

宽带微波信号光纤传输链路的设计

邬娜飞^{1,2}, 李 斌¹, 范庆元¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 在建的上海 65 m 射电望远镜计划进行 L 到 Q 等 8 个波段的观测, 其中 K 波段 (18~26.5 GHz) 观测带宽达 8.5 GHz, 为了实现宽带微波信号从天线接收机到终端控制室近 500 m 距离的高质量传输, 采用 1~12 GHz 的宽带微波信号光纤传输链路。在介绍光纤传输链路的构成和总体性能参数的基础上, 重点讨论了光纤的衰减和色散特性, 阐述了宽带微波信号光纤传输链路的设计方案, 并与电缆传输链路的性能进行了比较, 证明了光纤传输链路的优势和方案的可行性。

关 键 词: 宽带微波信号; 光纤; 光纤传输链路; 噪声系数

中图分类号: TN929.11

1 引 言

现代信号传输系统的传输媒质主要有电缆和光缆。通常, 微波信号的传输以电缆为主, 但是对于长距离、宽带宽的微波信号传输, 电缆的传输质量远不及光纤。目前, 光纤通信主要使用 1310 nm 和 1550 nm 两个通信窗口, 在 1550 nm 处光纤的衰减系数仅为 0.2 dB/km, 传输中继距离可达 100 km 以上。单模光纤的可用传输带宽可达 30 THz^[1], 而且光纤的抗电磁干扰能力强、质量小、成本低、环境稳定性好, 已广泛应用于通信、有线电视、计算机网络、视频监控等领域。随着光端机带宽、动态范围、噪声系数等性能的不不断提高, 光纤传输链路在射电天文望远镜中应用已屡见不鲜。国内外一些高性能的射电望远镜都已采用光纤传输系统, 实现高质量的微波信号传输, 如美国的 Qvans Valley Array, GBT, EVLA, 日本的 Nobeyama, 韩国 KVN 等, 在建的 ALMA 及拟建的全球最大的射电望远镜 SKA 也都将通过光纤实现天线与主控制区计算机之间的信号传输, 国内国家天文台的太阳厘米分米波段频谱日像仪也已通过采用光纤传输信号的方案。

在建的上海 65 m 射电望远镜是国内领先的大口径望远镜, 将用于我国的月球探测工程和深空探测研究, 并参与各项国际联合观测项目, 计划进行 L, S, C, X, Ku, K, Ka 和 Q 波段的射电信号观测, 其中 K 波段 (18~26.5 GHz) 带宽达 8.5 GHz。该望远镜的天线接收机到记录终端的距离为 500 m 左右, 若采用电缆传输, 由于信号频率很高, 会有很大的信号衰减, 为了保持信号强度, 必然要插入中继放大器, 而这会增大系统的噪声系数, 且电缆的传输带宽、抗干扰性能和环境适应性等都不及光纤。因此, 上海 65 m 射电望远镜将采用 1~12 GHz 的宽带光纤链路传输天线接收机输出的微波信号。

收稿日期: 2010-04-20; 修回日期: 2010-05-13

资助项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (08DZ1160100)

2 宽带微波信号光纤传输链路的组成及性能参数

光纤传输系统主要由光发射机、光接收机和光纤组成,如图 1 所示。光发射机利用输入的电信号对半导体光源进行强度调制^[2],实现电光转换,并把光信号有效地送入光纤;光接收机利用光电检测器检波,将经过光纤传输后的光信号恢复为原来的电信号。

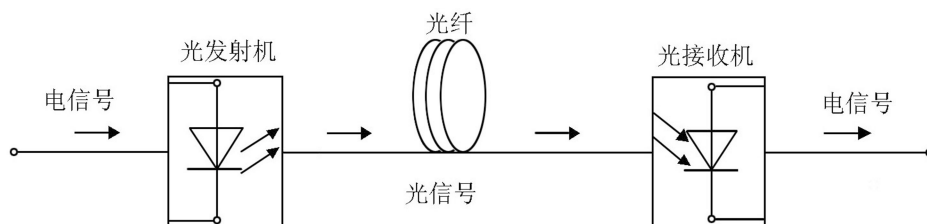


图 1 光纤传输链路示意图

按照输入电信号的形式,光纤传输可分为模拟传输和数字传输两类。当系统受带宽限制而不受损耗限制,终端设备的价格成为主要考虑因素时,一般采用模拟光纤传输系统^[3],例如,视频信号的短距离传输、微波复用信号传输、天线遥测和雷达信号处理等。而数字光纤传输系统,由于高速数模和模数转换的高价格及 PCM 调制占据的宽带宽,适用于长距离、大容量的信息传输。综合考虑,在建的上海 65 m 射电望远镜宽带微波信号的传输采用基带直接光强调制光传输链路^[2]。

2.1 宽带微波信号光纤传输链路的性能参数

2.1.1 增益

增益是指光纤传输链路输出端信号功率与输入端信号功率的比值,与光端机(光发射机、光接收机)的增益和光纤的衰减特性有关。光纤传输链路的增益 G_{link} 可表示为:

$$G_{\text{link}} = G - A, \quad (1)$$

式中, G 为光端机的增益, A 为在传输距离内光纤、接头和熔接点的总损耗,其单位都为 dB。

2.1.2 带宽

带宽指光纤传输链路的增益下降 3 dB 时对应的频带宽度,在此频率范围内,信号可以不失真地传输。光纤的带宽受限于色散效应,但是单模光纤没有模间色散,其可用带宽达 30 THz,因此限制光纤传输链路带宽的主要因素是光端机的频率响应。

2.1.3 噪声系数

通常情况,衡量系统的噪声特性用噪声系数 (NF),定义为系统输入端信噪比与输出端信噪比的比值^[4]。系统的信噪比定义为接收信号功率 (S) 和噪声功率 (N_p) 的比值,即:

$$\frac{S}{N_p} = \frac{\langle i_s^2 \rangle R_L}{\langle i_N^2 \rangle R_L} = \frac{\langle i_s^2 \rangle}{\langle i_N^2 \rangle}, \quad (2)$$

式中, $\langle i_s^2 \rangle$ 和 $\langle i_N^2 \rangle$ 分别为均方信号电流和均方噪声电流, R_L 为光检测器负载电阻。信噪比 (SNR) 一般以 dB 为单位,即:

$$SNR = 10 \lg \frac{\langle i_s^2 \rangle}{\langle i_N^2 \rangle}. \quad (3)$$

噪声主要来源于半导体器件的量子噪声^[5]、暗电流噪声、负载电阻 R_L 的热噪声和前置放大器的噪声。这些噪声会引起输出信号相位的随机起伏,即产生相位噪声。

相位噪声使输出信号频谱展宽,在中心频率附近出现偏移频率。通常,相位噪声定义为某一给定偏移频率处单位带宽的信号功率与信号总功率的比值,单位为 dBc/Hz。目前,高性能的光源和光检测器引入的相位噪声较低。

另外,对于级联系统,其噪声系数 NF 为:

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{NF_n - 1}{G_1 G_2 \cdots G_{n-1}}, \quad (4)$$

式中 NF_i 为第 i 级的噪声系数, G_i 为第 i 级的增益, $i = 1, 2, 3, \cdots$ 。

2.1.4 动态范围

动态范围是描述光纤传输系统保持高性能工作所能承受的信号变化范围。其下限是灵敏度,也称“最小分辨信号”,即在满足接收机解调要求的最低信噪比下,接收机允许的最低输入信号电平,因此它受背景噪声的制约;为使传输链路输出光信号真实反映输入电信号,要求系统输出光功率与输入电信号成比例地随时间变化,即不发生信号失真。当信号太大时,系统由于非线性而引起信号失真,输出信噪比反而会下降,因此动态范围的上限由允许的最大信号失真指标决定,一般取为产生 1 dB 压缩点的输入信号电平。

一般情况下,实现电光转换的光源,在大信号条件下工作时,线性较差,因此发射机光源的输出功率特性是系统产生非线性失真的主要原因。

非线性失真一般用幅度失真参数——微分增益 (DG) 和相位失真参数——微分相位 (DP) 表示。 DG 定义为:

$$DG = \left[\frac{\frac{dP}{dI}|_{I_2} - \frac{dP}{dI}|_{I_1}}{\frac{dP}{dI}|_{I_2}} \right]_{\max} \times 100\%, \quad (5)$$

式中, P 指光源发射光功率, I 为驱动电流。 DP 定义为光源发射光功率 P 和驱动电流 I 的相位延迟差,

$$DP = [\varphi(I_2) - \varphi(I_1)] . \quad (6)$$

对于模拟光纤传输链路,光发射机通常采用线性度好的光源,如分布反馈式半导体激光器^[6]等。

2.2 光纤的传输参数

光纤的传输参数主要有衰减和色散。

2.2.1 光纤的衰减特性

光纤的衰减是指光信号功率在光纤传输过程中产生的光损耗,是光纤最重要的特征之一。它在很大程度上决定了在无信号放大和再生的条件下,光发射机和光接收机之间所允许的最大距离。

光纤的衰减特性用衰减系数 α 表示。光信号在光纤中传播时,光功率 P 随着传输距离 z 的增加按指数形式衰减,即:

$$P(z) = P(0) \exp(-\alpha_P z), \quad (7)$$

式中, α_P 为光纤的损耗常数, 单位为 km^{-1} , $P(0)$ 为 $z=0$ (起始) 处的光信号功率。通常光纤衰减系数用单位长度的分贝数表示, 定义为:

$$\alpha = \frac{10}{z} \lg \frac{P(0)}{P(z)}, \quad (8)$$

其中 α 的单位为 dB/km , P 的单位为 mW 。将式 (7) 代入式 (8) 得出 α 与 α_P 的关系为:

$$\alpha = 4.343\alpha_P. \quad (9)$$

光纤的衰减与传输光波长有关。产生衰减的原因很多, 主要有吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。其中, 吸收损耗与光纤本身的材料组分有关, 散射损耗与光纤的结构缺陷、非线性效应等有关, 辐射损耗与光纤的几何形状波动有关, 是使用中最易受到影响的损耗类型。当光纤弯曲到一定的曲率半径时, 部分光功率将辐射到光纤包层中, 光纤弯曲段外侧的一部分光向外辐射, 从而产生辐射损耗。随着弯曲增大, 辐射损耗呈指数增大, 当到达某个临界值时, 如果弯曲进一步加大, 辐射损耗就会突然变得很大, 甚至导致传输中断。因此, 弯曲、挤压等引起光纤几何形状变化的外界因素会影响光纤的衰减特性^[7]。另外, 由光纤衰减的产生机理可知, 环境温度的变化也会引起光纤损耗的变化。

2.2.2 光纤的色散特性

光纤色散是指光纤中所传信号的不同频率成分或不同模式成分, 在传播过程中因群速度不同相互散开, 造成他们到达光纤终端的时间各不相同, 从而引起传输信号波形失真、脉冲展宽的现象^[8]。

色散的大小可用时延差表示, 时延差越大, 色散越严重。单位长度的时延可表示为:

$$\tau = \frac{1}{c} \cdot \left. \frac{d\beta}{dk_0} \right|_{f=f_c}, \quad (10)$$

单位为 $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。公式 (10) 中, f_c 为光载波的频率, β 为轴向的光传输常数, k_0 为真空中的相位系数, c 为真空中的光速。

目前光纤通信上使用的光源均为半导体光源, 都有一定的谱线宽度, 线宽越窄, 光源的相关性越强。假设光源的带宽为 Δf , 则单位带宽上引起的时延差为:

$$\Delta\tau = \frac{k_0}{c} \cdot \frac{\Delta f}{f_c} \cdot \frac{d^2\beta}{dk_0^2}. \quad (11)$$

可见, 信号的时延差与光源的相对带宽 $\Delta f/f_c$ 成正比, 光源的相对带宽越窄, 信号的时延差越小, 引起的色散小。

单模光纤的色散主要包括: 材料色散、波导色散和偏振模色散^[9]等。由于没有模间色散, 其总色散比多模光纤的小很多, 因此单模光纤的可用带宽远远大于多模光纤的带宽。

在 40 Gbit/s 以下^[10]的光纤传输链路中, 色度色散^[11] (包括材料色散和波导色散) 起主要作用。材料色散是由于光纤材料本身的折射率随频率变化, 使得信号各频率成分的群速度不同而引起的色散; 波导色散主要是由光纤几何结构、形状等的不完善引起的色散。

另外, 光纤的时延会随环境温度的变化而变化。众所周知, 光脉冲通过长度为 L 的光纤的群时延为:

$$\tau = \frac{L}{V_g} = \frac{LN}{c}, \quad (12)$$

式中, V_g 为光信号的群速度, N 为光纤材料群折射率, c 为真空中的光速。当温度发生变化时, 群时延也发生变化, 将时延 τ 对温度 T 求导可得:

$$\frac{d\tau}{dT} = \frac{1}{c} \left(L \frac{dN}{dT} + N \frac{dL}{dT} \right). \quad (13)$$

实际上, 光纤时延随温度的变化是一种慢变化, 称为温度漂移。定义单位长度、单位温度间隔内时延变化量为光纤温度时延漂移常数, 记作 K_f , 单位为 ps/(km·°C), 表达式为:

$$K_f = \frac{d\tau}{dT} \cdot \frac{1}{L} = \frac{1}{c} \left(\frac{dN}{dT} + \frac{N}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \right), \quad (14)$$

式中, 第一项是由于光纤材料群折射率随温度变化引起的, 第二项是由于光纤物理变化引起的。在一般情况下, 时延随温度的变化并不完全是线性关系。

3 宽带微波信号光纤传输链路方案及性能分析

根据上海 65 m 射电望远镜的应用需要, 对超高频、宽带微波信号光纤传输链路的性能指标要求如下: (1) 增益 ≥ 0 dB; (2) 带宽 1~12 GHz; (3) 噪声系数 $NF < 8$ dB; (4) 动态范围 ≥ 100 dB。

按照以上性能指标的要求, 选择合适的光端机和光纤型号。光发射机和光接收机选择 PhotonicSystem.Inc 公司 PSI-1600 系列产品中的 PSI-1602 光端机, 其性能参数见表 1。该产品是用于军事、卫星、射电天文、蜂窝/无线基站等领域中天线远程控制或 RF/IF 信号分配的高性能传输设备。光纤选用康宁公司的 SMF28-e 光纤, 该光纤符合 ITU.T.G652D 标准, 具体参数如表 2 所示。宽带微波信号光纤传输链路的方案示意在图 2 中。

表 1 PSI-1602 光端机性能参数

参数	符号	典型值	单位	备注
工作带宽	B	0.1~12	GHz	
噪声系数	NF	6	dB	
增益	G	2	dB	
输出 1 dB 压缩点	P_{1dB}	-25	dBm	
输出三阶互调点	$OIP3$	-6	dBm	
无杂散动态范围	$SFDR$	106	dB	
驻波比	$VSWR$	< 2.2 : 1	—	
发射模块偏置功率	—	< 11	W	
接收模块偏置功率	—	35	mW	
幅度平坦度	—	± 0.5	dB	任意 100 MHz 内
工作波长	λ	1 550	nm	最小 1 520, 最大 1 575
RF 信号的功率	—	-6	dBm	最大
光纤传输距离	—	3	km	噪声系数增加 1 dB 时

根据光端机和光纤的性能参数可知, 光纤传输链路的各项性能指标如下:

(1) 链路增益

表 2 SMF28-e 光纤的性能参数

参数	最大值	单位	备注
衰减系数 α	0.33~0.35	dB/km	1 310 nm 波长处
	0.19~0.20	dB/km	1 550 nm 波长处
色散	18.0	ps/(nm·km)	1 550 nm 波长处
α 随波长的变化	0.03	dB/km	1 285~1 330 nm 范围
	0.02	dB/km	1 525~1 575 nm 范围
宏弯损耗	0.05	dB	弯曲半径为 32 mm

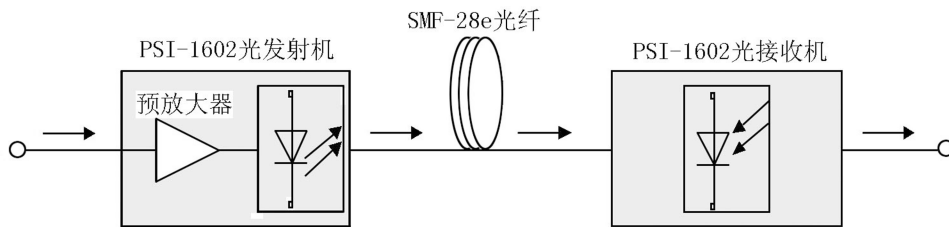


图 2 宽带微波信号光纤传输链路方案示意图

考虑链路中光纤衰减、接头的损耗以及熔接点的损耗，其典型值如表 3 所示，可知光纤传输链路的增益为： $G_{link} = G - A = (2 - 1.14) \text{ dB} = 0.86 \text{ dB} > 0 \text{ dB}$ 。

(2) 链路带宽

由于现在的单模光纤带宽可达 30 THz，限制链路带宽的关键在于光发射机和光接收机的带宽特性。由表 1 可知，PSI-1602 光端机的工作带宽满足设计要求。

(3) 噪声系数

由式 (4) 可知，整个光链路的噪声系数取决于光发射机中预放大器的噪声系数和增益。PSI-1602 的噪声系数为 6 dB，满足要求。

(4) 动态范围

通常更关心无杂散动态范围 (SFDR)，其定义为：

$$SFDR = \frac{2}{3}(IP_3 - 10 \lg(kT_0B) - NF), \tag{15}$$

式中， IP_3 为三阶截获点， k 为波尔兹曼常数， T_0 为环境温度。由表 1 的参数可知，光纤传输链路的无杂散动态范围达 106 dB，满足设计要求。

表 3 典型的传输链路损耗

损耗来源	单位损耗	数量	小计
光纤损耗	0.2 dB/km	0.5 km	0.1 dB
连接头	0.5 dB/个	2	1 dB
熔接点	0.02 dB/个	2	0.04 dB
总损耗 A			1.14 dB

4 光纤传输与电缆传输的性能比较

如果天线接收机到终端控制室之间的传输使用同轴电缆, 由于同轴电缆的损耗系数与电缆的尺寸、介电常数、工作频率等有关, 且与频率的平方根成正比, 频率越高, 衰减越大。因此在 1~12 GHz 带宽内, 信号衰减的差异较大, 增加了传输链路的复杂度。表 4 给出了目前几种先进的低损耗同轴电缆在 2 GHz 处的衰减性能。可见即使信号频率为 2 GHz, 对于 500 m 的传输距离, 其损耗都远远大于光纤传输链路的损耗 (1.14 dB)。因此在实际传输时需要插入中继线性放大器, 而插入中继放大器会增大链路的噪声系数, 导致信噪比下降, 同时也会增加信号的传输时延。

采用光纤传输, 不仅在整个带宽内衰减特性平坦, 而且无需中继放大, 对链路的噪声系数影响小, 可实现信号的高质量传输。

表 4 3 种低损耗同轴电缆 2 GHz 频率处的衰减 (温度 20°C)

电缆型号	单位衰减 /dB·(100 m) ⁻¹	500 m 衰减 /dB
Time LMR1700	4.9	24.5
HSR600	12.8	64
SYWV-50-12	13.9	69.5

5 总结与展望

本文介绍了宽带微波信号光纤传输链路的构成、性能参数及实现方案, 理论上说明了方案的可行性, 但还需进一步的实验验证。另外, 为了保证系统的可靠性, 需要对传输链路的温度特性进行实验模拟测试, 同时测定光纤的弯曲、挤压、扭挠对信号传输质量的影响, 以指导实际应用。

参考文献:

- [1] 方志豪, 朱秋萍, 方锐. 光纤通信原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2008: 14
- [2] Cox III Charles, Ackerman Edward, Helkey Roger *et al.* IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 1997, 45(8): 1375
- [3] 孙强, 周虚. 光纤通信系统及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2004: 107
- [4] Ackerman Edward I, Burns William K, Betts Gary E *et al.* Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2441
- [5] Yariv Amnon. Optical Electronics in Modern Communications. Fifth Edition. 陈鹤鸣译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 356
- [6] Cox III Charles H, Ackerman Edward I, Microwave Photonics, 2008: 9
- [7] Himeno K, Matsuo S, Ning Guan *et al.* Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3494
- [8] 黎洪松. 光通信原理与系统. 北京: 高等教育出版社, 2008: 67
- [9] Gordon J P, Kogelnik H. PNAS, 2000, 97(9): 4541
- [10] Zafrullah M, Aleem Mirza M, Waris M. *et al.* International Networking and Communication Conference, 2004: 111
- [11] Abedin K S, Hyodo M, Onodera N. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2000: 429
- [12] Himeno K, Matsuo S, Ning Guan *et al.* Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3494
- [13] WANG Pengfei, Semenova Y, Rajan G *et al.* Photonic Technology Letters, 2009, 21(8): 516

Design of Fiber-Optic Link for Broadband Microwave Signal Transmission

WU Na-fei^{1,2}, LI Bin¹, FAN Qing-yuan¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract: The 65 m radio telescope in Shanghai is being developed to realize 8 bands radio signals observation, ranging from *L*-band to *Q*-band, and the *K*-band (18~26.5 GHz) is about 8.5 GHz wide. The terminal control room is about 500 m away from the antenna receiver. In order to achieve high-quality broadband microwave signal transmission, the 1~12 GHz broadband microwave fiber-optic link is designed. Firstly, composition of fiber-optic link and its overall performance parameters are introduced, focusing on attenuation and dispersion characteristics of fiber. Then the scheme of the broadband microwave fiber-optic link is described, and also its performance is compared with that of cable link. Consequently, the advantages and feasibility of fiber-optic link are demonstrated.

Key words: broadband microwave signal; optical fiber; optical fiber link; noise figure