

基于光纤传输的延时系统设计

在雷达、通信电子设备的设计中经常需要对电信号进行长延时，电延迟线由于材料尺寸限制很难实现长延时，虽然，近年来声表面波延迟线由于结构简单、体积小等特点在雷达、通信等电子系统中能够取代电缆延迟线，但是由于其频带太窄、温度影响大的缺点无法满足雷达、通信设备中复杂调制信号的带宽需求，并且比较难实现稳定的长延时。光纤传输技术是自 20 世纪 80 年代发展并广泛应用的信号传输延时技术，目前应用已经非常成熟。因其具有信号传输不受电磁环境干扰、频带宽、延时范围大、温度变化率小的特点，逐渐成为射频、中频段延迟信号的更理想的选择。

1 光纤延时原理

光纤延时技术的基本原理是利用光信号经过一定长度的光纤传输后所产生的时间延迟。光信号在石英介质中传输时速度相对低于真空中的传播速度，光在真空中传播时的折射率为 1，而在光纤中传播时的折射率约为 1.47(对于常用的 G. 652 单模光纤，在 1.550 nm 波长下，常取 $n=1.467$)。光信号在光纤中的传输延时公式如下：

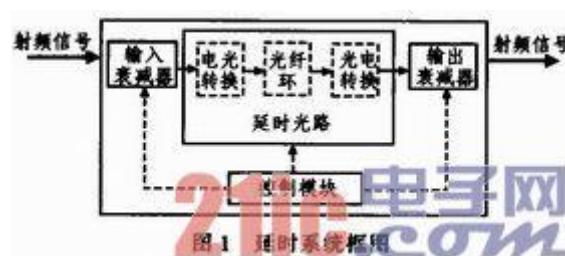
$$t=Lxn / v \quad (1)$$

式中 t 为传输时间， L 为光纤长度， n 为介质折射率， v 为光在真空中传播的速度。

光纤延时技术利用了光传输的特性，具有较高抗干扰能力；带宽高，最高带宽可达到 10 Gb / s；延时范围大；随温度变化率小，常用 G. 522 光纤延时温度系数约为 0.05 ns(km · °C)，基本上不会对应用产生影响。

2 延时系统设计

一个完整的延时系统包括电信号的延时和功率控制功能，基于光纤传输的延时系统包括输入衰减器、延时光路、输出衰减器和控制模块，系统框图如图 1 所示。



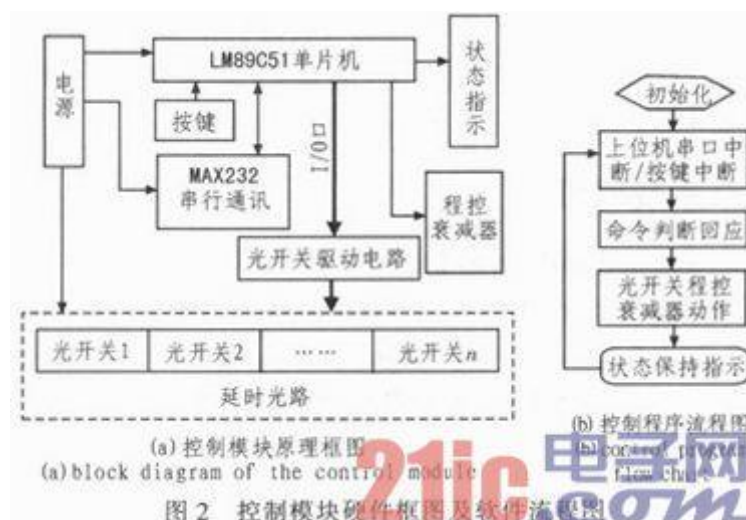
2. 1 功率控制模块设计

延时系统的功率控制模块由输入衰减器和输出衰减器组成。由于延时光路中,进行电-光转换的直调激光器的输入功率范围较小,最大不超过 15 dBm,且在 0 dBm 功率时的性能达到最佳。而雷达、通信应用中射频电信号的功率一般比较大,需要前置同轴衰减器来减小输入功率,将其控制在直调激光器的输入范围内并靠近 0 dBm。在延时系统前端加输入衰减器的作用,还能够减小输入功率对光纤延时精度影响。因为所有材料的折射率都随着光强的增大而增加,而通过输入衰减器将入射信号的功率保持在 0 dBm,则可避免光纤的非线性折射率效应对延时精度的影响。

在雷达系统的设计中,经常要求延时系统能够模拟电磁波信号在空间中的传播损耗,公式为: $W=30\log(1/R)$ dB。W 为传播损耗, R 为电磁波传播距离,单位为 m。光纤传输的损耗约为 0.2 dB/km,因此,在延时系统的输出端,需要采用可调同轴衰减器,实现功率控制功能。由于同轴衰减器采用同种介质制作,信号经过不同衰减的路程相同,所以信号延时的一致性较好。

2.2 控制模块设计

延时系统的控制模块主要实现延时量的改变,程控衰减器的控制,状态指示以及人机交互(或者上位机通讯)。典型电路采用 LM89C51 单片机芯片设计实现上述功能,控制模块电路原理框图及控制程序流程图如图 2 所示。



此典型电路既可通过 MAX232 串行通讯接口接收命令也可以通过面板按键接收命令,利用 LM89C51 芯片的 I/O 口以及相应的驱动电路实现对光开关的状态控制,以完成不同模拟距离的切换,通过控制程控衰减器实现延时系统衰减量的改变,采用 0802A 液晶显示器进行延时和衰减的状态指示。

2.3 延时光路设计

延时光路是基于光纤传输的延时系统的核心部分,设计时必须考虑衰减、色散、温度对系统性能的影响,并为使延时系统能适应不同的应用,将它设计成延时量可变的系统。如图 3 所示。

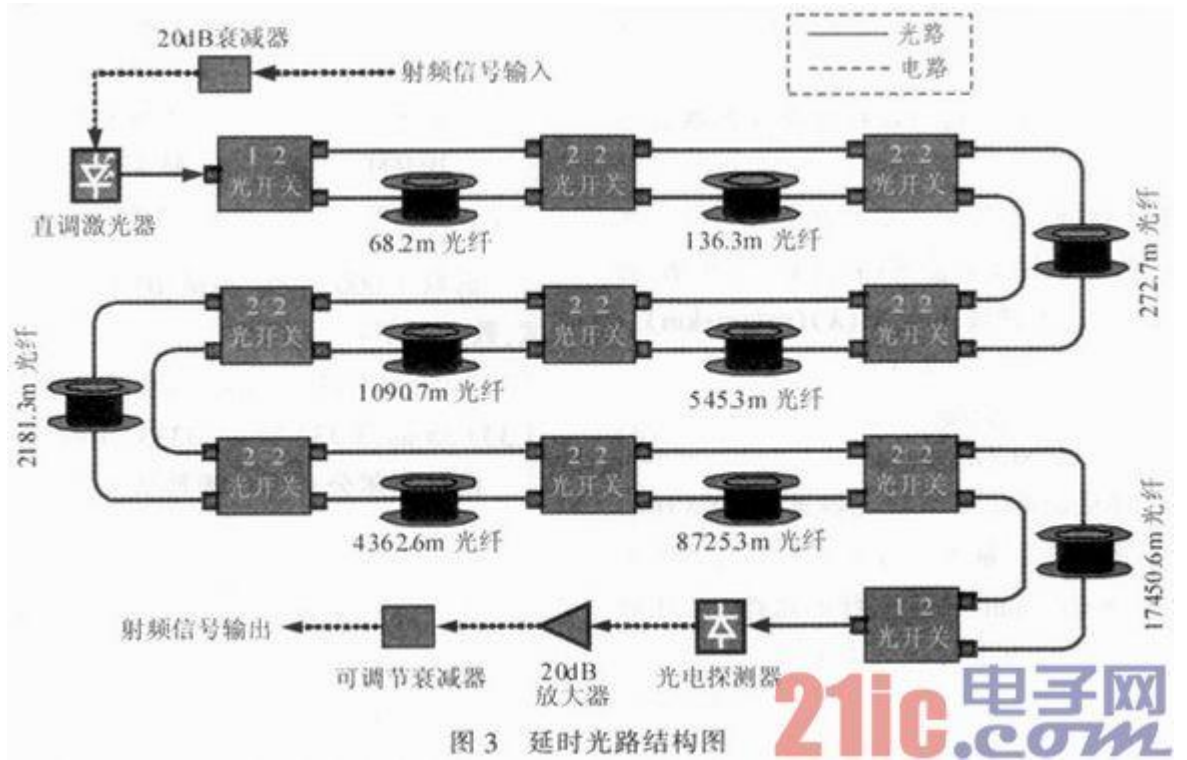


图3 延时光路结构图

以 50 m(延时为 0. 167 μ s)为步进、最大延迟距离为 16 500 m(延时为 55 μ s)的设计要求，研制雷达应用中的延时系统为例：

要实现步进量为 50 m 的模拟距离，根据公式(1)对应的最小光纤环的长度为 68. 2 m，如图 3 所示，随后的每个光开关所连接的光纤环长度分别为 68. 2x21 m、68. 2x22 m、68. 2x23 m、68. 2x24 m、68. 2x25 m、68. 2x26 m、68. 2x27 m 及 68. 2x28 m；这样的设计可以实现步进量为 50 m，范围为 0-16 500 m 的延迟距离，其中共有 512 个延迟距离可供选择。

我们选用 2x2 光开关，并采用差分结构设计实现不同延时量的切换，此类光开关的平均插入损耗约为 0. 8 dB，并且由于采用了差分结构每种延时通路经过光开关的通路次数相同，损耗一致性较好，常用的 G. 652 光纤损耗约为 0. 2dB / km，照以上参数计算，整个光路的损耗由四部分决定：直调激光器的电光转换效率，光纤通路损耗，光电探测器的电光转换效率，以及输入输出阻抗比；可由(2)式表示：

$$G_{dB} = 20 \log(\eta_{TX} \eta_{RX}) - L_{opt} + 10 \log\left(\frac{R_{out}}{R_{in}}\right) \quad (2)$$

η_{TX} 为直调激光器的电光转换效率，根据测试得到的 η_{TX} 为 0. 075。 η_{RX} 为光电探测器的光电转换效率，根据测试得到的 η_{RX} 为 0. 65。 L_{opt} 为光纤通路的损耗，包括以下几部分：光纤自身的传输损耗，光开关的插入损耗和各个光连接头的损耗；按最长光纤长度为 22 495 m 计算，最大的光纤传输损耗为 4. 5 dB(标

准单模光纤的损耗系数为 0.2 dB / km)；每个光开关的插入损耗为 0.8 dB，共有 10 个光开关，因此光开关的总插入损耗为 8 dB；每个光连接头的插入损耗为 0.2 dB；光链路需经过的光接头共有 20 个，因此光接头引入的损耗为 4 dB；这样整个光链路的损耗 L_{opt} 为 4.5+8+4=16.5 dB。 R_{in} 和 R_{out} 分别为输入匹配阻抗和输出匹配阻抗，均为 50Ω 。根据以上分析，按照(2)式所计算的通过光路的射频信号的增益 G_{dB} 为-42.7 dB。

模拟雷达的回波信号的延迟衰减量 L_{dB} 与模拟距离 H 的关系满足式(3)：

$$L_{dB} = 30 \times \log\left(\frac{1}{H}\right) \text{ dB} \quad (3)$$

这样对于最低模拟距离 50 m，延迟衰减量为-51 dB；对于最高模拟距离 16 500 m，延迟衰减量为-126.5 dB；对雷达回波的模拟所需的延时衰减量范围为-51~-126.5 dB。此系统能够满足-51dB 的最大衰减量的需求，并且可以通过同轴可调衰减器使得最终的输出射频信号衰减量可以在-48~-129.5 dB 之间进行调节。

对于需求更小损耗的延时系统我们可以在光电探测器前增加一个光放大器，光放大器的输入功率选择一般为-25~-10 dBm，而光路损耗为 16.5 dB，完全可以满足要求，且有一定富余量。为了降低光放大器的噪声系数，可在放大器内部增加 ASE 滤波器，从而将输出波长锁定在激光器的波长上。在系统传输的是模拟信号时，光放大器的输出光功率最好能保持在 0 dBm 以上，以使光接收机有较好的解调效果。放大器的输出既可以接光接收机，也可以与下一级设备级联。为了实现更小的损耗还可以在光电探测器后串联射频放大器。

对于长延时系统的研制，还需要考虑色散的影响，光传输的色度色散限制带宽可由以下公式(4)计算，其中 B_c 为色度色散限制带宽， $\Delta\lambda$ (nm) 为谱线宽度， $C(\lambda)$ (ps / nm · km) 为光纤色度色散系数，对于 L (km) 为光纤长度。

$$B_c = \frac{0.44 \times 10^6}{\Delta\lambda \times C(\lambda) \times L} \quad (4)$$

由式(4)可知，为降低影响，要求激光器谱线(FWHM)尽量窄，光纤得色度色散系数尽量小。目前市面上有的激光器 FWHM 达到 10MHz (8x10⁻⁵nm)。在光纤的选择上，比较常用的 G. 652 光纤色散系数约为 20ps / nm · km。

据此可以算出波长为 1550 nm 的光信号在 G. 652 光纤上传输 165 km 的色度色散限制带宽为：

$$\begin{aligned} B_c &= 0.44 \times 10^6 / \Delta\lambda \cdot C(\lambda) \cdot L \\ &= 0.44 \times 10^6 / 8 \times 10^{-5} \times 20 \times 165 \quad (5) \end{aligned}$$

=1.26x10⁶ MHz

因此,只要选择合适的激光器,则光纤色散不会对系统的性能指标造成影响。

在实际的延时系统研制过程中,我们还需要考虑由光-电转换,电-光转换以及信号输入和输出衰减器等组件带来的电信号延时,系统存在延迟零点 H0(经测试该零点小于 50 m)。则在此类延时系统的研制时,可以通过调整直调激光器和 1x2 光开关之间的光纤长度将该零点校准到 50 m,其余光纤长度不变。这样调整之后,采用零点作为第一个延迟距离(即 50 m),以后模拟距离均可达到精确模拟各整数距离点的技术要求。在具体的研制时,还应该注意,2x2 光开关差分结构的延时为两个通路的差值,裁剪光纤时光纤环的长度 $L=L_0+68.2$ m, L_0 为短路通路的光纤长度。

信号在光纤中的传输模式主要由射线的入射角的差异来决定的,而射线的入射角往往由于光纤发生弯曲而发生改变,从而使射线的传输模式发生了变化。射线在光纤出现严重弯曲的时候,甚至会透出光纤造成能量的损失。一般来说光纤弯曲的半径越小,而发生的损耗则越大,反之耗损则会减小。在设计光纤环以及固定光纤接头时应尽量增大光纤的弯曲半径(一般不应小于 3 cm)。

3 系统验证

采用示波器法(选用美国 TEK 的 DP070604 示波器)对此延时系统的脉冲信号延时进行了验证,测试数据如表 1 所示。

表1 延时系统测试结果
Tab. 1 Test result of the delay system

标称模拟距离/m	延时测量值/ns	距离测量值/m
50	166.67	50.001
100	333.34	100.002
500	1 667.30	500.190
1 000	3 333.35	1 000.005
5 000	16 663.60	4 999.030
10 000	33 335.82	10 000.746
15 000	50 006.00	15 001.800

选取 1 000m 点,测试 10 次,对系统的重复性进行了测试,数据如下:

3 333. 35 ns, 3 333. 34 ns, 3 333. 35ns, 3 333. 35 ns, 3 333. 34 ns,

3 333. 35 ns, 3 333. 34 ns, 3333. 34 ns, 3 333. 35 ns, 3 333. 34 ns

由贝塞尔公式可得测量结果重复性:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (t_i - \bar{t})^2}{10 \times (10-1)}} \quad ns = 1.67 \times 10^{-3} \quad ns \quad (6)$$

对应的模拟距离的重复性为 $5 \times 10^{-4} m$ 。

由表 1 数据可以看出由于工艺技术原因我们不能每次都得到想要的整数的模拟距离，但是由重复性测试数据可以看出，基于光纤传输的延时系统具有可靠性高和稳定性高的特点。

4 结束语

文中利用光纤传输延时技术，通过合理的设计实现了雷达、通信中应用的复杂调试信号的长延时系统，并且此延时系统具有高抗干扰性和高可靠性、延时范围大、带宽大，稳定性高的特点，大大降低了雷达、通信系统相关试验、验证、仿真的成本和时间。随着光纤技术的快速发展和工艺的逐渐成熟，基于光纤传输的延时系统应用将越来越广泛和实用。