

微波光纤延迟线的原理

北京锦坤科技有限公司 www.jonkon.com.cn

[摘要] 介绍了微波光纤延迟线的原理和特点, 并对微波光纤延迟线的性能(灵敏度、动态范围等)进行了详细的分析计算。当前, 微波光纤延迟线已达到实用化程度, 可广泛应用于雷达和电子对抗领域。

[关键词] 微波光纤延迟线; 激光器; 光电探测器; 信号处理; 雷达; 电子对抗
[中图分类号] TN929. 7; TN97 [文献标识码] A [文章编号] 1006-1908(2002)04-0001-05

School of Electron and Information, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030. China)Abstract: The theory and characteristics of microwave optical fiber delay—line are introduced. and its performance(sensitivity, dynamic range)is analyzed and calculated in detail Today, microwave optical fiber delay line has come into practical use and it can be widely used in the fields of radar and electronic countermeasure. Key words: microwave optical fiber delay line; laser; photodetector; signal processing; radar; electronic countermeasure

0 前言

延迟线存储器。

延迟线广泛应用于信号处理、雷达和电子对抗等领域。信号处理需要的单元延迟设备就是一种存储器。动目标显示(MTI)中必须有延迟线——又一种存储器, 电子对抗中需要把信号先存储一定时间再进行处理, 如把接收对方的雷达信号延迟一定的时间再发出去, 便完成了欺骗式干扰。现代科学技术需要形形色色的信号存储器。我们主要关心的是适合于雷达和电子对抗的信号存储器件——光纤延迟线。

雷达最初使用存储管和水银延迟线, 后来采用性能更好的石英延迟线, 最后, 发展起来的是超导延迟线和光纤延迟线。按物理概念, 延迟线可分三种:

- 1)电信号延迟线, 如电荷耦合器件(CCD)和电缆等;
- 2)超声波延迟线, 如水银延迟线、石英延迟线等;
- 3)光信号延迟线, 如光纤延迟线、光数字同步延迟线存储器。

1 光纤延迟线的特点

光纤延迟线是一种新型的性能优良的信号处理器件。超声波器件(主要指性能较水银延迟线为好的石英延迟线)在较低频率上具有优良的性能, 但其带宽限制在 1GHz 左右。雷达信号实时处理需要高达 10GHz 以上的宽带信号处理器件, 声表面波器件就无能为力了。光纤延迟线工作在微波波段, 已有资料显示, 在 1km 长的光纤延迟线上, 工作频率可达 100GHz 以上, 因此, 光纤延迟线特别适用于雷达信号处理系统, 雷达系统及电子对抗系统是光纤延迟线的最大应用市场。各种延迟线的主要性能对比见表 1。

表 1。

光纤延迟线的另一个特点是它的射频单位延迟损耗非常小, 而且, 损耗不是工作频率的函数, 这是其他延迟线不能相比拟的, 图 1 表示了各种延迟线的损耗与工作频率的关系。由表 1 和图 1 可以看出, 由于光纤延迟线单位损耗小, 延迟线就可以做得长, 因此延迟时间也长。

光纤延迟线的延迟时间与它的长度有如下关系： $T=Ln_0/c$

式中 L 为光纤长度， n_0 为光纤纤芯折射率，C 为光速。同时，光纤延迟线的工作频率可达 100GHz，即它的工作带宽宽，因此，光纤延迟线的时间带宽乘积很大，通常比其他延迟线大一个数量级以上，图 2 是延迟线最大带宽与延迟时间的关系。

表 1 各种延迟线的主要性能对照

性 能	光纤延迟线	声波延迟线	CCD 延迟线	同轴线延迟线
延迟时间 T	5~50 μ s(1km)	几百微秒	1s	—
时间带宽乘积 TB /s·Hz	10 ¹ (多模光纤) 10 ⁶ (单模光纤)	10 ³	10 ⁵	—
工作频率 f	>100GHz(1km)	1GHz	10~20MHz	—
射频单位延迟损耗	0.4dB(1GHz) 0.4dB(10GHz)	1dB(1GHz) 100dB(10GHz)	—	35dB(1GHz) >500dB(10GHz)

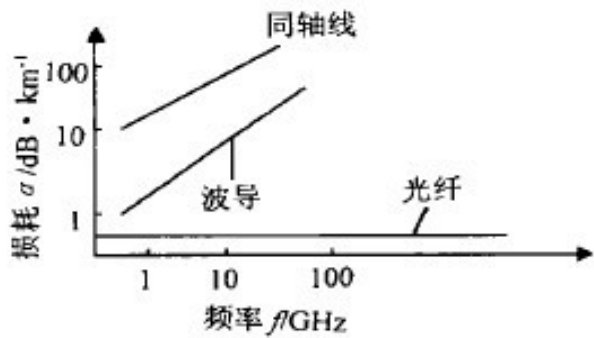


图 1 几种延迟线损耗与工作频率的关系

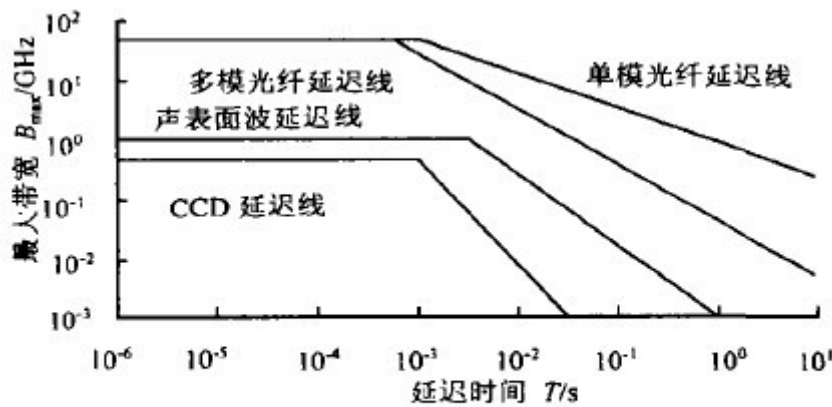


图 2 延迟线最大带宽与延迟时间的关系

光纤延迟线还具有尺寸小、质量轻、柔软易装配及良好的温度稳定性等特点,这对于受空间、质量限制以及环境又非常恶劣的空载和舰用电子设备具有非常大的吸引力。

2 光纤延迟线的原理

图 3 是光纤延迟线单元的示意图。射频电信号输入激光二极管(LD), LD 将输入射频电信号变换成被该信号调制的光信号,通过光接头耦合进光纤。光电检测器(PD)将射频调制的光信号再变换为原来的射频电信号。输出的射频电信号的频谱完全和输入射频电信号的频谱相同,只是用光纤作为介质延迟了一段时间,也就是说,射频信号瞬时储存在光纤延迟线中,存储时间的长短与光纤的长度成正比,这就是光纤延迟线储频的原理。



图 3 光纤延迟线单元

在常规的动目标显示(MTI)雷达中,延迟一个雷达脉冲周期的延迟线通常用石英延迟线,由于它不能工作在微波波段,所以,必须先将射频信号下变频为中频,然后由声波换能器将中频电信号变换成声波,经过石英传输后,再由声波换能器将声波变为中频电信号。如果需要射频信号输出,则需要将中频电信号上变频为射频信号。显然,这种方法不如光纤延迟线的简单。光纤延迟线分为非重复循环光纤延迟线、重复循环光纤延迟线、晶格光纤延迟线和先进的可编程光纤延迟线等四种形式,它们可以构成编 / 解码器、相关器、滤波器、横向滤波器(如图 4 所示)、A / D 变换器、光电相控阵天线网络分配器和数字同步延迟线存储器(DSDL)等。

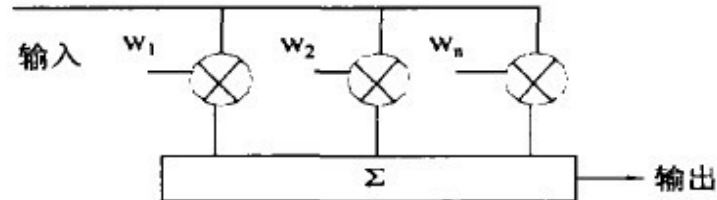


图 4 抽头延迟线构成的横向滤波器

$w_1, w_2, \dots, w_n$ 为横向滤波器的加权系数

3 光纤延迟线信号存储单元设计和性能分析

图 5 为光纤延迟线单元线路。图中所示器件的物理量: P 。为射频信号输入功率(w), G_1 。为前置放大器功率增益, NF 为前置放大器噪声系数, I 为激光器直流偏流(A), I_{th} 为激光器门限电流(A), $\Delta I = I - I_{th}$ 为门限以上的激光器偏流(A), R_I 为激光器动态输入电阻(50Ω), g_2 为激光器传输函数, 工作在偏流时为 $0.30w / A$, OL 为激光器静态输出功率(w), L_1 为激光器耦合系数(≈ 0.15), L_2 为光纤传输函数(≈ 1.0), L_3 为光电检测器耦合系数(≈ 0.45), L_t 为总传输系数, $L_t = L_1, L_2, L_3$, OP 为损耗为 LT 时, 进入光电检测器的静态光电功率(w), g_3 为光电检测器的变换系数($\approx 0.57A / W$), C 。为检测器输出电容($2 \sim 5pF$), P 。为对应于 P_s 的射频信号输出功率(w), R 。为检测器负载电阻(50Ω), B 为有效噪声带宽(Hz), B_3 为 $3dB$ 信号带宽, F 为噪声一信号带宽比, $F = B / B_3$ 。

在正常工作时，激光器的偏流被调到大于门限电流，并接近激光器的输出功率能力的中间工作点，作为典型情况，激光器输出 O_L 调到 1.2mW，对应的，值为 24mA(使用的激光器门限电流为 20mA)，即：

$$O_L = 1.2 \times 10^{-3} \text{ W} = g_2 (I - I_{th}) = g_2 \times \Delta I$$

$$I = 2.4 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_{th} = 20 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$\Delta I = 4 \times 10^{-3} \text{ A}$$

图 6 为以上激光器输出功率与直流偏置电流的关系曲线。

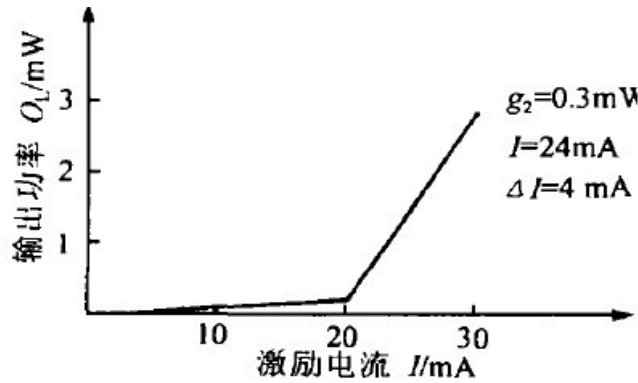


图 6 激光器输出功率与激励电流的关系

激光器输出光功率 O_L 耦合进光纤，经过光纤传输后，进入光电检测器，则

$$L_T = L_1 L_2 L_3 = 0.15 \times 1.0 \times 0.45 = 0.0675$$

故进入光电检测器的光功率为：

$$O_D = O_L L_T = 1.2 \times 10^{-3} \times 0.0675 = 0.081 \times 10^{-3} \text{ W}$$

该光功率可产生直流电流：

$$I_{dc} = O_D g_3 = 0.081 \times 10^{-3} \times 0.57 = 0.0462 \times 10^{-3} \text{ A}$$

3. 1 通量损耗

通量损耗定义为输入信号功率 P_s 与输出信号功率 P_0 之比：

$$\begin{aligned} P_0/P_s &= G_1 R_0 (g_2 g_3 L_T)^2 / R_L = G_1 \times 1.33 \times 10^{-4} \\ &= (G_1 - 38.75) \text{ dB} \end{aligned} \quad (1)$$

因此，代入图 5 所示各项数据可知，可以用 38.75dB 的前置放大器来补偿线路损耗，这些损耗主要受激光器和光电检测器的量子效应限制。

3. 2 输出噪声电流

三种重要的光电检测器输出噪声电流量：信号散粒噪声电流 来自前置放大器输入的热噪声

和前置放大器噪声的传输热噪声电流，输出热噪声电流

I_{th} 下面给出这三种噪声电流的公式：

$$i_{sh} = [2e\Delta I g_2 g_3 L_T B_3 F]^{1/2} \quad (2)$$

$$i_{th} = [8\pi KTC_0 F]^{1/2} B_3 \quad (3)$$

$$i_t = [KTG_1 \overline{NF} B_3 F/R_L]^{1/2} g_2 g_3 L_T \quad (4)$$

光电检测器输出总噪声电流为：

$$i_{total} = [i_{sh}^2 + i_{th}^2 + i_t^2]^{1/2} \quad (5)$$

式中的常数和典型值 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $R_L = 50 \Omega$, $\Delta I = 4.0 \times 10^{-3} \text{A}$ (对应 $O_L = 1.2 \times 10^{-3} \text{W}$), $K = 1.38 \times 10^{-23}$, $C_0 = 3 \times 10^{-12} \text{F}$, $\overline{NF} = 3.0$ (前置放大器噪声系数), $g_2 = 0.30 \text{W/A}$, $g_3 = 0.57 \text{A/W}$, $L_T = 0.0675$, $F = 1$ 并取 $T = 300 \text{K}$ (17°C), $G_1 = 38.75 \text{dB}$ 。

3.3 灵敏度

灵敏度由可接收的最小信噪比决定。光电检测器输出端的功率信噪比为：

$$\overline{SNR} = \frac{i_{sg}^2}{i_{th}^2 + i_t^2 + i_{sh}^2} = [i_{sg}/i_t]^2 / [(i_{th}/i_t)^2 + (i_{sh}/i_t)^2 + 1] \quad (6)$$

式中 i_{sg} 为光电检测器输出信号电流。

$$i_{sg}^2 = \frac{P_s}{R_0} = \frac{G_1 P_s}{R_L} (g_2 g_3 L_T)^2 \quad (7)$$

将式(2)、式(3)、式(4)、式(7)代入式(6)，得

$$\overline{SNR} = \frac{P_s}{KT B_3 \overline{NF} F} \times \left[\frac{1}{\frac{2eR_L \Delta I}{KT g_2 g_3 L_T \overline{NF} G_1} + \frac{8\pi R_L C_0 B_3}{(g_2 g_3)^2 L_T^2 \overline{NF} G_1} + 1} \right] \frac{P_s}{1.242 \times 10^{-29} B_3 \left[0.095 + 1.285 \times 10^{-11} B_3 + 1 \right]}$$

令 $\overline{SNR} = 1$ ，即可得到微波光纤延迟线单元灵敏度与 3dB 带宽的关系(如表 2 所示)。

表 2 微波光纤延迟线单元灵敏度与 3dB 带宽的关系

B_3 / MHz	50	100	300	350	400	450	500
临界灵敏度/dBm	-91.8	-88.8	-84.0	-83.3	-82.8	-82.3	-81.8

3.4 动态范围

最大信号功率 P_m 是受到输至激光器的最大输入激励(对应饱和量的 80 的幅度调制)和激光器过载功率限制的，因此

$$i_L \leq 0.472\Delta I$$

对于 80% 的幅度调制极限：

$$\Delta I \leq 4 \times 10^{-3} A$$

为防止激光器过载：

$$i_L = \left[\frac{P_s G_1}{R_L} \right]^{1/2}$$

$$\text{故：} \quad P_s \leq \frac{(0.472\Delta I)^2 R_L}{G_1}$$

将 $R_L = 50\Omega$, $G_1 = 38.75\text{dB}$ 代入上式得： $P_s \leq -46.2\text{dBm}$ (即最大信号功率 $P_{s\max} = -46.2\text{dBm}$ 是固定的)。动态范围是最大信号与最小信号的比值，即

$$\overline{DR} = \frac{P_{s\max}}{P_{s\min}} = \frac{(0.472\Delta I)^2 R_L}{G_1} \cdot \frac{1}{KTB_3 \overline{NFF}} \cdot \left[\frac{1}{\frac{2eR_L \Delta I}{KTg_2g_3L_T \overline{NFG}_1} + \frac{8\pi R_L C_0 B_3}{(g_2g_3)^2 L_T^2 \overline{NFG}_1} + 1 \right] \quad (8)$$

下面将单通道的分析结果列于表 3。可以看出，通常情况下，微波光纤延迟线系统的灵敏度已能够满足系统的要求，且有较宽的动态范围。如果需要大的延时，则需要更长的光纤。由于损耗的存在，光纤传输函数 L_2 不可能接近于 1，这可以通过前置放大器，来补偿损耗，以满足延迟系统要求。

表 3 微波光纤延迟线灵敏度与动态范围关系

动态范围 $\overline{DR}/\text{dB}$	45.6	43.6	38.8	37.1	36.6	36.1
临界灵敏度/ dBm	-91.8	-88.8	-84.0	-83.3	-82.8	-82.3

4 应用

微波光纤延迟线以其独特优点，广泛用于雷达和电子对抗中，下面是几个典型运用实例。

1) 光电相控阵天线系统

在空用及海用电子设备中，对体积和质量有严格的限制，采用光纤作为天线波速形成网络，不仅天线质量大大降低，而且天线的有效反射面积也可大为减少。

2) 滤波器

横向滤波器是信号处理中很重要的一部分，利用光纤抽头延迟线可以构成光纤横向滤波器，对光信号进行滤波处理。

3) 光纤延迟线信号存储

a) 舰载雷达非相干动目标显示(MTI)为了克服多径效应，检测贴近海面的低飞行目标，舰载雷达必须工作在 K 波段，而且必须有动目标显示设备，常规的相干 MTI 要工作在 K 波段是

比较困难的，解决方法是用光纤延迟线构成的非相干 MTI 系统。

b)雷达系统性能测试

为了评价雷达系统的性能，常常用雷达转发器测试靶。通常转发器测试靶与雷达相距几公里，它们之间是大气。雷达信号在大气中传输。由于大气成分受天气、季节因素影响而变动，因此微波在大气中的传输质量受其影响，进而影响雷达系统性能测试的精度。如果用光纤延迟线远离雷达发射场的测试靶，就不存在这个问题，而且可以在室内方便地获得实际目标返回信号。

c)欺骗式干扰机

欺骗式干扰机接收对方的雷达信号。储存一段时间，经处理再发回给对方，完成欺骗干扰，因而，存储器是必不可少的。光纤延迟线具有极宽的频率带宽和很短的延迟(1ns)，在欺骗式干扰中起着重要的作用，它可以有效地无畸变收发雷达信号，对于高密度信号环境特别有意义，而且成本也很低。

5 用于光纤延迟线的光电器件

显然，用光纤实现信号存储，就是要实现如图 5 所示的单元系统。它主要由激光二极管(ID)、光电检测器(PD)和光纤组成。由于光纤的工作频率可以很高，因此，主要是 LD 和 PD 限制了系统的工作频率。目前，国内的 LD 和 PD 商品化产品已达到 2~8GHz。国外，20GHz 的 LD 和 PD 已商品化(详见表 4)。所以完全可以实现 100GHz 以上的光纤延迟线。随着延迟时间的增加，光纤长度要加长，色散影响会增大，此时，可采用低色散的光纤(如 O. 655 光纤)。另外，还可使用色散补偿技术使色散的大小控制在系统允许的范围内。在光纤延迟线中采用负斜率色散补偿光纤(NS—DCF)进行色散补偿，达到最佳性价比。因为负斜率色散补偿光纤既能对色散进行补偿，又可加大延迟时间。

表 4 国外报道的部分高速率半导体激光器参数

发表时间	公司	材料	波长/ μm	带宽 B/GHz
1989. 5	日本日立	InGaAsP/InP	1. 55	17
1989. 11	贝尔实验室	InGaAsP/InP	1. 3	18
1990. 3	英国 BTRL	InGaAsP/InP	1. 55	17
1990. 10	GTE	InGaAsP/InP	1. 3	24
1991. 5	加州大学电计系	InGaAsP/GaGs	0. 98	20
1991. 12	东芝电子工程公司	InGaAsP/InP	1. 55	16. 5
1992. 4	洛克威尔国际公司	InGaAsP/InP	1. 3	22
1992. 7	贝尔实验室	InGaAsP/InP	1. 3	20
1992. 11	Lasertron	InGaAsP/InP	1. 55	25
1993. 2	Lasertron	InGaAsP/InP	1. 3	20
1993. 4	法国汤姆逊	InGaAsP/InP	1. 5	18
1993. 8	贝尔实验室	InGaAsP/InP	1. 55	22. 5
1993. 10	英国 BNR 欧洲公司	InGaAsP/InP	1. 55	22

6 结 论

光纤延迟线性能远远优于其他延迟线，随着光电技术的发展，工作波长达到微波频段毫无问题。而且器件价格现在越来越低，性能越来越好，其性价比还将大大提高，在雷达和电子对抗中的应用已趋实用化。

[参 考 文 献]

- [1] JACKSON K P, NEWTON S A, et al. Optical fiber delay—line signal processing[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1985, MTT — 33(3): 1 93—210.
- [2] SARRAZIN D B, JORDAN H F, et al. Fiber optic delay line memory[J]627—638.
- [3] CHANG C T . ALTMAN D E , et al. Noncoherent radar moving target indicator using fiber optical delay line[J]. IEEE Trans on Circuits and System, 1 979, cas — 26(12): 1132—1134.
- [4] 廖先炳. 光纤延迟线信号处理[J]. 半导体光电, 1991, 12(3): 211—226.
- [5] MICHAEI P I. Photonic systems for antenna application[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1 994, 36(5): 30—39.
- [6] PELUSIM D , WANG X , et al. Fourth-order dispersion compensation for 2 50fs pulse transmission over 139km optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 7

北京锦坤科技有限公司 www.jonkon.com.cn