

李中年 编著

Communications

电力通信

for Electric Power



國防工業出版社

National Defense Industry Press

电力通信

李中年 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以研发和建设电力系统通信网为目标,论述了现代电力通信的相关理论、技术与应用,其内容主要包括电力系统电子通信和电力系统光子通信,全书共三篇 12 章。

本书取材广泛、内容丰富、贴近工程、新颖实用,比较系统、深入地论述了电力系统电子通信和光子通信的新理论、新技术和新应用。书中理论联系实际,事例具体;语言通俗易懂,文笔流畅;阐述深入浅出,图文并茂。

本书可供相关科研工作人员、工程技术人员、电信运营商和设备制造商以及管理人员阅读,也可作为高等学校电信类本科生和研究生的选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力通信/李中年编著. —北京:国防工业出版社,
2009.5

ISBN 978-7-118-06132-1

I. 电... II. 李... III. 电力系统—通信 IV. TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 211477 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 34 $\frac{3}{4}$ 字数 1105 千字

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

3C(Computer, Control, Communication)技术发展迅猛、应用广泛、影响深远,是信息化时代的重要标志之一,其理论与技术及产业化水平在很大程度上象征着一个区域文明进程、科技进步和经济进展的状况。

3C技术相互渗透、相互依承、紧密融合、紧密关联,这在实际应用工程中表现得更为明显。3C技术在电力系统中的应用不仅日益广泛,而且已具规模,最为突出的体现和典型的应用就是电力通信。电力通信在3C技术的支持下,从原来的电力载波通信发展到现在的电力电子通信和光子通信。尤其是在光通信技术的推动下,电力系统的发电厂、变电站、输配电和继电保护等设施都先后采用了以光纤通信技术为主导的光子通信技术与电子通信技术相融合的现代通信方式,并且建成了相当规模的现代电力通信网络。电力系统的国调、网调、省调、地(市)调和县调之间的调度指令,各级电话电视会议的视频信号,各厂、站节点的有关数据,以及各种业务往来的相关信息,均由电力通信网络进行传输,极大地促进了电力系统自动化与智能化的进程。相对工业发达国家而言,我国电力通信事业起步较晚,主要设施和相关技术也比较滞后,因此同仁们任重而道远、艰辛而光荣。

本书比较系统地介绍了电力通信的基本理论、主要技术和实际应用,引用和参考了许多有关文献与范例,并融进了编著者多年来的相关研究与体验。

本书在编写和出版过程中,得到了许多同仁和友人的支持与帮助,在此表示衷心的感谢!同时诚挚地感谢本书中引用和参考的有关文献、资信及范例的单位与作者(包括一些不知姓名的作者,即未查询到或被遗漏了的作者)!

限于作者的学识水平,加之成书仓促,书中如有错误和不妥之处,希望读者不吝指正。

编著者

目 录

第一篇 电力系统通信概论

第 1 章 电力系统通信进展与动向	1	2.6.6 软交换	120
1.1 电力通信的进展	1	2.6.7 网络交换	123
1.1.1 电力通信进展历程与主要问题	1	2.7 电子通信基本网络	129
1.1.2 电力通信现实状况与关键技术	2	2.7.1 网络类型	129
1.2 电力通信的动向	2	2.7.2 网络结构	147
1.2.1 电力通信发展趋向	3	2.7.3 网络安全	149
1.2.2 电力通信前景展望	3	2.7.4 网络协议	159
第 2 章 电子通信基本理论与技术	5	2.8 电子通信常用器件	165
2.1 电子通信基本概念	5	2.8.1 终端	166
2.1.1 电子通信系统模型及组成	5	2.8.2 调制解调器	167
2.1.2 电子通信传输介质与损耗	16	2.8.3 交换机与路由器	169
2.1.3 电子通信传输方式与标准	18	2.8.4 网桥与网关	173
2.2 电子通信编码方法	19	2.8.5 中继器与集线器	175
2.2.1 信源编码	19	2.8.6 复用器与集中器	178
2.2.2 信道编码	29	第 3 章 光子通信基本理论与技术	182
2.3 电子通信调制方法	38	3.1 光通信原理	182
2.3.1 调制的基本概念	39	3.1.1 量子光学与分子光子学	182
2.3.2 模拟调制法	39	3.1.2 光子存储与光子显示	182
2.3.3 脉冲调制法	55	3.1.3 光子技术与电子技术	183
2.3.4 数字调制法	59	3.1.4 光发送机与光接收机	183
2.4 电子通信同步方法	79	3.1.5 光通信基本工作原理	184
2.4.1 载波同步法	79	3.2 光纤光栅与光纤光缆	185
2.4.2 码元同步法	82	3.2.1 光纤导光原理与光学特性	185
2.4.3 帧同步法	85	3.2.2 光纤损耗与色散	187
2.4.4 网同步法	88	3.2.3 光纤构造与类型	188
2.5 电子通信信道复用和多址方法	91	3.2.4 光缆结构与种类	189
2.5.1 多路复用	91	3.2.5 光纤光栅	190
2.5.2 多址方式	98	3.3 光通信协议	197
2.6 电子通信交换方法	110	3.3.1 GMPLS 的基本概况	197
2.6.1 交换功用与交换原理	110	3.3.2 GMPLS 的基本内涵	198
2.6.2 电话网交换	112	3.3.3 通用 LSP	200
2.6.3 分组交换	115	3.3.4 链路管理	201
2.6.4 帧中继交换	117	3.3.5 GMPLS 对信令协议的扩展	202
2.6.5 ATM 交换	119	3.3.6 GMPLS 路由协议及其扩展	203

3.4 光通信器件	206	3.4.4 光隔离器与光衰减器	224
3.4.1 光放大器与光滤波器	206	3.4.5 光调制器与光交换器	225
3.4.2 光耦合器与光连接器	212	3.4.6 光分复用器与光插分复用器	230
3.4.3 光电探测器与光波长变换器	221	3.4.7 光开关与激光器	236

第二篇 电力系统电子通信

第4章 电力网载波通信	253	5.3.2 联机检测	305
4.1 电力网载波通信的工作原理	253	5.4 同步数字系列微波通信系统	305
4.1.1 电力网单路载波通信原理	253	5.4.1 SDH微波通信系统的优点	305
4.1.2 电力网多路载波通信原理	256	5.4.2 SDH微波通信系统的功用	306
4.2 电力网载波通信的工作模式	263	5.4.3 SDH微波通信系统的设施	308
4.2.1 定周通信工作模式	263	第6章 卫星通信	310
4.2.2 中央通信工作模式	264	6.1 卫星通信的基本方式	310
4.2.3 变周通信工作模式	264	6.1.1 通信卫星一般姿态与类型划分	310
4.3 电力网载波通信的转接方式	265	6.1.2 卫星通信电波传播与覆盖范围	312
4.3.1 中频转接方式	265	6.1.3 卫星通信系统的组成与类型 划分	313
4.3.2 声频转接方式	266	6.1.4 卫星通信工作频段与信道分配	317
4.4 电力网载波通信的主要特点	266	6.1.5 卫星通信的主要优点与主要 问题	319
4.4.1 特殊的耦合器	266	6.2 卫星通信的信号传输	319
4.4.2 特定的通频带	266	6.2.1 模拟信号传输	319
4.4.3 特强的干扰源	267	6.2.2 语音压缩编码	320
4.5 电力网载波通信的基本设施	267	6.3 卫星通信的 TCP/IP	327
4.5.1 电力载波机	267	6.3.1 TCP/IP 功能的强化	327
4.5.2 结合滤波器	272	6.3.2 IP 与服务质量	328
4.5.3 阻波器与耦合电容器	272	6.3.3 IP 路由	328
4.6 电力网载波通信的发展动向	273	6.3.4 TCP/IP 的其他技术	331
4.6.1 PLCC 的现状	273	6.4 VSAT 智能卫星通信网	332
4.6.2 PLCC 的进展	276	6.4.1 系统组成与类型特征	332
4.6.3 PLCC 的前景	280	6.4.2 网络结构与用户接口	337
第5章 微波通信	282	6.4.3 多址协议与语音通信	340
5.1 微波通信基本工作原理	282	6.4.4 网络管理与工程建设	342
5.1.1 微波通信基本概念与主要特点	282	6.5 卫星移动通信网	344
5.1.2 微波通信系统组成与收、发信 设施	285	6.5.1 全球卫星系统	346
5.1.3 微波通信电波传播与接收方式	293	6.5.2 漫游卫星系统	346
5.1.4 微波通信衰落现象与抗衰方法	299	第7章 移动通信	347
5.2 微波通信系统的参数设定方法	302	7.1 移动通信的发展历程与主要特征	347
5.2.1 信道瞬断率的设置	302	7.1.1 移动通信发展历程	347
5.2.2 中继段段数的选取	303	7.1.2 移动通信的主要特征	348
5.2.3 收信机门限电平的计算	303	7.2 移动通信的类型划分与系统组成	349
5.2.4 最低收信电平的确定	303	7.2.1 移动通信的类型划分	349
5.3 微波通信系统的检测方法	303	7.2.2 移动通信的系统组成	349
5.3.1 单机检测	303		

7.3 移动通信的典型网络与主要性能	354	7.5 P 移动通信网与 BT 移动通信网	378
7.3.1 GPRS 网络	354	7.5.1 P 移动通信网	378
7.3.2 PHS 网络	359	7.5.2 BT 移动通信网	380
7.3.3 TK 网络	363	7.6 NG 移动通信网	386
7.4 移动通信第三代系统的研究与开发	367	7.6.1 NG 移动通信网的概念与特征	386
7.4.1 3G 概论	367	7.6.2 NG 移动通信网的结构与协议	387
7.4.2 TD-SCDMA	369	7.6.3 NG 移动通信网的关键技术与 组网发展	389
7.4.3 CDMA2000	370		
7.4.4 WCDMA	374		

第三篇 电力系统光子通信

第 8 章 光通信网	395	9.5.1 智能光通信网的呼叫连接	438
8.1 光发射/光调制/光接收	395	9.5.2 智能光通信网的接口规范	440
8.1.1 光发射	395	9.6 智能 OVPN 的业务技术	441
8.1.2 光调制	396	9.6.1 智能 OVPN 的技术内涵	441
8.1.3 光接收	396	9.6.2 智能 OVPN 业务的开发与演进	443
8.2 光传输网络与光复用方法	398	第 10 章 电力通信同步网与光接口	445
8.2.1 光传输网络	398	10.1 电力通信同步网的概念	445
8.2.2 光复用方法	400	10.1.1 数字同步网的基本概念	445
8.3 光交换与光路由	402	10.1.2 数字同步网的同步方式	445
8.3.1 光交换	402	10.2 中国电信数字同步网	447
8.3.2 光路由	404	10.2.1 建网发展历程	447
8.4 光网保护与光网恢复	409	10.2.2 建网原则与时钟选择	447
8.4.1 光网的线性保护与恢复	409	10.2.3 网络架构	448
8.4.2 光网的环保护与恢复	415	10.2.4 规约内涵与信令系统	449
8.4.3 光网的重路由与格形恢复	417	10.3 中国电力通信同步网	450
第 9 章 全光通信网与智能光通信网	419	10.3.1 中国电力通信同步网的时钟 设置及其信号分配	450
9.1 全光通信网	419	10.3.2 中国电力通信同步网的管理 监控系统	452
9.1.1 全光网的概念与架构	419	10.3.3 中国电力通信同步网中的定 时基准设施	453
9.1.2 全光网的层次结构与网络节点	420	10.3.4 中国电力通信同步网中设备 的选用	454
9.2 智能光通信网的基本架构	421	10.3.5 七号信令中目的点代码的 修改	454
9.2.1 智能光通信网的总体结构	421	10.3.6 高压变电站中电力通信同步 网的时间同步系统	457
9.2.2 智能光通信网的相关接口	424	10.4 光网保护接口技术	460
9.2.3 智能光通信网的有关协议	427	10.4.1 保护信息与通信速率	460
9.3 智能光通信网的组网策略	431	10.4.2 信道模式与接口设施	461
9.3.1 智能光通信网的组网策略	431	10.5 光网信道切换方法	464
9.3.2 智能光通信网的演进方式	433	10.5.1 光纤插拔法与光纤接口盒法	464
9.3.3 智能光通信网的设计方法	434		
9.4 智能光网的专用数据通信网	436		
9.4.1 DCN 的支持能力	436		
9.4.2 对 DCN 的功能要求	437		
9.5 智能光通信网的呼叫连接与接口 规范	438		

10.5.2	光信道分接与光开关切换法	465	11.5.4	黑龙江省高压电力网的光通信	506
10.5.3	脉冲编码调制时隙切换法	466	11.5.5	湖北省黄冈地区高压电力网的光通信	507
10.6	光纤数字同步传输网	466	11.6	高压电力网光通信常见问题与对策	510
10.6.1	光纤数字同步传输网的类型与结构	467	11.6.1	光网运行中的常见问题与对策	510
10.6.2	光纤数字准同步传输网	467	11.6.2	光网配置问题与对策	511
10.6.3	光纤数字同步传输网	467	第12章	发电厂/变电站光通信设施	514
第11章	高压电力网光通信设施	472	12.1	发电厂/变电站计算机光纤通信网	514
11.1	高压电力网光通信的基本功用	472	12.1.1	发电厂/变电站光通信网的功用	514
11.1.1	高压电力网光通信的相关信息	472	12.1.2	发电厂/变电站光通信网的架构	515
11.1.2	高压电力网光通信的主要任务	474	12.2	发电厂/变电站光通信自愈环网	516
11.2	全介质自承式电力通信光缆	474	12.2.1	信道倒换光通信自愈环网	516
11.2.1	全介质自承式光缆	474	12.2.2	复用段倒换光通信自愈环网	517
11.2.2	中继站的引入光缆	479	12.3	发电厂/变电站继电保护的光通信	518
11.3	架空地线复合式电力通信光缆	480	12.3.1	发电厂/变电站继电保护光通信的监测设施	518
11.3.1	架空地线复合式光缆	481	12.3.2	电力网继电保护光通信范例	519
11.3.2	OPGW 光缆系统中继站的引入光缆	488	12.4	发电厂/变电站光通信网应用范例	527
11.4	高压电力网通信光缆故障案例分析与处理办法	489	12.4.1	三峡电厂的光通信网	527
11.4.1	贵州地区 OPGW 光缆损耗超标原因与处理措施	489	12.4.2	三峡电厂内部光通信环网	530
11.4.2	河南地区的一起 OPGW 光缆故障现象与处理方法	492	12.5	电力系统光通信网发展与改进范例	531
11.4.3	电力 OPGW 光缆典型故障案例分析与防范举措	493	12.5.1	西安地区电力通信光网的优化改造	531
11.5	高压电力网光通信应用范例	495	12.5.2	西藏自治区电力通信光网的发展	535
11.5.1	京/津/唐高压电力网的光通信	495	12.5.3	福建三明地区电力通信光网的建设	536
11.5.2	四川省高压电力网的光通信	500	12.5.4	江苏东明/三堡地区电力通信光网的建设	539
11.5.3	福建省高压电力网的光通信	501	12.5.5	苏州电力通信光网的改进	542
			参考文献		545

第一篇 电力系统通信概论

第1章 电力系统通信进展与动向

1.1 电力通信的进展

电力系统通信早在 20 世纪 20 年代初期就已实现,但其商业运作主要是以电力线载波通信 PLCC(Power Line Carrier Communication)为代表的通信应用。PLCC 是电力系统特有的通信方式,它利用坚固可靠的现成电力网作为载波信号传输信道,因此具有传输可靠、路由合理等特点,并且是唯一不用传输信道投资的有线通信方式。电力系统通信经过几十年来的进展,已从电子通信方式发展到现代光电子通信方式。

1.1.1 电力通信进展历程与主要问题

如上所述,PLCC 作为电力系统通信的经典代表,经历了几次更新换代:从分立设施到集成设施、从单一功能到多功能、从模拟信号到数字信号的变革。

20 世纪初期,PLCC 使用频分复用技术和模块化结构的模拟式载波机,选用单边调制方式,采用高稳定度锁相环频率合成型载供系统,能很容易地得到收/发信所需的各种载频,而无需更换器件便可切换高频收发滤波器 and 信道滤波器,并且切换频段也很简单,具有多功能化、通用化和系列化的特点;但这种 PLCC 只提供单工通信传输方式,载波工作频率为 40kHz~500kHz,外加专用调制解调器实现数据通信。这一时期 PLCC 存在的主要问题是:模拟通信固有的通信质量差、通信容量小、传输速率低等。

针对这些问题,PLCC 进行了更新换代,其关键技术进行了变革,采用了数字信号处理 DSP(Digital Signal Processing)技术的准数字式载波机,并用 DSP 方式进行模拟调制、滤波和自动增益控制。由于 DSP 的应用,提高了 PLCC 的性能,通信速率可达 4.8KB/s,但是 PLCC 的运作模式仍然是模拟式的。因此,PLCC 进一步改进的目标十分清楚,即采用完全数字式载波机,并且采用 DSP 对通信信号进行处理,于是使得 PLCC 性能更进一步优化。

由于电力网是根据输电要求设置的,而不是按照通信需求设置的,因此 PLCC 存在很多问题,其中最为突出的难题有两个:一个是噪声干扰(主要是电晕噪声干扰和脉冲噪声干扰);另一个是通信信号衰耗很快。电晕噪声(又称随机噪声)是在中压(1kV 以上)和高压(100kV 以上)电场作用下电力线对周围空气产生游离放电以及绝缘子表面与内部放电引起的噪声。电晕噪声的频谱连续均匀,类似白噪声,其大小同电力网电压与电力线粗细以及电力线周围环境相关,电压越高,电力线越细,电晕噪声越大;电力线周围环境湿度增大也会使电力线电晕放电和绝缘子放电加剧,即使电晕噪声增大。脉冲噪声主要是由电力线路开关动作、避雷器放电、线路短路以及雷电侵袭等原因引起的瞬时噪声,脉冲噪声在高压电网、中压电网和低压(1kV 以下)电网中均会存在,另外,电气装置接点接触不良也会产生脉冲噪声。通常脉冲噪声持续时间很短,对话音通信影响较小,但对高速运动信号和远程保护信号的影响很大。

PLCC 信号衰耗程度一般会随通信距离增长而加剧。天气条件对高压 PLCC 也有影响,如果电力线绝缘良好,则影响较小;否则影响较大,尤其是天气寒冷地区,电力线上的霜雪将会导致 PLCC 信号衰耗显著加大。低压 PLCC 信号衰耗比较复杂,一般而言,其衰耗与频率和相位有关,频率增高,衰耗增大。此外,由于低压电网直接面向用户,负荷变化复杂,各节点阻抗不匹配,PLCC 信号会产生反射、谐振等现象,这也会使衰耗加剧,可

见,低压 PLCC 要克服的难题更大。

1.1.2 电力通信现实状况与关键技术

由于 PLCC 具有许多优势,因此吸引了世界众多专家学者和相关人员对它进行研发,从而推动和促进了 PLCC 的发展。为了彻底攻克如上所述低压 PLCC 的技术难关,行家们正在力图将先进的 DSP 运用到 PLCC 中。近年来,高压 PLCC 技术成功地突破了“仅限于单片微计算机应用”的限制,率先进入到全数字化 PLCC 时代。在全数字 PLCC 中,运用先进的话音压缩编码技术(如码本激励线性编码技术、矢量和激励线性预测编码技术、多带激励编码技术等),对话音信号进行压缩编码,降低输入信号冗余,从而提高频带利用率与数据信号进行数字复接,因此效果优良。在全数字 PLCC 中,运用先进的自适应回波抵消技术,完善地实现了双向通信;运用先进的自适应信道均衡技术,减小了信道对通信的影响,从而提高了可靠性。美国 AT&T 公司贝尔实验室运用高通码激励线性预测编码技术推出的超大规模单片声码器 Q4401,编码速率为 $800\text{B/s} \sim 600\text{B/s}$ 并且可调,速率为 9600B/s 的话音质量甚至优于速率为 32KB/s 的自适应差分脉码调制编码的话音质量,通话质量相当优良。中国宏图高科研制的新一代全数字 PLCC 载波机采用先进多频段激励技术,通话质量也很优良。当今 PLCC 调制方法的理论研究已从早期的模拟调制法转移到数字调制法,目前所用的传统频带传输方法(如幅移键控法、频移键控法、相移键控法)的 PLCC 日趋成熟,其研究热点是三种具有高抗干扰性的数字调制方法,即多维网格编码方法、扩频通信方法和正交频分复用方法。

运用先进的格形编码方法来提高 PLCC 的可靠性与有效性大有作为,即把编码方式与调制方式有机结合,将冗余度映射到同频谱展宽不发生直接联系的调制信号参数扩展中,例如,信号空间矢量点数扩展中或信号星座数扩展中。而最佳的编码调制系统应按编码序列欧几里得欧氏距离(有时简称欧氏距离)为调制设计的量度,这必须将编码器和调制器作为一个整体进行综合设计,使编码器和调制器级联后产生的编码信息具有最大欧氏距离。尤其值得关注的是:多维格形编码方法运用子集分割思想,并通过维数扩展来减小需要存储的星座点数,以获得更高的映射增益和编码增益以及更好的抗干扰性能,因此多维格形编码方法特别适合 PLCC 系统,目前国内外许多 PLCC 中所用的高速调制解调器,其核心技术就是多维格形编码调制技术。

运用先进的扩频通信方法能进一步提高 PLCC 的可靠性,是低压 PLCC 进展的重要方向之一。扩频通信方法的基本原理是运用伪随机编码将要传送的信息数据进行调制,把频谱扩展后进行传输;而在接收端则采用同样的编码进行解调及其相关处理。此方法实质上是以牺牲频带为代价,通过降低信噪比来提高可靠性。扩频通信优良的抗干扰性能为低压 PLCC 这样恶劣的信道环境提供了可靠的运作保障,而且扩频通信还可进行码分多址工作,实现不同低压配电网上不同用户的同时通信。扩频通信方法主要有直接序列扩频法、跳频法、跳时法、线性调频法以及这些方法的多种组合。目前扩频通信在低压 PLCC 中的应用研究已经取得初步成功,Intellon 公司推出了用于低压配电网的扩频芯片;中国清华大学也研制成功了基于扩频技术的低压配电网实验平台,能通过 $220\text{V}/50\text{Hz}$ 低压 PLCC 实现两台计算机之间的文件或数据传输,其传输速率可达到 10KB/s 。

运用先进的正交频分复用方法,把频域信道分成许多正交子信道,并且使各子信道载波之间保持正交,频谱相互垂叠,于是减小了信道之间的相互干扰,提高了频谱利用率。同时由于各子信道信号带宽远小于父信道信号带宽,因此,各子信道相对平坦,大大减小了符号之间的干扰,也使信道均衡得以简化。Intellon 公司基于正交频分复用的 PLCC 研发取得了突破性进展,其组网试验数据传输速率可达 14MB/s (频带为 $4.3\text{MHz} \sim 20.9\text{MHz}$;载波 84 路)。正交频分复用研究重点主要是如何分配子信道的数目以及如何保持子载波之间正交性。保持子载波之间正交性对正交频分复用性能至关重要,尤其是对接收机中同步问题处理特别重要。目前,正交频分复用在全数字 PLCC 中的研发方兴未艾,硕果累累。

1.2 电力通信的动向

过去 PLCC 主要利用高压电网作为传输信道进行话音通信和运动信号控制等应用,因此,应用范围窄,而且传输速率低。经过几十年的研发,当今 PLCC 正在向大容量、高速率、宽带化方向进展,并且同时面向高压电

网、中压电网、低压电网 PLCC 进行研发,而且还利用低压电网拟实现“家庭组网、家庭通信、家庭插座,即插即用”。

1.2.1 电力通信发展趋向

当前 PLCC 已发展到全数字化时代,如何利用先进的 DSP 等相关技术推进 PLCC 的发展,有诸多课题需要研究与实现。未来的 PLCC 要实现通信业务综合化、传输能力宽带化、网络管理智能化,并且要能实现同远程网络的无缝连接,至少要进一步研发与实现下列三个方面的课题。

(1) 硬件设施平台:主要包括 PLCC 通信方式方法及其通信网络结构优化选择方案等。另外,扩频方法、正交频分复用方法和多维格形编码方法各有千秋,这三种方法到底哪一种最适合低压 PLCC,尚有待研究与证实。当然也可采用软件无线策略为这三种方法提供一个统一平台。由于电力网络结构非常复杂,并且网络拓扑千变万化,如何优化 PLCC 网络结构也是值得进行研发的课题。

(2) 软件设施平台:主要包括 PLCC 理论方法与实现技术的进一步研发,信号处理方法与技术和调制方法与技术以及编码方法与技术的改进,以适应 PLCC 特定环境。此外,自适应信道均衡方法与技术 and 回波抵消方法与技术、自适应增益调整方法与技术等都在低压 PLCC 运用中至关重要,均需进一步研发。

(3) 网络管理平台:除了上网、通电话外,低压 PLCC 还可用做远程自动读出水表数据信息、电表数据信息、气表数据信息;还可用做永久在线连接,构建防盗、防火、防毒气泄漏等保安监控系统以及构建医疗急救系统等。因此,利用电力网可以传输数据、话音、视频和电能,实现“四网合一”,也就是说,家用电器均可接入到网络中,同骨干网相连接。但是,如何实现“四网”无缝连接以及由此带来复杂庞大的网络管理问题,显然需要进一步深入研究。

1.2.2 电力通信前景展望

显然 PLCC 不是近来新技术,然而如何将其用于家庭通信,为人们提供所需的便利通信手段,一直是人们努力追求的目标之一,如通话、聊天、电视会议、多人游戏等实时信息交流;电子邮件、文件共享、浏览新闻等所需信息获取;音乐、电视、电影、视频点播等多媒体服务;电子付费、电话银行、家庭股票、网上购物、商品展示与广告等金融消费等。如何将 PLCC 用于居室管理也是人们努力追求的目标之一,如家用电器设备网络管理,进一步实现智能化、自动化、系统化、信息化(能从互联网下载食谱的微波炉已经商业化);安全防范(保安、报警、监视等)电子装置;远程抄表设施等。

由于 PLCC 的主要难题是交流噪声损害通信信息以及通信信号的衰耗(减),近年来,这些难题已逐步有了对策。参照开放系统互连参考模型,采用三层分层设计方案,以最优设计克服 PLCC“恶劣环境”;采用高度集成芯片组件能容易地实现简化的“三层”体系结构:底层包含物理层、低层链路协议和媒体访问控制子层,可补偿 PLCC 任何“危急”状态;二层为数据链路控制;最高层为应用层。过去 PLCC 采用 MODEM 来调制 50kHz~500kHz 的载波频率,并运用频移键控或幅移键控。当电器的插头插入或拔出电源插座时,这类 PLCC 的 MODEM 需要经常调整,以调节信号的噪声和频率衰减。一般而言,扩频方法具有良好的抗电力噪声与衰减而导致的同步问题。在物理层中采用独特的扩频方法提供快速同步,使 PLCC 运用高速、可靠,并使数据信息以连续序列的比特传输于短帧之中。物理层也介入快速的均衡作用,使接收信号所受到的电力噪声和频率衰减得以补偿。低层链路协议之所以能使多节点 PLCC 可靠地运行,在于它有三项关键的特性:一是该链路协议将用户发出的长信息包折成较短的电力线帧,对于 PLCC 传输而言,短帧非常必要,因为传输越长,所受损伤越大;二是该链路协议提供了可靠地检错与纠错功能,收帧时就对其中数据信息检测并确定应重发的帧;三是该链路协议提供自适应均衡,因为 PLCC 的噪声和衰减速率很快,若不及时补偿,信号就将丢失。媒体访问控制子层采用媒体访问控制算法(专用线所用的媒体访问算法不能移用到电力线)。然而令牌传递比较适合于 PLCC。噪声与信号的区分在 PLCC 中是比较困难的,但令牌传递可在噪声环境下保障节点之间“握手”的可靠传送而不致丢失令牌。由于每一节点的位置各不相同,因此各节点在不同噪声与衰减情况下“听”传输,故有可能某些站点遗失一次传输,而另一些站点则“听”传输。在令牌传递中,节点未获得令牌之前是不能传输的,所以任一

节点传输时其他各节点不可能发送。

综上所述,PLCC 不仅提供了实用的新兴通信手段,而且具有现有物理链路,并且具有容易维护、容易推广、容易使用、成本低廉等优点,尤其是给居民家庭提高高速互联网接入而不像其他的信息服务处理设施那样需要巨大的物理硬件结构投资,显示出其良好的前景和可观的市场潜力,然而 PLCC 技术研发应用是一个系统工程,不可能在短时间内完全解决。尽管 PLCC 具有这样和那样的优势,但至今仍未大规模商业化运作,其原因是多方面的,主要原因:一是法律上和认识上的,世界各国没有建立广泛认可的 PLCC 技术标准,因此支持的生产厂家较少,并且没有立法允许在电力网上经营互联网服务和电信服务;二是服务上的,PLCC 的速率和服务质量还不稳定,没有达到高质量电信服务水准;三是技术上的,各国电力网差别较大,各电器插座规范也不尽相同,这给 PLCC 宽带接入的普及带来很大困难,因此需要在世界各国电力网中完善 PLCC 相关规范与技术;四是面对比较成熟光纤通信网用做骨干网的现实挑战,PLCC 还得寻求或另辟市场蹊径。

第2章 电子通信基本理论与技术

2.1 电子通信基本概念

通信即传递(或交换)信息。执行通信的全部设施称为通信系统。基本的通信系统包含5部分:信息源、发送设备、信道、接收设备、收信者,如图2-1所示。

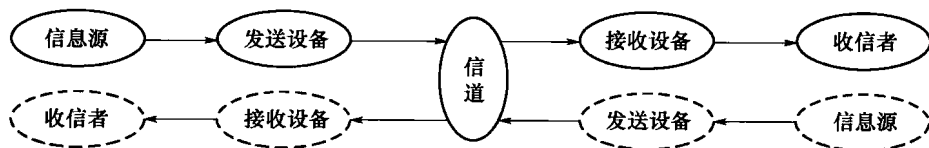


图 2-1 通信系统基本组成部分

信息源简称信源,其作用是把要传输的信息转换成电信号。发送设备的作用是将传输的电信号变换成适合于信道传输的信号。信道的作用是构成传输信号的通道。接收设备的作用是把从信道上接收的信号恢复还原成接收者能接收的信息。收信者(又称信宿)的作用是接收从信息源发送来的信息。通常将信息源和发送设备称为发送端,而将接收设备和接收者称为接收端。另外,在通信工作过程中,信道上存在噪声。

2.1.1 电子通信系统模型及组成

简言之,通信目的与任务就是传递信息。通信信息形式很多,如数据、文字、符号、图片、活动图像、语音和音乐等。因此,通信业务依据所传信息形式可分为电报、传真、数据传输、电话及可视电话等。广而言之,电视、广播、雷达、导航、遥测、遥控等也可视为通信业务。通信理论与工程技术中涉及的信号通常为电信号最多,电信号一般指随时间变化的电压或电流,也可以是电容电荷、线圈磁通和空间电磁波等。通信涉及的电信号分为模拟信号(也称连续信号)和数字信号(也称离散信号),因此,通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。

一、通信信道与噪声

通信信道,简而言之,即通信信号传输交流的通道。有用的通信信号在信道传输过程中存在干扰(或称无用信号),即噪声,因此,通信接收端将会同时接收到有用信号(简称信号)和无用信号(即噪声),因此,需要进行相应的处理。

(一) 通信信道

通信信道是通信信号传输的媒介,其可划分为有线信道和无线信道两大类。电子通信典型的有线信道有双绞线、对称电缆、同轴电缆、电力线等。而典型的无线信道有地波传播、天波传播、空间波(视距)传播、微波(无线电视距)中继、卫星中继、对流层散射、流星余迹散射等。然而,广义而论,通信信道除上述传输信号的媒介质以外,还可包括相关的变换装置,如信号发送设备、信号接收设备、调制器、解调器、馈线与天线等。因此,可将双绞线、对称电缆、同轴电缆、电力线等称为狭义信道;而将信号发送设备、信号接收设备、调制器、解调器、馈线与天线等称为广义信道。并且习惯上常称狭义信道为通信传输介质,称广义信道为通信信道(简称信道)。

1. 信道类型

如上所述,信道可以分为狭义信道和广义信道,即前者既可以是物理传输介质,也可以是物理存储介质,如有线信道、无线信道、光盘、磁盘等;后者是一种逻辑信道,它可分为调制信道和编码信道。调制信道又可以分

为恒参信道和变参信道,编码信道又可以分为无记忆编码信道和有记忆编码信道等。

1) 有线信道

一般的有线信道均可视为恒参信道。常见的有线信道有双绞线、电力线、对称电缆和同轴电缆等。如图 2-2 所示的平行而相互绝缘的架空线,其传输损耗较小,通频带为 0.3kHz~27kHz。对称电缆是在同一保护套内有许多对相互绝缘的双导线的电缆,其传输损耗比架空线大得多,通频带为 12kHz~250kHz。电缆芯线常常用一定的扭合方式,以防串音。普通的扭合方式有对式(图 2-3)、星式(图 2-4)和复对式(图 2-5)。对称电缆主要用于市话中继线路和用户线路,在许多局域网(如以太网和令牌网)中也采用高等级的非屏蔽电缆进行连接。屏蔽电缆的特性与非屏蔽电缆的特性相同,但对噪声有更好的抑制作用。双绞线上传输数字信号,数据率可达 1.5Mb/s,最高上限为 10Mb/s,采用特殊技术可达 100Mb/s。屏蔽线在 100m 内数据率可达 500Mb/s。同轴电缆由同轴的内外两个导体组成,外导体是一个圆柱形的空管,通常由金属丝编织而成;内导体是金属芯线。内外导体之间填充着介质(塑料或空气)。如图 2-6 所示,通常在一个较大保护套内安装若干根同轴线管芯,还装入一些二芯绞线或四芯线组用于传输控制信号,同轴线外导体接地,对外界干扰起屏蔽作用。同轴电缆分小同轴电缆中同轴电缆。小同轴电缆通频带为 60kHz~4100kHz,增音段长度约为 8km 和 4km;中同轴电缆能频带为 300kHz~60000kHz,增音段长度为 6km、4.5km 和 1.5km。

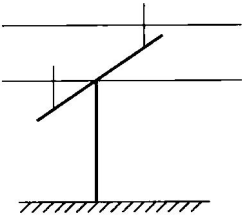


图 2-2 架空线



图 2-3 对式扭合



图 2-4 星式扭合

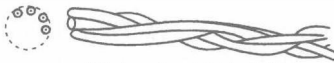


图 2-5 复对式扭合

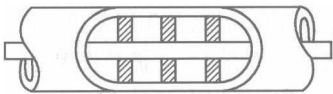


图 2-6 同轴电缆结构

以光纤为传输媒介并以光波为载波的光子通信信道,具有很宽的通频带,能够提供很大的传输容量。光纤的特点是损耗低、通频带宽、重量轻、不怕腐蚀以及不受电磁干扰等。由于光纤的物理性质非常稳定,因此光纤信道性质非常稳定,可以看做典型的恒参信道(详见第 3 章)。

2) 无线信道

无线信道利用电磁波在空间传播作用来传输通信信号。图 2-7~图 2-13 画出了现在常用的各种无线通信信道示意图。

(1) 地波传播无线信道:频率较低(2MHz 以下)的无线电波沿着地球表面传播称为地波传播,如图 2-7 所示,主要用于低频及其低频距离无线电导航、标准频率和时间信号广播、对潜通信等业务。其主要传播特点是:传输损耗小,作用距离远;受电离层扰动小,传播稳定;有较强穿透海水和土壤的能力;大气噪声电平高,工作频带窄。

(2) 天波传播无线信道:天波传播是经由电离层反射的一种传播方式,如图 2-8 所示。长波、中波和短波都可以利用天波通信。天波传播的主要优点是传输损耗小,因而可以利用较小的功率进行远距离通信,但由于电离层是一种随机的、色散及各向异性的有耗媒介质,电波在其中传播时会产生各种反应(如多径传输、衰落、极化面旋转等反应),有时还会因电离层暴变等异常情况造成短波通信中断,但近年来,高频自适应通信系统的使用大大提高了短波通信可靠性。因此,天波通信仍然是一种重要通信手段。

(3) 空间波传播(视距传播)无线信道:这是在发射天线和接收天线之间能相互“看见”的距离内,电波直接从发射点传到接收点(不排除地面反射存在)的一种传播方式,也称为直射波或空间波传播。接收/发天线所处的空间位置不同,传播大体上可以为 3 类:第一类是指地面上的空间波传播(如中继通信、电视、广播)以及地面上的移动通信等;第二类是指地面与空中目标(如飞机、通信卫星)之间的空间波传播;第三类是指空间飞行器之间的空间波传播(如宇宙飞行器间的电波传播等)。无论是地面上的或地对空的视距传播,其传播途径至

少有一部分是在对流层中,因此必然要受到对流层这一传输媒介质的影响。另外,当电波在低空大气层中传播时,还可能受到地表面自然或人为障碍物的影响,引起电波反射、散射或绕射现象。图 2-9 为地面上空间波传播示意图,地面移动通信就属于这种信道传播方式。

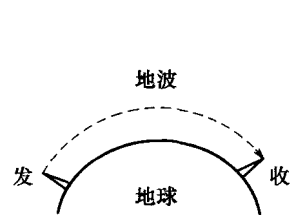


图 2-7 地波传播无线信道

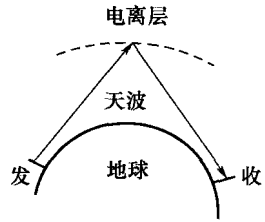


图 2-8 天波传播无线信道

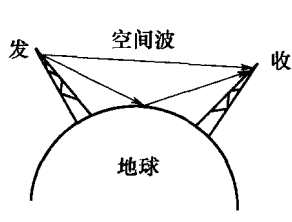


图 2-9 空间波传播无线信道

(4) 微波(无线电视距)中继无线信道:无线电视距中继通信工作在超短波和微波段,利用定向天线实现视距直线传播。由于直线视距一般为 $40\text{km} \sim 50\text{km}$,因此需要中继方式实现长距离通信,如图 2-10 所示,相邻中继站之间的距离为直接视距($40\text{km} \sim 20\text{km}$)。由于中继站之间采用定向天线实现点对点的传输,并且距离较短,因此传播比较稳定,一般可以视为恒参信道,这种系统具有传输容量大、发射功率小、通信稳定可靠等特点。

(5) 卫星中继无线信道:这是利用人造地球卫星作为中继站转发无线信号实现地球站之间的通信,如图 2-11 所示。当卫星运行轨道在赤道上空、距地面 35860km 时,其绕地球一周时间为 24h ,在地球上看到卫星是相对静止的,称为静止(或同步)卫星,利用它作为中继站可以实现地球上 18000km 范围内多点通信,利用 3 颗适当配置的这种卫星可以实现全球(南北极盲区除外)通信。同步卫星通信电磁波直线传播,大部分在真空状态自由空间传播,传播特性稳定可靠、传输距离远、容量大、覆盖地域广,广泛用于传输多路电话、电报、图像数据和电视节目,同步卫星中继信道可以视为恒参信道。近期发展起来的中、低轨道卫星通信,通常利用多颗卫星组成星座实现全球通信。由于卫星距地球较近,且相对于地球处于高速运动状态,传播条件相对要复杂一些。

(6) 对流层散射无线信道:其传播示意图如图 2-12 所示,发射天线射束和接收天线射束相交在对流层上层,两波束相交的空间为有效散射区域。对流层散射通信频率范围为 $100\text{MHz} \sim 4\text{GHz}$,可以达到的有效散射传播距离最大约为 600km 。对流层散射是由于大气不均匀性产生的,这种不均匀性可以产生电磁波散射现象,而且散射现象具有较强的方向性,散射能量主要集中在前方,故称“前向散射”。由于散射的随机性,这种信道属于变参信道。

(7) 流星余迹散射无线信道:这是由于流星经过大气层时产生很强的电离余迹使电磁波散射的现象,如图 2-13 所示。流星余迹高度约为 $80\text{km} \sim 120\text{km}$,余迹长度为 $15\text{km} \sim 40\text{km}$,散射频率范围为 $30\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$,传播距离在 1000km 以上。一条余迹留存时间在十分之几秒到几分钟之间,但空中随时都有大量肉眼看不见的流星余迹存在,能随时保证信号继续的通信,所以流星余迹散射通信只能用于低速存储和高速突发的断续方式传输数据。流星余迹散射信道属于变参信道。

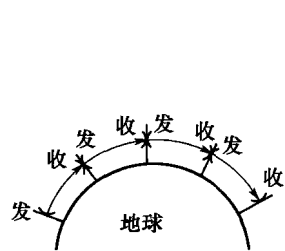


图 2-10 微波中继无线信道

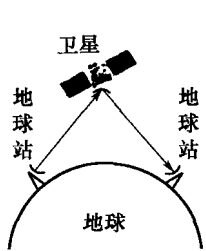


图 2-11 卫星中继无线信道

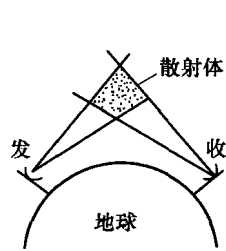


图 2-12 对流层散射无线信道

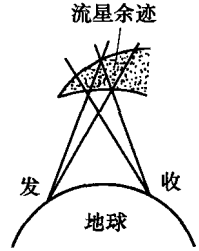


图 2-13 流星余迹散射无线信道

2. 信道模型

1) 恒参信道与变参信道

信道传输特性可用线性网络模型的传递函数表征。恒参信道模型的传递函数仅是角频率的函数,而与信号激励时间无关,即恒参信道可用一个非时变的线性网络来等效,如图 2-14 所示。恒参信道特点是其信道参数恒定或在较长观察时间内参数变化极其缓慢,有线信道是典型的恒参信道。变参信道网络模型的传递函数既是角频率的函数,又是信号激励时间的函数,即变参信道可用一个时变线性网络等效,如图 2-15 所示。

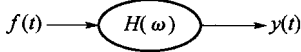


图 2-14 恒参信道模型

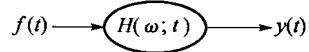


图 2-15 变参信道模型

需要指出,当信道具有多端输入和多端输出时,同理,可用多端网络模型来表征。

2) 调制信道与编码信道

基本调制信道有一对输入端和一对输出端。因为无论有无信号,信道中噪声总是存在的,故调制信道一般可以视为输出端上叠加有噪声的时变线性网络,若信道参量不会时变(恒参信道),则信道传输函数 $H(\omega, t)$ 则为 $H(\omega)$,其一般模型如图 2-16 所示,其中 $n(t)$ 代表信道噪声,此图中把信道内各处噪声集中用一个作用在输出端的噪声源表示。

数字通信中由于噪声和信道带宽有限,信号在传输中不可避免会出现差错。如果信道输入二进制数字信号,当输入“1”时,信道的输出可能因传输差错而变成“0”;反之亦然。因此,对编码信道而言,关键在于数字信号经信道传输后是否出现差错以及出现差错可能性的大小。编码信道的作用可用信道转移概率描述。图 2-17 为常见的二进制无记忆编码信道模型,此图中一组条件概率 $P(b/a)$ 的含义是当输入为 a 时输出为 b 的概率,其中 a, b 可取 1 和 0,这组条件概率描述了信道的基本统计特性,显然, $P(0/0)$ 和 $P(1/1)$ 为正确转移概率, $P(1/0)$ 和 $P(0/1)$ 为错误转移概率。同理,可以作出四进制无记忆编码信道模型,如图 2-18 所示。

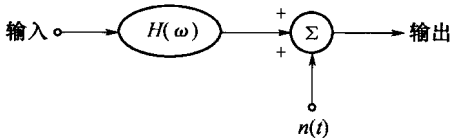


图 2-16 调制信道模型

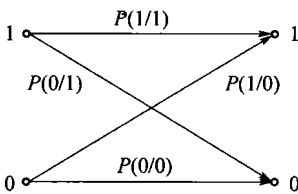


图 2-17 二进制无记忆编码信道模型

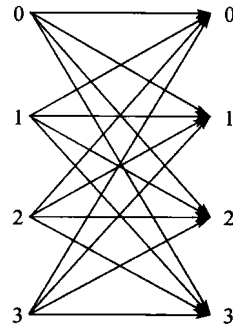


图 2-18 四进制无记忆编码信道模型

由于编码信道包括了调制信道和调制解调器,因此其性质主要取决于调制信道和调制解调器的性质。因为编码信道的输入信号就是编码器的输出信号,该输出信号即为解码(译码)器的输入信号,所以编码信道模型对于编译码理论与技术至关重要。

3. 信道特性及其对信号传输的影响

1) 恒参信道及其对信号传输的影响

恒参信道传递函数 $H(\omega)$ 的复变函数式为

$$H(\omega) = K(\omega)e^{j\theta(\omega)} \quad (2-1)$$

式中: $K(\omega)$ 为实变函数,是信道输出的幅频特性; $\theta(\omega)$ 为信道输出信号的相频特性。

在不考虑信道噪声的条件下,如果要求一个信号通过恒参信道后不产生任何失真,只允许一定的时间滞后,则恒参信道的传递函数应满足如下条件:

$$\begin{cases} K(\omega) = \text{常数} \\ \theta(\omega) = -\omega t_d \end{cases} \quad (2-2)$$

这也是理想信道所应具备的条件,其幅频特性在整个频率轴上保持水平线,即要求信道具有无限宽的通频带,如图 2-19 所示。而信道的相频特性在整个频率轴上为通过坐标原点且具有负斜率的直线,如图 2-20 所示。

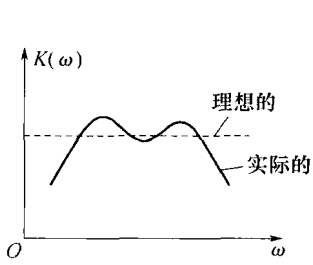


图 2-19 恒参信道输出信号幅频特性

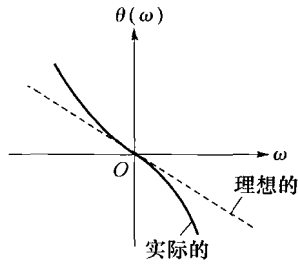


图 2-20 恒参信道输出信号相频特性

式(2-2)是信号无失真传输的条件,而实际信道往往不能满足此式要求,信号通过实际信道后,必然会产生某种程度的失真,但可限制在可接受的范围之内。通信一般传输是频带有限的信号,只要信道通频带比该信号带宽范围宽,且信道输出相频特性在该信号带宽频率范围内维持为直线,则对该信号而言,信道是理想的,能够无失真地传输该信号。信号通过实际信道后产生的失真称为频率失真,属于线性失真,其特点是合成信号波形各频率分量的振幅与相位关系发生变化,但并未产生新的频率成分。对数字信号而言,线性失真会造成数字信号波形展宽,容易产生码间串扰,增大数字通信的误码率。实际恒参信道的输出相频特性并非是一条通过原点的理想直线,这表明实际信道对不同频率的信号分量的延迟时间 t_d 不相等,即信道延迟时间 t_d 是随频率而变化的量。对相频函数 $\theta(\omega)$ 求导,可得延迟时间 $t_d(\omega)$ 的表达式为

$$t_d(\omega) = d\theta(\omega)/d\omega \quad (2-3)$$

式中: $t_d(\omega)$ 为信道的群延迟特性(简称群延迟),它表征以 ω 为中心无限窄频带内,群信号合成波通过信道的传输时间,即合成波包络的传输时间。因此,群延迟又称为包络延迟。如果信道是理想的, $t_d(\omega)$ 不随 ω 变化,则群延迟为一常数,信号在这种信道内传输就不会失真。实际恒参信道上述特性导致的不理想现象称为色散现象。此外,还存在非线性畸变、频率偏移、相位抖动和回波现象等。这些都会对数字信号的传输造成负面影响。

2) 变参信道及其对信号传输的影响

变参信道要比恒参信道复杂得多,因为变参信道的参数和传输媒介特性复杂,并且随时间变化。陆地移动通信是典型的变参信道,其电波传输环境很复杂。实际应用中的变参信道还有:短波电离层信道,超短波、微波对流层散射信道和超短波电离层散射信道等。

变参信道对通信信号传输的影响主要是:传输损耗(衰耗),即信号衰落和传输时延随时间变化而变化;并且还具有多径效应(多径传播)。变参信道主要以电离层反射和散射、对流层散射等方式工作,电离层反射传输示意图和对流层散射传输示意图分别如图 2-21 与图 2-22 所示,它们的共同特点是:由反射点出发的电波可能经多条路径到达接收点,这种现象称为多径传播。就每条路径信号而言,其衰耗和时延都是变化的,而且是随电离层或对流层的机理变化而变化。因此,多径传播后的接收信号是衰减和时延随时间变化的各路径信号的合成。设发射信号为 $A\cos\omega_c t$,则经过 n 条路径传播后的接收信号 $r(t)$ 可用下式表述:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos\omega_c [t - t_{di}(t)] = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos[\omega_c t + \varphi_i(t)] \quad (2-4)$$