

基于高精度相频同步的节点端无损切换技术研究

文腾飞¹, 耿虎军¹, 王青², 刘友永¹

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 中国人民解放军 63771 部队, 陕西 渭南 714000)

摘要: 随着网络化高精度固定节点时频同步技术的发展, 需要对簇节点端多输入信号进行处理; 针对簇节点端多输入信号同源多路径的特性, 为了提升系统的稳健性, 提出了一种信号无损切换的方法, 兼顾了开关的隔离度和切换速度; 实现了主备路信号 ps 量级的同步精度, 有效抑制了切换过程中的相位跳变, 并对不同条件下的主备路相位同步精度、系统无损切换性能进行了仿真实验; 仿真结果表明, 提出的方案显著提升了主备路相位同步精度, 有效抑制了切换过程中产生的相位跃变, 验证了不同条件对系统精度的影响, 对节点端无损切换乃至信号融合方面具有很大的借鉴意义。

关键词: 无损切换; 相频同步; 相位跃变; 簇节点

Nodal Nondestructive Switching Technology Based on High Precision Phase and Frequency Synchronization

Wen Tengfei¹, Geng Hujun¹, Wang Qing², Liu Youyong¹

(1. 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. Unit 63771, PLA, Weinan 714000, China)

Abstract: With the development of network high precision fixed node time and frequency synchronization technology, the node-end multi-input signal needs to be processed. Aiming at the characteristic of the node-end multi-input signal that they are homologous and come from the different path, in order to improve the damage resistance of the system, a method of signal nondestructive switching is proposed, and the corresponding simulation experiments are carried out; A design scheme of system switching switch is presented, which takes into account the isolation degree and switching speed of the switch; We implement the main and standby signal synchronization accuracy of picoseconds level, effectively restrain the switching process of phase jump, and the different conditions of the main rode for the accuracy of signal phase synchronization, system condition the performance of the switch are simulated. The simulation results show that the proposed scheme significantly increased the main road phase synchronization precision, effectively restrain the switching process of phase jump, the influence of different conditions on the system accuracy is verified, the node-end condition switch and signal integration with great significance.

Keywords: nondestructive switch; synchronization of the phase and frequency; phase jump; cluster nodes

0 引言

基于光纤的高精度时频同步在雷达、测控、通信、导航等领域已得到广泛应用, 传统点对点光纤时频同步由于设备复杂、价格昂贵、复用性差等原因, 已无法满足分布式、网络化的装备发展需求, 因此现阶段需要开展网络化、高精度、高抗毁的光纤时频同步技术研究^[1-2]。对于层次化多节点时频同步系统, 簇节点具有多输入多输出的特征, 其接收到的信号来自同一个信号源, 但是由于传输环境、传输距离、中继节点等方面的差异, 其不同路径所接收到的时频信号质量不尽相同, 而如何对其甄别、分析、融合, 实现簇节点高精度时频信号的相位同步和无损切换是系统的关键技术。

以往的研究集中于源端的信号无损切换^[3-4], 相比源端, 簇节点端信号不具有高精度时频基准, 且由于信号来源的不确定性, 其误差因素更大更为复杂, 本文提出了一种基于相位漂移的簇节点单源多路径无损切换方法, 在保证重要节点时频同步精度的前提下提高了系统稳健性, 并最终通过仿真实验验证了该方法的可行性。

1 簇节点端信号的分析甄别

相比源端, 簇节点端多输入信号的处理甄别以及切换的难度更大, 这是由于簇节点端接收到的信号数目更多, 信号质量更加难以保证。如何在有限的条件下对簇节点端所有的输入信号进行分析甄别, 从而选取主备路信号就变得尤为复杂。

1.1 节点端信号甄别限制因素

表 1 列出相应簇节点端与源端信号分析甄别限制因素对比^[5-7]。

信号的质量通过其频率准确度和稳定度来体现, 信号

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-08-09。

作者简介: 文腾飞 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事航天测控和信号处理方向的研究。

频率准确度指的是信号输出值偏离标称值的程度^[2]，定义式为：

表 1 限制因素对比

	源端	簇节点端
信号数量	较少,一般为 2 个	多,一般大于 2 个
高精度时频基准	有	没有
信号质量	没有经过传输,信号准确度稳定度较高	经过不同路径传输,信号准确度稳定度有偏差
信号误差因素	较少,一般为信号源固定误差	较多,除了信号源误差外,传输路径的环境因素会对信号产生一定影响

$$y = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (1)$$

其中： f_0 表示信号频率标称值， f 表示信号频率实际输出值。

信号频率稳定度表示信号一定时间内平均频率随时间的变化量^[1]，与系统随机噪声及采样时间相关，用阿伦方差表示，

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i) \quad (2)$$

其中： τ 为采样时间， M 为采样时间内采集的数据数目， y_i 表示频率测量值。

由以上分析可得：信号频率准确度的测量需要高精度时频基准提供频率标称值，而簇节点端并没有高精度时频基准，这也就导致了簇节点端信号准确度无法直接测量；信号频率稳定度与系统随机噪声及采样时间相关，相比源端，簇节点端由于信号传输的原因会引入随机噪声，这些因素的存在会导致相比源端簇节点端信号稳定度偏差，同时采样时间的存在会导致稳定度测量无法实时达成，且稳定度测量分短稳和长稳，短稳的采样时间都是秒量级的，直接进行稳定度分析无法满足系统实时性的要求。

1.2 节点端光路径误差分析

分析信号的传输过程，光纤传输链路中引入的光路时延可以表示为：

$$t_0 = \frac{nL}{c} \quad (3)$$

其中： n 为光纤材料折射率， c 为真空光速， L 为光纤长度，可以看出，光纤长度确定的情况下，不考虑其他误差因素，光纤传输链路中引入的光路时延为一个确定值。信号传输过程中误差因素的存在会使光路时延产生抖动，引入时延误差 Δt_0 ，以相位误差 $\Delta \varphi_0$ 的形式体现在传输信号上。

$$\Delta \varphi_0 = 2\pi f_0 \Delta t_0 \quad (4)$$

1) 温度

温度主要是对光纤长度和折射率产生影响，这种影响是近似线性的，故而这里引入光纤温度系数的概念，它是指温度变化 1℃ 的情况下，光线折射率与其长度乘积的线性变化率，具体到石英单模光纤，其温度系数为 7×10^{-6} 左

右^[8]，故而温度因素对于系统相位的影响可以表示为：

$$\Delta \varphi_1 = 2\pi f_0 \frac{nL}{c} T(t) \times Q \quad (5)$$

其中： $T(t)$ 表示温度变化， Q 表示温度系数。

2) 激光器和色散因素

激光器的作用是产生载波光信号，受环境因素影响，激光器产生的光信号会有微小的随机抖动，产生相位噪声；色散的存在导致光纤中不同频率光信号传播速度不同，产生时延抖动，进而发展成为相位噪声。

激光器产生的载波光信号瞬时时延抖动^[9]可以表示为：

$$dX(t) = HLd\lambda \quad (6)$$

其中： H 指光纤色散系数， L 指信号传输的距离， λ 指的是载波光信号的波长。

由于：

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 X(t) \quad (7)$$

$$c = f_0 \lambda_0 \quad (8)$$

可得相位抖动：

$$\Delta \varphi_2 = 2\pi f_0 \Delta X(t) = -\frac{2\pi f_0 HL \lambda_0^2}{c} \Delta f \quad (9)$$

其他比如由于远距离光纤传输引入的掺铒光纤放大器 (EDFA) 中继、外部强度噪声等因素^[10-11] 的影响不再一一论述，通过分析上述因素的影响，可以看到无论是温度还是激光器和色散等因素，都与传输的距离相关。在不考虑中继节点的情况下，本文进行了 10 m、20 m 和 50 m 光纤的光载微波信号传输实验，实验结果显示相同条件下传输稳定度与传输距离正相关。故而本文采取的主备路选取方式是首先选取传输距离短，中继节点少的传输路径作为主路信号，传输过程中不断对主备路信号积累的传输数据进行分析整合，计算其相应的阿伦方差，当数据数量增多之后，根据其阿伦方差的大小判断主备路信号实时性能，作为无损切换的依据。

2 无损切换原理

同源情况下，簇节点的多条输入信号均可以追溯到源端，假设源端时频信号为：

$$H_0 = h \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (10)$$

经过不同链路传输，其最终输入该节点的信号为：

$$H_n = (h + \Delta h_n) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_n(t)) \quad (11)$$

式中， Δh_n 表示第 n 条传输链路引入的幅度变化，由于幅度改变并不影响时频传输特性，故而可以忽略不计。 $\varphi_n(t)$ 表示第 n 条传输链路引入的相位变化。传输链路 $\varphi_n(t)$ 的引入会导致信号频率发生一定的改变。

$$\Delta f_n = \frac{d\varphi_n(t)}{2\pi dt} \quad (12)$$

由于其相频变化是时间的函数，所以当时间确定时，第 n 条传输链路引入的相位变化 $\varphi_n(t)$ 就会是一个确定值，而其相位变化率同样也是一个确定值。时间确定时，两条传输链路会有一个确定的相位差和一个确定的相位变化率。而在这个确定的时间进行信号切换，相位和相位变化

率会产生跳变, 进而引入相应的频率、相位跳变误差, 影响传输信号性能。不同于一般系统, 网络化高精度时频同步系统的传输精度较高, 对于频率、相位跳变指标要求较高, 其要求切换前后相位跳变维持在皮秒量级, 相应的频率跳变应维持在 10^{-13} 量级。以 10 M 传输信号为例, 若相位跳为 1° , 则两者相应的时间差维持在:

$$\Delta t = \frac{1^\circ}{360^\circ} \times \frac{1}{10 \text{ M}} = 277.78 \text{ ps} \quad (13)$$

可以看出, 即使两者的相位差只有 1° , 其相应的时间差也有接近 300 ps 的差距。为了保证系统较高的精度要求, 必须保证切换时主备路相频差足够小, 也就是说, 必须保证主备路相位频率的同步精度。

3 无损切换技术基础

3.1 主备路相频精确同步

由上述分析可知, 对于同源传输信号, 其源端可以用公式 (10) 表示, 经过不同传输链路, 受到不同的干扰, 其主备路信号可以用下式表示:

$$H_1 = (h + \Delta h_1) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_1(t)) \quad (14)$$

$$H_2 = (h + \Delta h_2) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_2(t)) \quad (15)$$

式中, H_1 表示主路信号, H_2 表示备份路信号。主备路信号之间的差别集中体现在引入的相位噪声 $\varphi_1(t)$ 和 $\varphi_2(t)$ 的差别, 也就是主备路信号的相差和频差上。

由于主备路信号同源, 其初始频率相同, 忽略幅度影响, 将上式主备路信号混频, 得到混频信号:

$$T = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_1(t)) \times \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_2(t)) \quad (16)$$

积化和差处理以上混频信号, 整理得:

$$T = \frac{1}{2} \cos(4\pi f_0 t + 2\varphi_0 + \varphi_1(t) + \varphi_2(t)) + \frac{1}{2} \cos(\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) \quad (17)$$

观察上式, 混频信号可以整理为一个高频信号和一个低频信号之和的形式, 而低频信号的相位, 即为要测量的相差, 其频率即为要测量的频差, 可以表示为:

$$f_T = \frac{d(\varphi_1(t) - \varphi_2(t))}{2\pi dt} \quad (18)$$

换言之, 混频信号中的高频项是无用的, 将该混频信号通过一个低通滤波器, 滤去混频信号中的高频分量, 得到只含有 $\cos(\varphi_1(t) - \varphi_2(t))$ 项的信号量, 也就可以得到相应时间点对应的频差相差。

精确测量主备路信号相位误差的目的就是以主路信号为参考, 将备份路信号进行相位同步, 有效减小切换过程中产生的跳变。主备路相位同步简单框图如图 1 所示。

很明显, 控制信号控制的是备份路信号, 目的是改变备份路信号的相位信息, 使其频率相位最大程度上与主路信号保持一致。本文中, 备份路相位信息的调制通过引入压控移相器来完成, 其控制电压与相差信息成正比。理论上这种方法可以将备份路信号相位与主路信号相位频率精

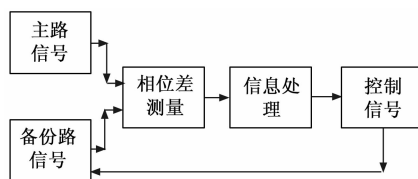


图 1 主备路相位同步原理图

确同步, 然而包括测量误差、系统误差等各种因素的存在难免会影响同步结果。本文通过调节压控移相器参数、预留误差余量、加入恒温压控振荡器 (VCXO) 等方式有效减小了误差因素的影响, 提升了系统整体性能。

3.2 切换开关的设置

主备路相位的精确测量与同步的目的是减小切换过程中相位跳变产生的冲击, 然而这只是在信号处理层面的处理, 操作层面的误差并没有得到有效地抑制。

具体到操作层面, 无损切换的具体操作是由开关完成的, 而切换时间和隔离度是开关的两个重要指标, 显而易见, 为了减小由于切换引入的误差, 开关的切换时间越短越符合系统对精度的要求; 隔离度越高越能满足系统稳健性的需求。然而在实际应用中, 以高速电子开关为代表的开关切换速度快隔离度差, 而以继电器为代表的开关隔离度高切换速度慢, 这直接导致了无损切换开关的隔离度与切换时间无法兼顾。而如何权衡切换时间和隔离度设计切换开关, 也是信号无损切换需要考虑的问题。

本文以前的源端无损切换研究多是牺牲系统隔离度选择切换速度快的高速电子开关^[3-4], 这种选择优势明显: 减小了开关的响应时间, 保证了系统的切换精度。然而这种选择依然存在无法忽视的缺陷, 那就是其隔离度较低, 并不适合切换后系统的传输保持。为了解决这一问题, 本文采用高速电子开关与继电器开关并联的方式保证开关系统的切换速度与隔离度。具体切换时, 高速电子开关率先进行切换保证切换系统的切换速度, 高速电子开关切换完成后, 与之并联的继电器开关开始切换, 在其切换完成后作为高速电子开关的备份保证整个系统的隔离度。

4 系统设计与仿真

基于上文原理分析, 本文设计的簇节点端单源多路径系统无损切换简单原理如图 2 所示。

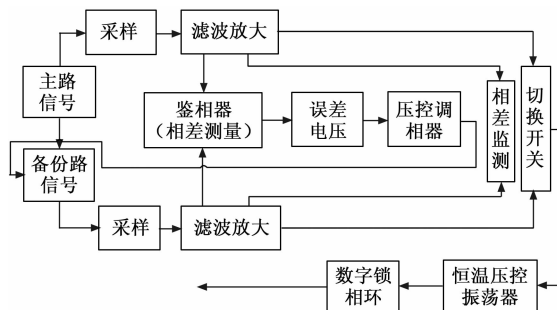


图 2 系统整体原理简图

4.1 仿真系统设计

根据上文原理简图设计相应的仿真方案，不同于以往理论性单一研究，本文充分考虑光纤时频传输特性，做了不同条件下的簇节点无损切换仿真。以传输信号信噪比为例如，由于本文时频信号的传输介质是光纤，误差因素较小，故而仿真所选取的信号信噪比都比较高。固定条件方面，选取源信号频率为 10 MHz，高速电子开关响应时间在 ns 量级，为了更加直观地观测系统对于主备路频率相位同步的精确度，这里选取的主备路初始频差相差较大，如选取的主备路信号初始频差在量级，初始相差不小于 $\pi/6$ 。综上，本文设计了以下四组仿真实验。

- 1) 信噪比为 70 db，主备路初始频差 +10 μ Hz，初始相差 $\pi/6$ 。
- 2) 信噪比为 50 db，主备路初始频差 +10 μ Hz，初始相差 $\pi/6$ 。
- 3) 信噪比为 70 db，主备路初始频差 -10 μ Hz，初始相差 $\pi/6$ 。
- 4) 信噪比为 70 db，主备路初始频差 +10 μ Hz，初始相差 $\pi/3$ 。

以上设计的四组仿真实验中，明显可以看出，第一组是整体实验的标尺，后三组仿真实验是参照第一组实验数据采用控制变量的方法设计的，其与第一组实验对比，分别观察信噪比、主备路初始频差、初始相位差对无损切换系统的影响。

4.2 仿真结果分析

根据上文 4 组仿真实验设计进行相应仿真，得到仿真实验如图 3 所示。

图 3 中的仿真图的切换时刻均为 100。由于本次试验目的是观测信噪比、主备路初始频差、初始相位差对无损切换系统的影响，故而 4 组实验初始时刻主备路相位已基本同步，备份路信号基本稳定。从仿真结果图可以看出 4 组仿真主备路相位同步精度均在 $0.11 \sim 0.15^\circ$ 左右，折合到时间两者时差约在 30~40 ps 之间，考虑到本文为了更好地观测实验结果，人为选取了较大的主备路初始相差和初始频差，对相位同步精度造成了一定的影响，30 ps 的同步精度是可以接受的。

观察以上仿真结果，运用控制变量法可以得出以下实验结论：

- 1) 比较条件 1 和条件 2 的仿真图，可得在主备路初始频差相差相同的情况下，信噪比不同并不能明显影响相位同步精度，但总体来说信噪比高的条件 1 同步精度略高于条件 2。信噪比主要影响系统的相位稳定度，从图中可以明显看出，信噪比较低的条件 2 信号稳定度低，产生冲击信号后恢复较困难。
- 2) 比较条件 1 和条件 3 仿真图，可以看出主备路初始频差对相位同步精度影响不大，这是因为频率偏差量经过时间的积累会以相位差的形式显现，而系统鉴相、调相功能时刻进行，加之主备路频差本身只在量级，有限时间内

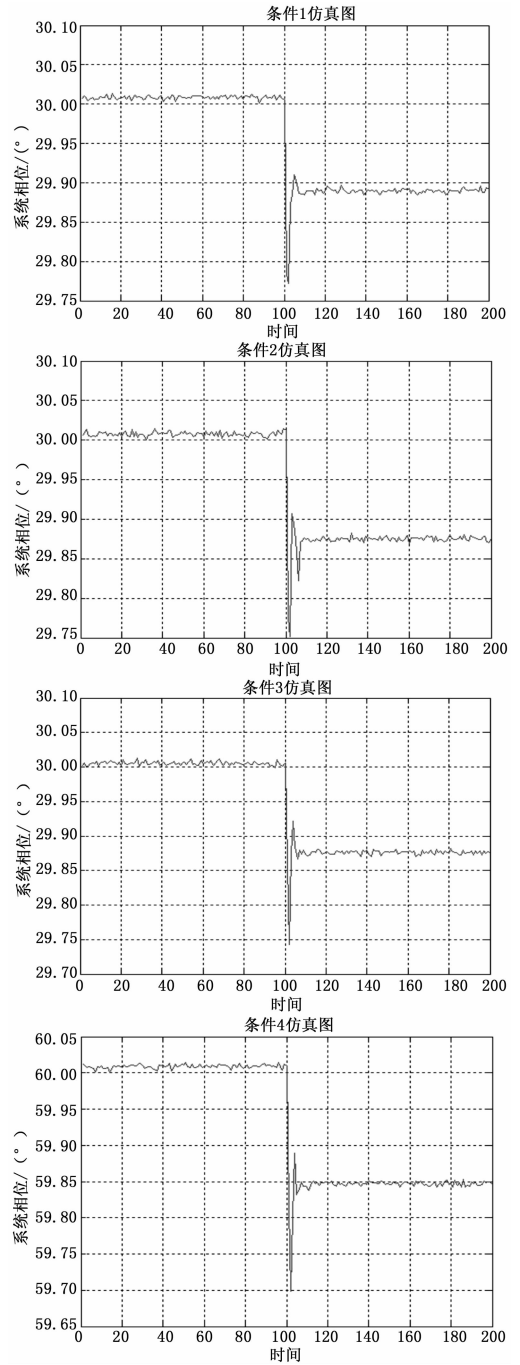


图 3 仿真结果图

积累的相差有限，并不会对主备路相位同步造成明显影响，也就不会对切换过程造成明显误差。

3) 比较条件 1 和条件 4 仿真图，可以看出初始相差加大对系统同步精度影响较大，从数据即可看出，条件 1 的相位同步精度为左右，而条件 4 的相位同步精度却只有左右，相位同步精度的降低一定程度上也影响了无损切换的性能，比较两图的切换过程，条件 4 切换过程产生的冲击误差较大，恢复时间较长。