

IM-DD 数字光纤通信系统设计的软件方法^{*}

傅思镜 罗莹莹 梁丽贞

(中山大学物理学系, 广州 510275)

摘 要 扼要介绍了 CCITT (国际电报电话咨询委员会) 图解法的基本原理及其软件方法实现光纤通信系统设计的关键措施和突出特点.

关键词 光纤通信, 系统, 软件

分类号 TP 391, O 436, TN 35

中继距离的光纤通信系统设计, 大多数文献采用所谓“参数选择法”. 这种方法在考虑传输距离受损耗的限制和受光纤色散的限制所得计算公式是不一致的, 结果也往往不同. 而 CCITT (国际电报电话咨询委员会) 建议的“图解方法”^[1], 比较合理地解决了传输距离受损耗限制和受光纤色散限制之间计算差异的矛盾. 但图解法计算相当复杂麻烦, 耗时费力. 我们理顺了图解法系统设计众多参数之间的关系; 对计算方法和步骤作了简化处理; 运用软件方法技巧, 编写出使用方便、灵活、反应快捷、结果合理的系统设计软件. 该软件即使对定点系统, 同样可根据实际情况, 计算出光纤 (光缆) 光发射机、光接受机等设备的技术要求, 便于工程配置. 因此, 它无论在光纤通信系统设计理论、软件设计技术和工程使用方面都有重要的现实意义.

1 CCITT 图解法基本原理概述

光纤通信系统中两个中继器之间的传输距离 L 可用下式计算

$$L = (S_t - S_r - 2T - M_E) / [T_f + (T/l_f) + M_0] \quad (1)$$

式中: S_t 为光发射机发射的平均光功率 (dBm); S_r 为光接收机的灵敏度 (dBm); T 为一个光纤活动接头的损耗 (dB); T_f 为一个光纤固定接头的损耗 (dB); T_f 为光纤每公里的损耗 (dB/km); l_f 为每一根光纤的长度 (km); M_E 为设备富余度; M_0 为光纤每公里的富余度 (dB). (1) 式表明了受损耗限制传输距离的情况.

实际上, 传输距离还受光纤色散的限制. 光纤色散越严重 (即光纤的带宽越窄), 光纤中传输码流脉冲展宽越宽, 码间干扰越严重, 误码率越高, 从而限制了传输距离. 受光纤色散限制的传输距离 L 可用下式计算

$$L = [(B_c / 0.44)^2 (5.55 T^2 / f_b^2 - \Delta f(\lambda))]^{1/2} \quad (2)$$

式中: B_c 为光纤的“带宽-距离积 (MHz·km)”; T 为相对脉宽; r 为带宽距离指数; Δf

^{*} 广东省自然科学基金 (960025) 资助项目

收稿日期: 1997-01-15 傅思镜, 男, 51岁, 副教授

(λ) 为材料色散引起的脉冲展宽; f_b 为传输码速率. (2) 式表明, 当码速率高到一定程度时, 传输距离 L 将急剧下降, 此时的传输距离就主要受光纤色散的限制.

CCITT 图解法的核心是将 (1) 式中的光接收机灵敏度 S_r 项, 看成为传输距离 L 的函数. 事实上, S_r 与光接收机的输入波形有关, 即 (2) 式中传输距离 L 越长, 相对脉宽 T 展宽越宽, 码间干扰越严重, 对光接收机灵敏度劣化影响越严重, 记作 $S_r(L)$, 即 S_r 劣化程度是 L 的增函数. 因此 (1) 式可表示为

$$L = (S_r - 2T_c - S_r(L) - M_E) / [T_r + (T_s/l_f) + M_0] \quad (3)$$

(3) 式右边是 L 的隐函数, 须用图解法求解. 令

$$A_s = T_r + (T_s/l_f) + M_0 \quad (4)$$

则 (3) 式可写为

$$S_r - 2T_c = A_s L + S_r(L) + M_E \quad (5)$$

若以 S_r (dBm) 为纵坐标, 以 L 为横坐标, 就可以在坐标系中构成解 (5) 式的 CCITT 图解法, 如图 1 所示.

若仅考虑 S_r 因传输损耗造成随 L 增加而劣化的规律, 即

$$S_r - 2T_c - S = A_s L \quad (6)$$

从图可见, (6) 式在 “ S_r (dBm) - L ” 坐标系中, 是以 L 为自变量, 以 A_s 为斜率的直线方程. 由于 $S_r(L)$ 是 L 的增函数, $S_r(L)$ 在坐标系中是一条随 L 增加而灵敏度劣化程度增加的曲线.

在图中, 用直尺平行于纵坐标轴左右移动, 当移动到由 (6) 式所确定的直线与曲线 $S_r(L)$ 之间所夹线段 AB 恰好等于系统设备富余度 M_E 时, 则直尺所在位置 L_1 的值, 就是要求的传输距离. 或者说, $L = L_1$ 时, 这样一个传输距离的解, 统一了损耗和光纤色散两个因素的影响.

2 软件方法实现 CCITT 图解法光纤通信系统设计的关键措施

2.1 $S_r(L)$ 曲线的求取方法

(1) 先根据所选的光电检测器、放大器类型, 确定总噪声 N 表达式. 光电检测器的噪声表现形式有: 量子噪声、暗电流噪声 N_d 、倍增噪声 N_s 等. 在判决点上, 放大器噪声功率 N_A 一般可表示为

$$N_A = \left(\frac{2KT}{R_b} + S_r + \frac{S_E}{R_i^2} \right) \frac{I_2}{f_b} + (2C_T)^2 f_b S_E I_3 \quad (7)$$

式中, K 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, R_b 为偏置电阻, R_i 为输入电阻, C_T 为输入端总电容, S_E 、 S_r 为放大器输入端噪声电压、电流源功率谱密度, I_2 、 I_3 为波形参数. 对于 FET 场效应管放大器、双极晶体管放大器、场效应管互阻抗放大器、双极晶体管互阻抗放大器, 由于场效应管输入电阻 R_i 、双极晶体管放大倍数 U 及反馈电阻 R_f 的影响, 可对应演绎为 4 种

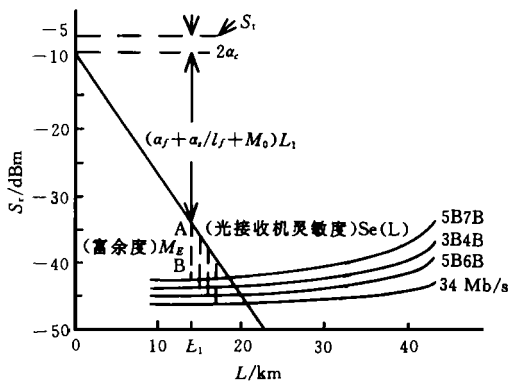


图 1 用 CCITT 图解法确定传输距离示意图

Fig. 1 The diagrammatic sketch for determining the transmissive distance with CCITT graphical method

不同的 N_A 表达式. 因此, 对 APD 雪崩光电二极管作检测器的光接收机, 其总噪声为 $N = N_s + N_b + N_A$. 而对 PIN 光电二极管作检测器的光接收机, 因 PIN 管无倍增噪声, 其总噪声为 $N = N_s + N_A$.

(2) 再根据光电检测器的类型, 选择计算光接收机灵敏度 p_{rm} 的表达式. 根据 CCITT 改良法, 对于 APD 作检测器的光接收机, 处在最佳倍增状态下的灵敏度表达式为

$$P_{rm} = \frac{f_b}{2R} Q^{(2+x)/(1+x)} e^{1/(1+x)} N_A^{x/2(1+x)} r_{1m}^{x/2(1+x)} r_{2m}^{(2-x)/(1+x)} \quad (8)$$

式中
$$r_{1m} = \frac{2}{X^2 - I_1^2} \left[-X + \left(X^2 + \frac{4}{x^2} (X^2 - I_1^2) (1+x) \right)^{1/2} \right]$$

$$r_{2m} = \left(\frac{1}{2} (X + I_1) + \frac{1}{r_{1m}} \right)^{1/2} + \left(\frac{1}{2} (X - I_1) + \frac{1}{r_{1m}} \right)^{1/2}$$

Q 为品质因数, e 为电子电荷, x 为过剩噪声指数, I_1, X 为波形参数. 而对 PIN 作检测器的光接收机的灵敏度表达式为

$$P_{rm} = (Q/R) f_b N_A \quad (9)$$

式中, R 为检测器的响应度.

(3) 由 $S_r = 10 \lg (P_{rm} / 10^{-3})$ dBm, 计算 S_r 的 dBm 值.

(4) 令相对脉宽 T 在 0.25 到 0.5 之间变化, 计算出每一个 T 值所对应的 S_r . 从 (7)、(8)、(9) 3 式可以看出接收机灵敏度 p_{rm} 与噪声有关, 亦即与波形参数 $I_1, I_2, I_3, \epsilon_1$ 等直接有关. 而波形参数 I_1, I_2, I_3, X 等又与输入光脉冲 $h_p(t)$ (或高斯波、或矩形波、或指数波) 的相对脉宽 (或占空比) T 有关, 利用 S. D. Personick 计算的结果, 便获得 S_r 与 T 的关系曲线.

(5) 根据 (2) 式建立 T 值与传输距离 L 的关系.

这样, 以 T 为中间变量, 经过 (1) ~ (5) 5 个步骤的计算, 就可建立起 S_r 与 L 之间的数值关系. 画出 $S_r(L)$ 曲线. 而且对不同的码速率 f_b , 可分别经过 (1) ~ (5) 5 个步骤计算得到不同的 $S_r(L)$ 曲线.

2.2 直线 $S_r - 2T - S_r = A_s L$ 的绘制 只须 L 取两个适当的非零值 L_1, L_2 , 代入直线方程求得 S_r 两个对应值 S_1, S_2 ; 再将 $(L_1, S_1), (L_2, S_2)$ 两点相连接便行.

3 软件方法的突出特点

3.1 软件的算法特点 为了找到符合 CCITT 图解法的最大中继距离 $d_{\max}$ 和最佳灵敏度 $P_{\min}$, 用 $dd_{\max}$ 子程序, 采用区间扫描方法, 先让 T 从 0.25 到 0.5 以较大步长 5.0×10^{-3} 扫描; 确定 $d_{\max}$ 所在的较小区间后, 再以较小步长 5.0×10^{-5} 扫描, 最后较精确找到 $d_{\max}$ 及 $P_{\min}$. 这样既可缩短运算时间, 又可提高运算精度.

3.2 软件的介面特点 友好、明晰、反应灵敏、使用方便是软件介面的最明显特点. 软件运行后, …… 汉化的屏幕就好像一位和蔼可亲的系统设计专家, 与用户一块乘上光纤通信系统巡游快车. …… 她带领用户愉快地游完系统全程, 用户将赏心悦目地获得最满意的系统设计结果.

3.3 快速获得合理的系统设计结果 通常用笔进行较完善的系统设计需要几个小时, 甚至几天, 较熟练的工程技术人员也要紧张地忙几十分钟; 而用软件方法只需几分钟, 且可靠, 不易失误. 软件方法如此神速, 除发挥了计算机快速运算的功能外, 还大胆地采用了形式较简单的近似计算公式; 同时某些参数 (如 N_A) 的计算也类似采用了“重要性取样法”的

处理原则，从而简化了计算过程，当然还与软件采用了结构化模块化编程方法，运用了较好的编程技巧分不开。

我们用软件方法对近十个文献^[2~5]提供的十几个光纤通信系统设计实例进行校验（参见表 1），发现与两个书面用 CCITT 图解方法原理的计算结果吻合得很好，与其余用“参数选择法”的书面计算结果大体相符。有软件方法对比验算，极容易验算出采用 CCITT 图解法原理进行光纤通信系统设计，其结果更为合理，更符合实际工程应用。这也正是 CCITT 的初衷。

表 1 部分实例校验情况表

Tab. 1 The comparison of partial examples calculated

实例出处	实例类型	实例计算结果	软件方法计算结果
[2]	CCITT 图解法	中继距离 $d=15.1\text{ km}$	$d=15.1\text{ km}$
[3]	参数选择法	接收机灵敏度 $S_r=-36\text{ dBm}$	$S_r=-36.5\text{ dBm}$
[4]	参数选择法	$S_r=-48\text{ dBm}$	$S_r=-48.5\text{ dBm}$
[5]	参数选择法	140 Mbit/s $d=55.9\text{ km}$	$d=55.3\text{ km}$

参 考 文 献

1 Transmission system using optical fiber. ITU Journal CCITT Study Group XV, 1980

2 李泽民. 光纤通信 (原理与技术). 北京: 科学技术文献出版社, 1992. 503~ 512

3 顾晚仪, 李国瑞. 光纤通信系统. 北京: 人民邮电出版社, 1989. 339~ 342

4 魏继明. 光纤通信. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1994. 647~ 651

5 杨同友, 杨邦湘. 光纤通信技术. 北京: 人民邮电出版社, 1995. 347~ 351

A Software Method for Designing IM-DD Digital Optical Fiber Communication System

Fu Sijing Luo Yingying Liang Lizhen*

Abstract The fundamental principles of CCITT graphic method are introduced. The key method for designing optical fiber communication system with computer software are discussed.

Keywords optical fiber communication, system, computer software

* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>