

# 基于色散器件的波束形成网络中的色散限制\*

倪斌 郑小平 陈锐 张汉一

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 利用强度—频率混合调制模型研究了基于色散器件的波束形成网络中色散导致的相位误差的变化规律. 基于相位误差的分析, 得到了 0.5 ps 延时精度下系统对最大色散值的限制, 并指出存在最优的频率调制系数使系统色散容限最大; 随着强度调制系数增大, 频率调制系数的最优值也增大.

**关键词** 光微波; 色散; 强度—频率调制; 色散容限

**中图分类号** TN929.11

**文献标识码** A

## 0 引言

利用光波控制微波波束的形成, 因其在相控阵雷达、3G 等领域有着重要的应用而日益受到重视, 欧美等先进国家相继提出了多种原理的光控微波波束形成方案<sup>[1-4]</sup>, 其中基于色散原理的波束形成网络, 借助光纤、光纤光栅或其它色散器件动态、实时地控制微波的时延, 灵活性强, 实用性高, 备受关注<sup>[5-7]</sup>. 微波信号加载到光波后, 光频谱被展宽. 展宽的光波通过色散器件后, 不同频率的光波分量经历的延时不一致. 光电探测器对这样的光波进行光电转换, 所输出的微波信号将存在畸变. 文献[8~10]考虑了色散对于输出信号强度的影响, 得到了一定功率代价下色散对传输距离的限制.

在微波波束形成过程中, 相位的作用非常重要. 本文从强度调制—频率调制(IM-FM)模型出发, 研究了不同条件下色散器件引起的输出信号相位误差, 得到了系统色散最大值的限制, 结论对光控微波波束形成网络的设计及应用有着重要的指导作用.

## 1 理论分析

基于色散器件的微波波束形成网络, 其原理如图 1. 波长间隔为  $\Delta\lambda$  的多波长光源输出的光波被微波信号调制, 通过色散网络后分别被探测器(PD)探测, 输出信号送至天线阵列(PAA). 色散网络由一系列色散器件构成, 总色散为  $\delta$  (色散系数与链路长度之积, 单位 ps/nm); 通过改变各光开关的状态, 可以改变色散值. 理想情况下, 间隔为  $\Delta\lambda$  的两个光波通过色散网络后, 所携带的微波信号有  $\tau_0 = \delta\Delta\lambda$  的延时差. 因此图 1 系统中, 相邻探测器输出的微波信号之间有一个稳定的相位差  $\varphi_0 = \omega_{RF}\tau_0$ .

一个  $\varphi_0$  对应着天线阵列的一个空间扫描方向. 通过改变  $\delta$  或  $\Delta\lambda$  可以改变  $\varphi_0$ , 从而达到阵列扫描方向的改变. 实际工程应用中, 由于可调谐光源的限制, 调节  $\Delta\lambda$  的大小不如调节色散值  $\delta$  方便. 因此, 常常采用改变色散值的结构. 本文着重讨论该结构中相位误差随色散的变化以及对色散变化的限制.

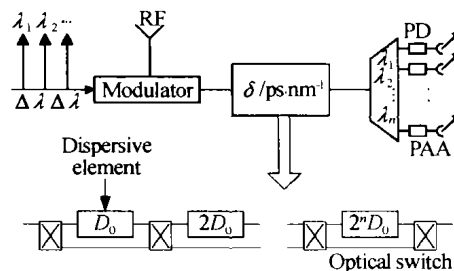


图 1 系统示意图

Fig. 1 Scheme of the system

根据强度调制—频率调制(IM-FM)混合模型<sup>[11]</sup>, 承载微波后光波的输出电场可以表示为

$$e(t) = \sqrt{1 + m_i \cos \omega_m t} \exp [j(\omega_0 t + m_f \sin \omega_m t)] \quad (1)$$

式中,  $m_i$  是强度调制系数,  $m_f$  是频率调制系数,  $\omega_0$  是光波频率,  $\omega_m$  是微波频率. 对式(1)进行展开

$$e(t) = L_0 \exp(j\omega_0 t) + L_{1+} \exp[j(\omega_0 + \omega_m)t] + L_{2+} \exp[j(\omega_0 + 2\omega_m)t] + \dots + L_{1-} \exp[j(\omega_0 - \omega_m)t] + L_{2-} \exp[j(\omega_0 - 2\omega_m)t] + \dots \quad (2)$$

其中,  $L_0 = \sum_{a=0}^{\infty} K_{2a} J_{2a}(m_f)$ ,  $L_{n+} = \frac{1}{2} (K_0 J_n(m_f) + K_n J_0(m_f)) + \frac{1}{2} \sum_{a=1}^{\infty} J_a(m_f) [K_{|n-a|} + (-1)^a K_{n+a}]$

$(n=1, 2, \dots)$ ,  $L_{n-} = \frac{1}{2} [(-1)^n K_0 J_n(m_f) + K_n J_0(m_f)] + \frac{1}{2} \sum_{a=1}^{\infty} J_a(m_f) [K_{n+a} + (-1)^a K_{|n+a|}]$  ( $n=1, 2, \dots$ ).

$J_n(m_f)$  是  $n$  阶第一类 Bessel 函数.  $0 < m_i < 1$  时,  $K_0$ 、 $K_n$  一般通过数值方法求解;  $m_i = 1$  时, 有  $K_0 = 2\sqrt{2}/\pi$ ,  $K_n = (-1)^{n+1} 4\sqrt{2}/\pi(4n^2 - 1)$ . 为了计算的方便, 文中计算取  $m_i = 1$ . 在本文的最后部分, 将讨论

\*国家 973 资助项目

Tel: 010-62795422 Email: nibin01@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-02-25

$m_i$  变化所产生的影响.

从式(2)可以看到,光波中含有了丰富的频谱成分,各个分量的频率间隔为  $\omega_m$ . 由于色散的作用,各频谱分量经历不同的延时. 忽略色散网络中色散元件的高阶色散,则  $\omega_0 \pm n\omega_m$  分量引起的相位变化为

$$\theta_n = (-\delta\lambda_0^2/4\pi c)n^2\omega_m^2 \quad (n=1,2,\dots) \quad (3)$$

这样考虑每个频谱分量的相位,得到光电探测器的输出电流为(忽略了  $\omega_m$  的谐波项)

$$i_{out}(t) = K\cos[\omega_m(t-\tau) + \varphi] \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为光波中心频率分量通过系统的固有延时,

$$K = 2 \left\{ \left| \sum_{n=0}^{\infty} [L_{n+}L_{(n+1)+} + L_{n-}L_{(n+1)-}] \cos(2n+1)\theta_1 \right|^2 + \left| \sum_{n=0}^{\infty} [L_{n+}L_{(n+1)+} - L_{n-}L_{(n+1)-}] \sin(2n+1)\theta_1 \right|^2 \right\}^{-1/2},$$

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{\infty} [L_{n+}L_{(n+1)+} - L_{n-}L_{(n+1)-}] \sin(2n+1)\theta_1}{\sum_{n=0}^{\infty} [L_{n+}L_{(n+1)+} + L_{n-}L_{(n+1)-}] \cos(2n+1)\theta_1}.$$

$K$  是色散导致的幅度变化,  $\varphi$  是色散导致的附加相位. 理想状态下,探测器的输出电流应该是  $i_{out}(t) = \cos \omega_m(t-\tau)$  (不考虑损耗); 对比式(4)可以看到,各频谱分量之间的延时差通过干涉作用对输出信号的幅度和相位有调制作用.

考虑阵列中的相邻两路信号,它们引入的附加相位差为  $\Delta\varphi$ . 如果  $\Delta\varphi = 0$ , 则相邻微波信号之间的相对相位差也不会改变(仍然为  $\omega_{RF}\delta\Delta\lambda$ ), 不影响系统精度; 但是实际  $\Delta\varphi \neq 0$ , 此时相邻微波信号之间的相对相位差为  $\omega_{RF}\delta\Delta\lambda + \Delta\varphi$ , 这会导致阵列扫描极大的峰值增益下降, 甚至改变扫描方向, 严重影响系统性能. 例如, 在微波 DQPSK (differential quaternary phase-shift keying) 接收系统中允许的相位误差方差为<sup>[12]</sup>  $2.8^\circ$ . 本文的计算都是针对  $\Delta\varphi$  进行的. 文中,  $\Delta\varphi$  用与之相对应的延时误差  $\Delta\tau_{err}$  ( $= \Delta\varphi/\omega_m$ ) 表示.  $2.8^\circ$  相位误差对应 10 GHz 时的延时误差约为 0.8 ps.

## 2 数值计算与结果分析

### 2.1 系统色散最大值的限制

图 2 给出了延时误差  $\Delta\tau_{err}$  随色散的变化关系. 从图中可知, 若系统精度要求为  $|\Delta\tau_{err}| < 0.5$  ps, 则  $\delta_{max} \approx 1840$  ps/nm. 不妨把系统精度能承受的最大色散值称为系统的色散容限. 图 3 是系统相位精度为 0.5 ps,  $\Delta\lambda$  分别为 1 nm 和 2 nm 时色散容限随工作频率的变化. 随着工作频率的升高, 系统的色散容限下降很快. 因为工作频率升高, 频谱上各分量之间的间隔增大, 因此受色散影响增大. 信号频率 40 GHz, 波长间隔为 1 nm 时, 系统的色散容限只有 350 ps/nm

左右. 而系统有时会采用很高色散的器件, 比如光纤光栅, 文献[4]中就采用了  $\delta = 850$  ps/nm 的光栅, 这就限制了系统所能应用的工作频率范围.

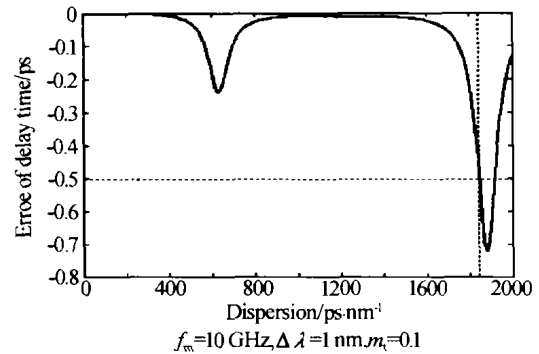


图 2 色散导致的延时误差随色散值的变化  
Fig. 2 Dispersion induced delay time error as a function of chromatic dispersion

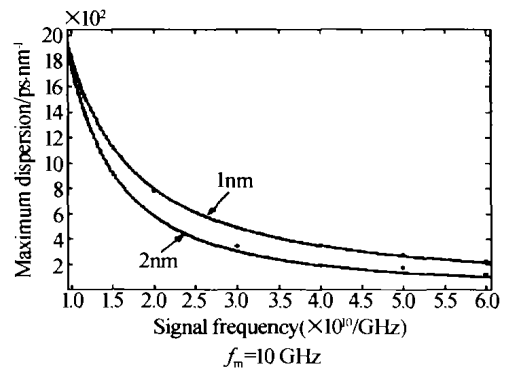


图 3 色散容限随信号频率的变化  
Fig. 3 Dispersion tolerance as a function of signal frequency

### 2.2 频率调制系数的影响

图 4 为  $m_f = 0.1, 0.2, 0.8, 0.9$  时延时误差随信号频率的变化关系. 可以看到, 延时误差的波动幅度与频率调制系数相关. 图 5 为相位精度为 0.5 ps 时色散容限随频率调制系数的变化. 可以看到, 存在一个最优的  $m_f$  值(约为 0.55), 使得系统的色散容限最大.

$m_f$  的变化导致频谱上各分量的幅度发生变化. 其中,  $\omega_0 + \omega_m$  和  $\omega_0 - \omega_m$  分量幅度最大, 对输出信号影响最大, 主要考察这两分量的变化情况. 图 6 描述了  $\omega_0 + \omega_m$  和  $\omega_0 - \omega_m$  分量幅度随  $m_f$  的变化.

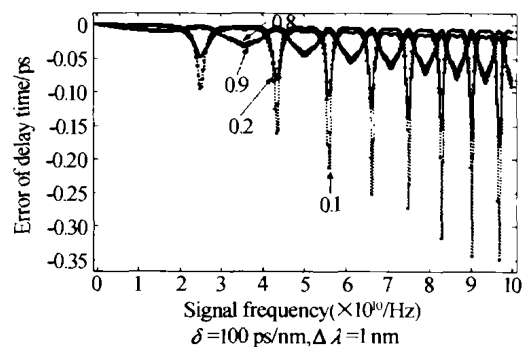


图 4 不同频率调制系数时的延时误差  
Fig. 4 Dispersion induced delay time error with different frequency modulation index

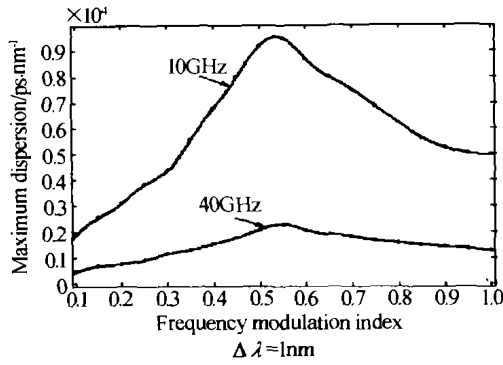


图5 色散容限随频率调制系数的变化  
Fig. 5 Dispersion tolerance as a function of frequency modulation

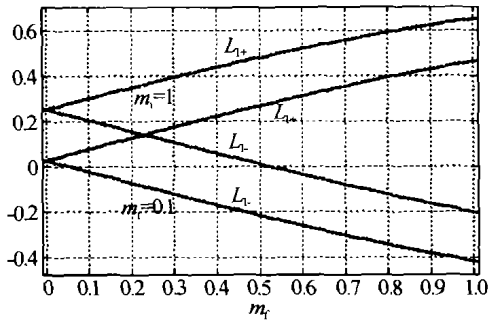


图6  $\omega_0 + \omega_m$  和  $\omega_0 - \omega_m$  分量幅度随频率调制系数的变化  
Fig. 6 Amplitude of the  $(\omega_0 + \omega_m)$  and  $(\omega_0 - \omega_m)$  sidebands versus the frequency modulation index

附加相位  $\varphi$  是各频谱分量在探测器处干涉相加的结果. 当  $\omega_0 + \omega_m$  和  $\omega_0 - \omega_m$  分量之间幅度差异较小时, 干涉作用明显, 因此  $\varphi$  的变化也比较剧烈; 而当它们之间幅度差异较大时, 干涉效应不明显, 此时  $\varphi$  的变化接近线性.

由于系统延时与  $d\varphi/d\omega$  有关, 所以  $\varphi$  变化越剧烈, 延时误差就越大; 反之,  $\varphi$  的变化幅度越小, 延时误差也就越小.

因此,  $m_f$  从 0 增加到 0.55 的过程,  $\omega_0 + \omega_m$  和  $\omega_0 - \omega_m$  分量幅度差异逐渐变大 (图 6 中  $m_f = 1$  的情况),  $\varphi$  的变化从剧烈趋于平缓, 延时误差逐渐减小 (图 5 中  $m_f$  为 0.1, 0.2 的情况), 色散容限随之增大; 反之,  $m_f$  从 0.55 开始增大时, 延时误差也逐渐增大 (图 5 中  $m_f$  为 0.8, 0.9 的情况), 色散容限随之变小.  $m_f = 0$  时, 各对应分量之间幅度完全相同, 干涉后并不引入附加相位, 所以  $\varphi = 0, \Delta\varphi = 0$ .

### 2.3 强度调制系数的影响

图 7 为不同强度调制系数下最大色散值随频率调制系数的变化关系. 从图中看出,  $m_i$  越大, 最优的  $m_f$  值就越大, 并且系统最大色散容限也越大 ( $m_f$  处  $\Delta\varphi = 0$ , 对应色散容限应该为无穷大. 由于数值计算的原因, 图 7 在  $m_f = 0$  这一点处不准确).

从 2.2 的论述可以看到,  $m_f$  的最优值与  $\omega_0 - \omega_m$  分量的反相点相对应.  $m_i$  越大,  $\omega_0 - \omega_m$  分量的

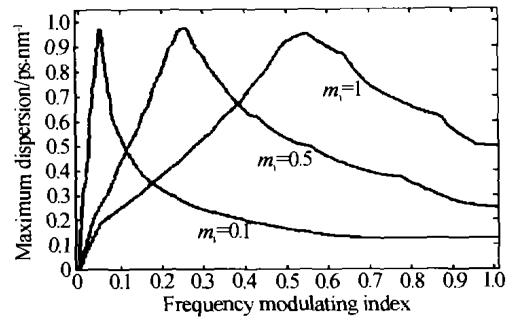


图7 不同强度调制系数时色散容限随频率调制系数的变化  
Fig. 7 Dispersion tolerance versus the frequency modulation index with different intensity modulation index

反相点对应的  $m_f$  值越大 (图 6), 所以最优的  $m_f$  值也就越大.

## 3 结论

本文从相位误差的角度研究了基于色散器件的波束形成网络中的色散限制. 结果表明: 工作中系统并不能任意调节色散以达到改变延时的目的, 存在最大色散值的限制; 存在最佳的频率调制系数使得系统色散容限最大; 强度调制系数越大, 最佳频率调制系数就越大. 本文的结论可以为基于色散的光控波束形成网络设计提供参考.

### 参考文献

- 1 Ng W, Walston A A, Tangaonan G L, et al. The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(9): 1124 ~ 1131
- 2 Jemison W D, Herczfeld P R. Acoustooptically controlled true time delays. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1993, 3(3): 72 ~ 74
- 3 Dolfi D, Joffre P, Antoine J, et al. Experimental demonstration of a phased-array antenna optically controlled with phase and time delays. *Applied Optics*, 1996, 35(26): 5293 ~ 5300
- 4 Yegnanarayanan S, Trinh P D, Jalali B. Recirculating photonic filter: a wavelength-selective time delay for phased-array antennas and wavelength code-division multiple access. *Optics Letters*, 1996, 21(10): 740 ~ 742
- 5 Tong D T K, Wu M C. A novel multiwavelength optically controlled phased array antennas with a programmable dispersion matrix. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(6): 812 ~ 814
- 6 Minasian R A, Alameh K E. Optical-fiber grating based beamforming network for microwave phased arrays. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, 45(8): 1513 ~ 1518
- 7 Yao J, Yang J, Liu Y. Continuous true-time-delay beamforming employing a multiwavelength tunable fiber laser source. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14

- (5): 687 ~ 689
- 8 Corral J L, Marti J, Fuster J M, *et al.* Dispersion-induced bandwidth limitation of variable true time delay lines based on linearly chirped fibre gratings. *Electronics Letters*, 1998, **34**(2): 209 ~ 211
- 9 Gliese U, Nørskov S, Nielsen T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, **44**(10): 1716 ~ 1724
- 10 胡辽林, 刘增基, 杨国庆. 光的单边带传输的性能研究. 光子学报, 2004, **33**(2): 179 ~ 182
- Hu L L, Liu Z J, Yang G Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 179 ~ 182
- 11 Meslener G J. Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, **QE-20**(10): 1208 ~ 1216
- 12 Intelsat earth station standards (IESS), Document IESS-309, 1990

## Dispersion Induced Limitation of Beam Former Based on Dispersion Devices

Ni Bin, Zheng Xiaoping, Chen Rui, Zhang Hanyi

*Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*

Received date: 2003-12-16

**Abstract** The variation rule of chromatic dispersion induced phase error of the beam former based on dispersion devices is studied using an intensity-frequency modulated model. Based on the phase error, the maximum dispersion limitation is presented when the phase precision is 0.5 ps. It is also shown that there exists an optimal frequency modulation index that makes the system dispersion tolerance maximum. When the intensity modulation index increases, the optimal frequency modulation index increases.

**Keywords** Microwave photonics; Chromatic dispersion; Intensity-frequency modulated model; Dispersion tolerance



**Ni Bin** was born in 1979, received Bachelor degree in the Department of Electronics Engineering of Tsinghua University in 2001, and will receive Master degree, major in the research of the optical fiber communications.