_B$ 。其中 $\tau_\theta = d \sin \theta / c$, θ 为方向角, $\tau = n_s \tau_B$;
 $\varphi_B = k_0 d \sin \theta_B$, θ_B 为指向角。

所以在指向方向上子阵输出的信号为

$$y_i(t) = \sum_{l=1}^{n_s} s(t + (l-1)\tau_B) e^{-j(l-1)\varphi_B} \quad (7)$$

对上式进行脉冲压缩得到其频域输出为

$$S_{\text{comp}_i}(f) = Y_i(f) S^*(f) e^{-j2\pi f \tau_B} \quad (8)$$

其中 $Y_i(f)$ 和 $S(f)$ 分别为 $y_i(t)$ 和 $s(t)$ 的傅氏变换, *表示共轭。式(8)对应的时域输出

$$s_{\text{comp}_i}(t') = \text{IFFT}(Y_i(f) S^*(f) e^{-j2\pi f \tau_B}) \quad (9)$$

当子阵上光路存在相频特性波动时, 则阵列输出的频域信号可表示为

$$Y(f) = \sum_{i=1}^M Y_i(f) H_i(f) \quad (10)$$

所以阵列输出信号的脉冲压缩的频域为

$$S_{\text{comp}}(f) = Y(f) S^*(f) e^{-j2\pi f \tau_B} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11), 并结合式(8)得

$$S_{\text{comp}}(f) = \sum_{i=1}^M [Y_i(f) H_i(f) S^*(f) e^{-j2\pi f \tau_B}] = \sum_{i=1}^M [S_{\text{comp}_i}(f) H_i(f)] \quad (12)$$

将式(2)代入式(12), 并由成对回波理论^[11], 结合式(9)可得式(13), 它就是子阵各光路相频特性不同步波动对阵列信号脉冲压缩输出的影响表示式。

$$\begin{aligned} s_{\text{comp}}(t') = & \sum_{i=1}^M \left[s_{\text{comp}_i}(t') - \frac{\psi_0}{2} e^{j(\frac{2\pi f_0}{B} - \phi_i)} s_{\text{comp}_i} \left(t' + \frac{1}{B} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\psi_0}{2} e^{-j(\frac{2\pi f_0}{B} - \phi_i)} s_{\text{comp}_i} \left(t' - \frac{1}{B} \right) \right] = M s_{\text{comp}_i}(t') \\ & - \frac{\psi_0 \sin(M\phi_\Delta/2)}{2 \sin(\phi_\Delta/2)} e^{j(\frac{2\pi f_0}{B} - \frac{M-1}{2}\phi_\Delta)} s_{\text{comp}_i} \left(t' + \frac{1}{B} \right) \\ & + \frac{\psi_0 \sin(M\phi_\Delta/2)}{2 \sin(\phi_\Delta/2)} e^{-j(\frac{2\pi f_0}{B} - \frac{M-1}{2}\phi_\Delta)} s_{\text{comp}_i} \left(t' - \frac{1}{B} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(13)得到各光路相频特性不同步波动时, 不同波动幅度下的阵列信号脉冲压缩幅值输出曲线如图3所示。从图中可知, 光路相位波动对脉冲压缩的影响表现为, 随着波动幅度增大, 压缩脉冲旁瓣稍微抬高, 脉压的零陷深度较显著地减小。波动幅度为 5° 时, 相对于不波动的旁瓣抬高了约 0.3dB; 波动幅度为 10° 时, 相对于不波动的旁瓣抬高了约 0.8dB; 只有在相位波动幅度很大时, 如图中的波动幅度为 20° 时, 脉压的旁瓣抬高接近 2dB。

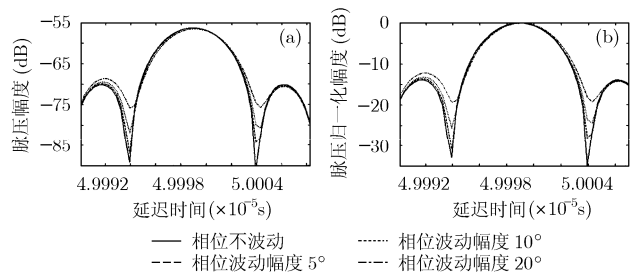


图3 光路相频特性仅不同步波动时不同波动幅度下的脉冲压缩

之所以光路相位波动对阵列信号脉冲压缩影响不甚突出,是因为尽管每一路相位波动幅度较大,而经过阵列合成在一起后,相位波动幅度将变小。通过式(2),当子阵各相邻光路相频特性以相位差 ϕ_Δ 正弦波动时的阵列频响特性可表示为

$$H(f) = \sum_{i=1}^M H_i(f) \\ = M - j\psi_0 \frac{\sin(M\phi_\Delta/2)}{\sin(\phi_\Delta/2)} \sin\left[2\pi(f-f_0)/B - \frac{M-1}{2}\phi_\Delta\right] \quad (14)$$

所以,其对应的相位为

$$\text{Phase}(f) \approx -\psi_0 \frac{\sin(M\phi_\Delta/2)}{M \sin(\phi_\Delta/2)} \sin\left[2\pi(f-f_0)/B - \frac{M-1}{2}\phi_\Delta\right] \quad (15)$$

由式(15)知,整个阵列的相位波动幅度比每一路的波动幅度减小了。将 $M=4$ 、 $\phi_\Delta = \pi/4$ 代入其中得到如图4所示的整个阵列相频特性的相位波动幅度比每一路的波动幅度变小的结果。从图中得知,当每一光路相频特性波动的幅度为 3° 时,叠加后的相频特性波动幅度变为约 2° ;当每一光路相频特性波动的幅度为 5° 时,叠加后的相频特性波动幅度变为 3.2° 。

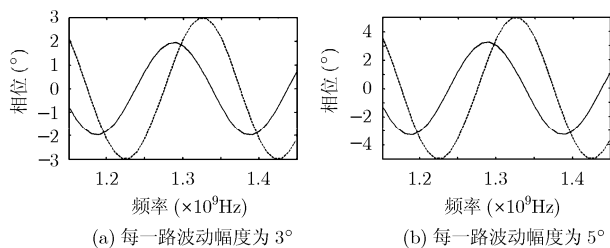


图4 子阵上和整个阵列的相频特性比较

5 结束语

本文研究了光纤链路相频特性的波动及其对光控阵列方向图和脉冲压缩的影响,通过成对回波理论推导和计算机仿真,结果表明光控阵列的方向图和脉冲压缩受到各子阵上光路相频特性波动的影响,且这种影响经过阵列的叠加作用被削弱了。从文中的分析和仿真知,子阵上光路相频特性波动对脉冲压缩的影响并非十分显著,但是并不意味着它对高性能的脉冲压缩雷达影响不大,对于这方面的研究将在后续工作中进行。

参考文献

- [1] Lee J J. Photonic wideband array antennas. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1995, 43(9): 966-981.
- [2] DuFort E. Optical technique for broadbanding phased arrays

antennas and propagation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1975, 23(4): 516-523.

- [3] 高瑜翔, 何子述, 徐继麟. 光控相控阵列天线瞬时带宽的理论分析与仿真. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(10): 1344-1347.
- [4] Gao Yu-xiang, He Zi-shu, and Xu Ji-lin. Theoretical analysis and simulation of instantaneous bandwidth for optically phased array antenna. *System Engineering and Electron Technology*, 2004, 26(10): 1344-1347.
- [5] Cox C H, Ackermann E, and Helkey R, et al. Techniques and performance of intensity modulation direct-detection analog optical links. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech*, 1997, 45(8): 1375-1383.
- [6] Ackerman E I and Cox C H. RF fiber-optic link performance. *IEEE Microwave Magazine*, 2001, 2(4): 50-58.
- [7] Prince J L, Ackerman E I, and Cox C H. Analog fiber-optic link technology. *Biophotonics & Optical Interconnects and VLSI Photonics/WBM Microcavities*, 2004 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, 2004: 43-44.
- [8] Ackerman E I and Cox C H. State of the art in analog fiber-optic link technology. *IEEE Signals, Systems, and Electronics, URSI International Symposium, PISA, ITALY*, 1998: 372-377.
- [9] Cox C H. Techniques and applications of analog fiber optic links. *IEEE Signals, Systems, and Electronics Proceedings, San Francisco, USA*, 1995: 283-286.
- [10] 高瑜翔, 何子述, 徐继麟, 韩春林. 光纤链路噪声及其对光控阵列的影响研究. *电波科学学报*, 2006, 21(1): 21-25.
- [11] Gao Yu-xiang, He Zi-shu, Xu Ji-lin, and Han Chun-lin. Noise analysis of fiber-optic link and its effect on optically controlled phased array system. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(1): 21-25.
- [12] 高瑜翔, 何子述, 徐继麟, 韩春林. 光开关串扰及其对光控相控阵列系统的影响研究. *电子与信息学报*, 2006, 28(4): 647-649.
- [13] Gao Yu-xiang, He Zi-shu, Xu Ji-lin, and Han Chun-lin. Study of optical switch crosstalk and its influence on optically controlled phased array radar system. *Journal of Electron & Information*, 2006, 28(4): 647-649.
- [14] 林茂庸. 信号理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 1984, 166-168.

高瑜翔: 男, 1970年生, 博士, 副教授, 主要从事宽带阵列天线、雷达和通信系统与信号处理方面的研究。

徐庆: 男, 1968年生, 博士后, 从事雷达及扩频通信信号处理。

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