



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 高速电力线通信系统 (PLC)和EMC

[日] 电气学会 高速电力线通信系统和EMC调查专门委员会 编

吴国良 译



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS





国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 高速电力线通信系统 (PLC)和EMC

[日] 电气学会 高速电力线通信系统和EMC调查专门委员会 编  
吴国良 译 王保国 校 李建岐 审

中国电力科学研究院专著出版基金资助



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是有关高速电力线通信系统 (PLC) 和电磁兼容 (EMC) 的论著, 作者从技术原理入手, 详细叙述了 PLC 的技术构成和测试方法, 介绍了日本以及世界各国在 PLC 方面所开展的工作, 同时较为系统地介绍了与高速 PLC 有关的国际标准化组织、活动及相关成果。

全书共分 7 章, 第 1 章概括性汇总了全书内容, 第 2 章叙述了 OFDM 和扩频等高速 PLC 的构成, 第 3 章解说了电力线平衡度和辐射电磁波等, 第 4 章介绍了日本在高速 PLC 实现方面开展的工作, 第 5 章介绍了国际高速 PLC 的技术发展与应用情况, 第 6 章介绍了与高速 PLC 有关的国际标准化组织、活动及相关成果, 第 7 章介绍了利用高速 PLC 的服务。本书对开发高速 PLC 系统的设计者提供了极为有益的信息, 还可对利用高速 PLC 开展各种服务的技术人员和研究人员提供参考。

本书可作为电力企业相关应用人员、PLC 产品制造商、施工单位相关通信技术人员、大专院校通信有关专业师生的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高速电力线通信系统 (PLC) 和 EMC / 日本电气学会  
高速电力线通信系统和 EMC 调查专门委员会编; 吴国良译.  
北京: 中国电力出版社, 2011.3  
ISBN 978-7-5123-1462-7

I. ①高… II. ①日… ②吴… III. ①电力线载波通信系统②电磁兼容性 IV. ①TM73②TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 032179 号

Original Japanese edition

Kousoku Denryokusen Tsushin System (PLC) to EMC

Edited by Denki Gakkai • Kousoku Denryokusen Tsushin System to EMC

Chousa Senmon Iinkai

Copyright © 2007 by Denki Gakkai

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese Language edition published by China Electric Power Press

Copyright © 2009.

All rights reserved.

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.75 印张 197 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

电力线的主要作用是向用电设备提供电能，同时还可构建传输信息的电力线通信（Power Line Communication, PLC）系统。PLC 系统早期用于电力网络的控制，后开发了可用于传输一般信息的通信系统。在家庭 PLC 系统中，是以家庭内部的电力线作为传输媒介，只要连接到电源插座上，就可同时提供电能和信息。由于 PLC 使用已有的电力线，因此不需要新敷设如 LAN 电缆那样的专用线路，也不像无线 LAN 那样使用电波。虽然该系统可如此简单构成，却有着用现有技术即可达到最大为 200Mbit/s 高的传输速率。

但是，电力线和电话线不同，电力线是一种总线配线方式，且在电力线上连接着各种各样的设备，这些设备的连接状态和运行状态不同，使得电力线的阻抗、传输损耗、噪声水平变化很大。在这种状态下，为了实现稳定的高速通信，与传统有线通信中使用的技术相比，需要采用 OFDM（正交频分复用技术）调制和扩频调制等技术。电力线和电话线的另一个不同点是电力线对地之间的平衡度差，故要将差模传输信号变换为共模传输信号，其辐射电磁波被发射的可能性就大。高速 PLC 所使用的频带为短波带，在该波段存在着短波广播、业余无线电、各种 SOS 信号等多种重要的无线通信系统。因此，开发出不对上述无线通信系统产生影响的降低辐射电磁波的技术极为重要。

为此，由日本总务省组织的“高速电力线载波通信研究会”于 2005 年 1 月末成立，同年 12 月提出了研究会的结论。接受该结论后，于 2006 年 2 月，在信息通信审议会信息通信技术分会 CISPR 委员会（总务省）中设置了高速电力线载波通信设备子分会，进行了技术标准研究。其后，在无线电波监理审议会上进行了关于制度整合的审议；同年 9 月，通过了允许高速 PLC 解禁的答辩，并在同年 10 月上旬公示。这样，高速 PLC 开始实用化，2006 年 12 月上旬，对应高速 PLC 模型的日本国产 1 号设备开始上市销售。

为了对应这样的背景，使读者能详细地了解有关高速 PLC 的全部情况，本书在第 2 章叙述了 OFDM 和扩频等高速 PLC 的构成，第 3 章解说了电力线平衡度和辐射电磁波等，第 4 章～第 7 章分别介绍了日本在高速 PLC 实现方面开展的工

作、国外高速 PLC 的情况、与高速 PLC 有关的国际标准化、利用高速 PLC 的服务。此外，为了使读者能在较短的时间内理解全书内容，本书在第 1 章概括性汇总了全书内容。因此，本书对开发高速 PLC 系统的设计者提供了极为有益的信息。还对有意利用高速 PLC 开展各种服务的技术人员和研究人员提供了参考信息。

最后，对给予书写本书机会的电气学会电磁环境技术委员会和给予帮助的出版委员会的各位表示感谢。

电气学会 高速电力线通信系统和 EMC 调查专门委员会

委员长 德田正满

2007 年 10 月

## 译者的话

本书由日本电气学会、高速电力线通信系统和 EMC 调查专门委员会委员长、武藏工业大学教授德田正满所著，2007 年 11 月出版。作者长期从事电力线载波通信研究，先后担任日本总务省“电力线载波通信设备研究会”会长代理、公听和实际环境试验 WG 组长、高速电力线通信推进协议会（PLC-J）特别会员。作者对电力线路的特征、阻抗特性、传输特性、噪声特性进行了详细分析；对 PLC 的实际应用进行了各种测试验证；对各种家电设备的静态模型、开关模型，以及线路的模型进行了深入研究；对电力线辐射电磁波的产生机理、测量方法和抑制技术进行了详尽描述；对最新的高速 PLC 技术进行了介绍；突出了高速 PLC 技术在楼宇、船用、智能家居等方面应用的独到优势；同时提供了大量的国际标准化组织以及研究内容、世界各国的应用情况等信息。

2008 年 10 月，国家电网公司启动电力用户用电信息采集系统建设项目，电力线载波通信（PLC）作为实现该项建设任务的关键技术，受到广泛关注。2009 年，国家电网公司提出了建设坚强智能电网战略，智能电网六大环节中最重要的部分的智能用电服务体系的建设，连接到用户、支撑双向互动服务的通信网建设成为其基础工作内容，PLC 技术因此受到高度重视。目前国内有一些介绍 PLC 技术原理的书藉和文章，但由于没有全面系统地从技术原理、测试方法、标准体系、应用现状、国际标准化组织、技术发展的最新动向等方面介绍和阐述该项技术的专著，加之目前在实现上还有一些技术瓶颈，对如何应用好此项技术存在一定的困惑。因此，本书能弥补充实国内在这方面的内容和不足，有助于我国 PLC 技术的发展和突破，对当前国家电网公司开展的电力用户用电信息采集系统和智能电网建设，能提供大量及时有益的信息，具有重要的学术参考价值和指导意义。

读者在阅读本书时，应注意在电力线辐射电磁波限制方面日本和欧美国家与中国的不同之处，日本有电波法、欧美国家也有相应的法律对电力线中不同频率载波的发射功率进行限制，而中国目前尚无这方面的法律限制。因而不难理解为什么书中要花大量的篇幅介绍电力线辐射电磁波以及高速 PLC 设备辐射电磁波的抑制技术。

本书由中国电力科学研究院李建岐主审。审稿过程中，李建岐高工严谨、细致地对全书内容以及用词认真斟酌、反复推敲、严格把关，提出了许多极为宝贵的意见，在此向李建岐高工表示衷心的感谢。在本书的翻译过程中，还得到了国家电网公司营销部、智能电网部和相关部门领导和专家的大力支持与帮助，在此一并表示感谢。

由于译者水平有限，错误和疏漏在所难免，恳请读者和各方面专家批评指正。

译者

2011年4月

# 目 录

前言  
译者的话

<b>第1章 高速 PLC 概述</b> .....	1
1.1 高速 PLC 的原理和优点 .....	1
1.2 高速 PLC 的技术课题 .....	2
1.3 高速 PLC 所使用的信号传输方式 .....	4
1.4 日本在实现高速 PLC 方面所作的工作 .....	7
1.5 日本在高速 PLC 辐射电磁波方面的技术标准 .....	10
1.6 国外高速 PLC 的应用情况 .....	14
1.7 有关高速 PLC 的国际标准 .....	16
参考文献 .....	19
<b>第2章 高速 PLC 的传输方式</b> .....	20
2.1 高速 PLC 的应用形式 .....	20
2.2 户内电力线的传输特性 .....	24
2.3 基于 FFT 的 OFDM 传输方式 .....	45
2.4 基于小波变换的 OFDM 传输方式 .....	50
2.5 扩频传输方式 .....	55
参考文献 .....	58
<b>第3章 电力线的平衡度和辐射电磁波</b> .....	60
3.1 电力线辐射电磁波产生机理 .....	60



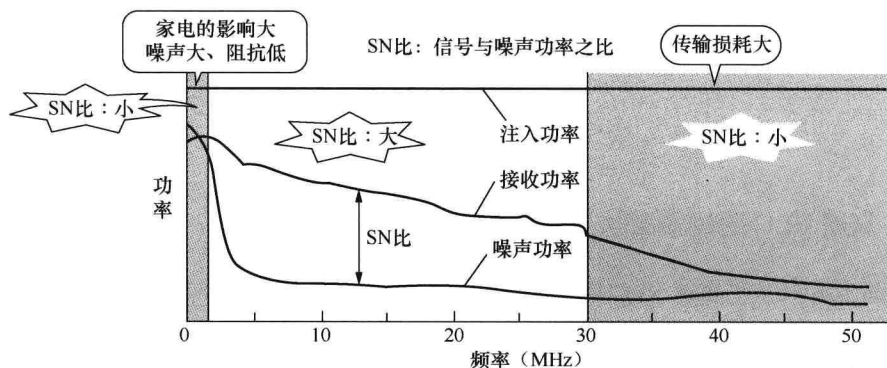
3.2	根据简化的电力线模型进行测量和计算 .....	62
3.3	室内电力线的 <i>LCL</i> 、共模阻抗等的实际调查 .....	71
3.4	高速 PLC 设备辐射电磁波的允许值和测量方法 .....	75
3.5	高速 PLC 设备辐射电磁波的抑制技术 .....	79
	参考文献 .....	88
<hr/>		
<b>第4章</b>	<b>日本实现高速 PLC 的进展情况 .....</b>	<b>89</b>
4.1	在日本的发展概况 .....	89
4.2	e-Japan 计划 .....	89
4.3	电力线载波通信设备开发组织 .....	90
4.4	总务省“电力线载波通信设备研究会”(2002年) .....	91
4.5	高速电力线载波通信推进协议会(PLC-J) .....	92
4.6	现场实验:说明各公司情况 .....	93
4.7	总务省“电力线载波通信设备研究会”(2005年) .....	95
4.8	信息通信审议会 CISPR 委员会 .....	99
4.9	电波监理审议会 .....	101
<hr/>		
<b>第5章</b>	<b>高速 PLC 的国外情况 .....</b>	<b>103</b>
5.1	美国高速 PLC 的发展动态 .....	103
5.2	澳大利亚宽带应用状况 .....	107
5.3	西班牙宽带应用状况 .....	109
5.4	英国宽带应用状况 .....	111
5.5	中国宽带应用状况 .....	112
5.6	韩国宽带应用状况 .....	114
	参考文献 .....	116
<hr/>		
<b>第6章</b>	<b>有关高速 PLC 的国际标准化 .....</b>	<b>117</b>
6.1	国际标准化概况 .....	117
6.2	HPA .....	117

6.3	OPERA	120
6.4	UPA	123
6.5	CEPCA	130
6.6	IEEE	133
6.7	CISPR	135
6.8	ITU-T (国际电信联盟—电信标准化局)	141
6.9	ITU-R (国际电信联盟—无线电通信局)	143
<b>第7章 利用高速 PLC 的服务</b>		<b>144</b>
7.1	关西电力公司的工作	144
7.2	东京电力公司的工作	149
7.3	三菱电机的工作	153
7.4	松下电器的工作	159
7.5	住友电工的工作	166
7.6	PLC 应用研究——电力线天线和大型货船内 LAN	168
<b>参考文献</b>		<b>176</b>

# 高速 PLC 概述

## 1.1 高速 PLC 的原理和优点

电力线主要用于向用电设备提供电能，同时还可以利用电力线构建传输信息的电力线通信（Power Line Communication, PLC）系统。PLC 系统原用于电力网络的控制，后来又开发了可用于传输一般信息的系统。图 1-1 示出了电力线通信中信号功率和噪声功率之间的关系。使用 450kHz 以下频率的 Echonet 系统是在电波法允许的范围<sup>[1]</sup>。可是，根据 CISPR 规范的规定，450kHz 以下的频率迄今为止还未在日本实施，由于存在电力线上噪声极高的问题，且不能进行高速传输，所以其实用化系统一直处于未被开发的状态。与此相对应，各国开发了使用 2~30MHz 短波频带的高速 PLC，因此要求在日本国内开展其应用的动向也开始活跃起来。由于在该频带，电力线传输干扰波由 CISPR<sup>①</sup>作出了规定，在日本也对于干扰波的产生量进行了规定，所以与 450kHz 以下频率相比，具有噪声电平小的特点。



① CISPR 是法语 Comite International Special des Perturbations Radioelectriques 的缩写，是指 IEC（国际电工委员会）的国际无线电干扰特别委员会（参照本书 6.7）。

图 1-2 示出了用于户内的高速 PLC 原理。以敷设在家庭内的电力线为传输媒介，只需连接到电源插座，即可同时提供电能和信息信号。图例中，用连接到光纤的 PLC 调制解调器，将信息信号叠加到电压为 100V 的电源设备上，再发送到电力线。在已连接到各房间的电源插座上的调制解调器中，用滤波器将电能和信息信号分离，提供给所连接的设备<sup>[2]</sup>。图 1-3 为高速 PLC 实际应用于 IT 的示意图。由于只需将插头插入电源插座，即可同时提供电能和信息信号，故是一种连老年人都都会使用的非常方便的接口。此外，由于不用对原有的电线进行任何改动即可使用，故可构成经济性很好的系统。因此，不仅在一般家庭，而且在已建好的公寓和学校等场所都存在能方便应用 IT 的可能性。虽然该系统可如此简单构成，却有着用现有技术即可达到最大为 200Mbit/s 高传输速率的优点。

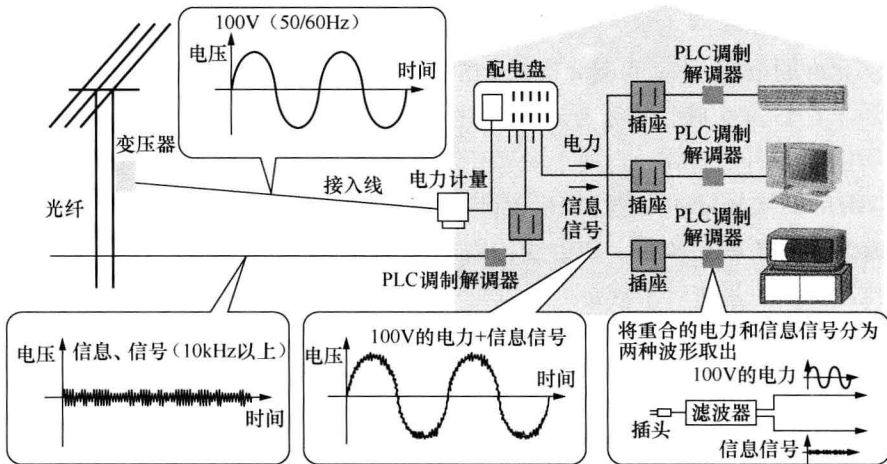


图 1-2 用于户内的高速 PLC 原理

## 1.2 高速 PLC 的技术课题

图 1-4 示出了高速 PLC 中的技术课题。电力线和电话线不同，电力线为总线配线方式，由于各种各样的设备连接在电力线上，根据设备连接状态和运行状态的不同，电力线的阻抗、传输损耗、噪声电平变化较大。在这种状态下，为了实现稳定的高速通信，与传统有线通信中使用的技术相比，需要采用正交频分复用技术（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）调制和扩频调制等在无线通信中所使用的技术。

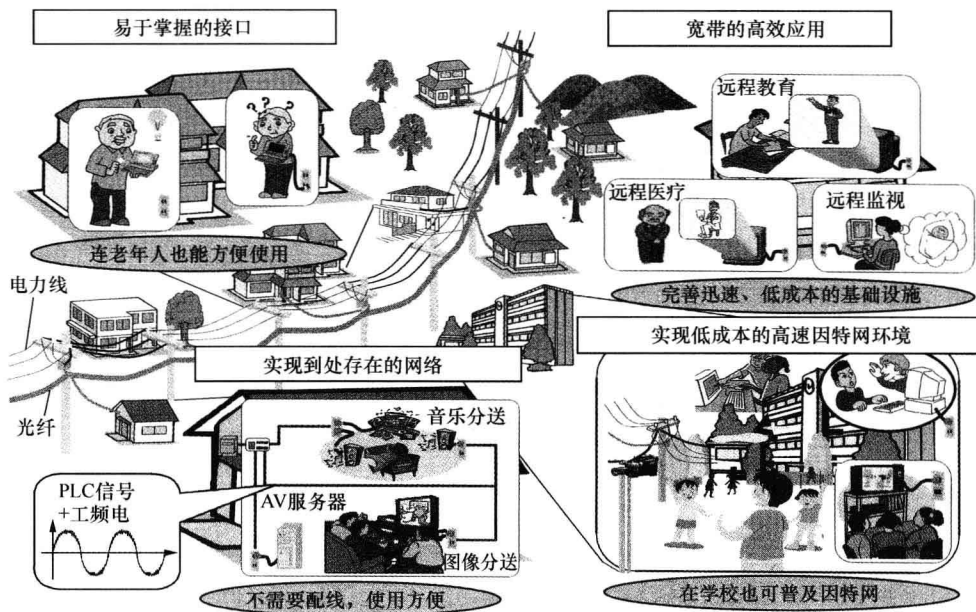


图 1-3 高速 PLC 实际应用于 IT 的示意图

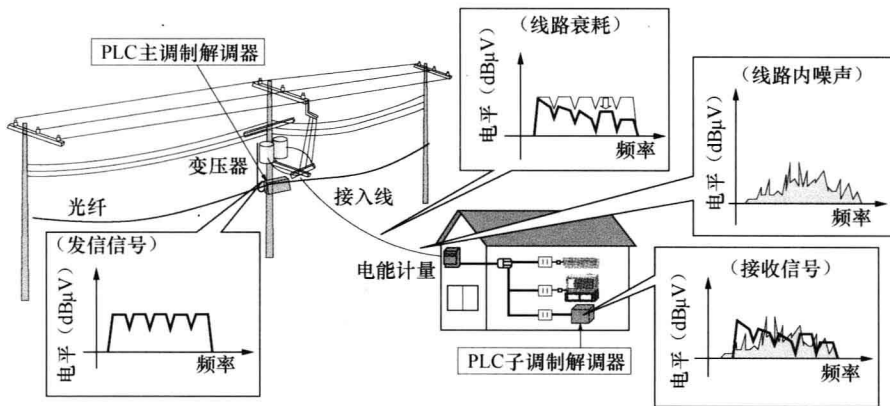


图 1-4 高速 PLC 中的技术课题

另外，电力线和电话线不同，电力线对地之间的平衡度差，故要将差模传输信号变换为共模传输信号，其辐射电磁波被发射的可能性就大。如图 1-5 所示，高速 PLC 所要使用的频带为短波带，而短波带是利用电离层反射传输到地球背面的特殊频带，在该波段存在着很多船舶、航空通信，短波广播、业余无线电、电波天文观测等重要的无线通信系统。因此，开发出不对上述无线通信系统产生影

响的低辐射电磁波技术极为重要。

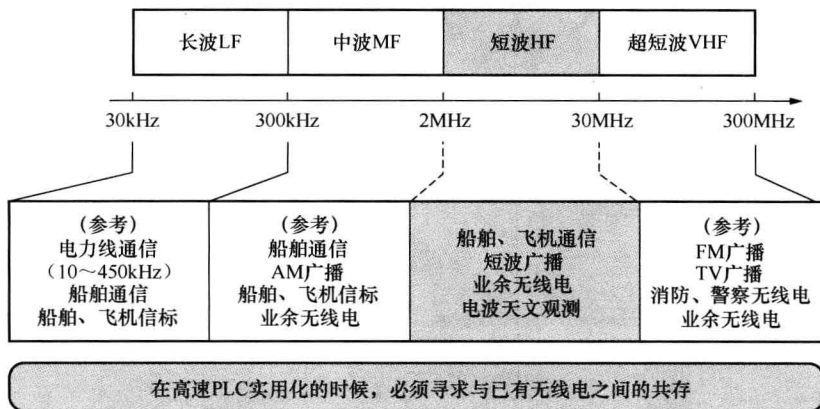


图 1-5 高速 PLC 的使用频带与现有无线设备的关系

### 1.3 高速 PLC 所使用的信号传输方式

#### 1.3.1 扩频传输方式

扩频传输是第 3 代移动电话所采用的方式，具有抗干扰能力强的特点。图 1-6 示出了扩频传输方式的基本构成。将经一次调制后的调幅（ASK）和调相（PSK）的信号，用模拟随机信号二次（扩频）调制，扩展到宽频带。在发信电路将扩频后的信号发送到电力线等传输媒介。发送传输媒介的扩频信号，在接收电路由模拟随机信号进行解扩，再通过与一次调制相反的解调恢复原始信号。即使在传输媒介上叠加了窄带的噪声，如图 1-6 所示，由于该噪声被解扩器扩展，故可不受噪声影响就能恢复原信号。

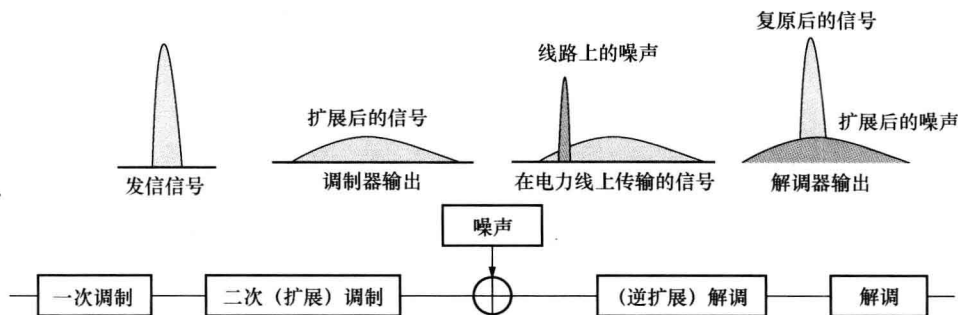


图 1-6 扩频传输方式的基本构成

如后述的表 1-3 所示，在电力线通信中，最初开发的高速 PLC 调制解调器也采用了扩频方式。但是，如下节所述，一旦 OFDM 技术的发展使高速的 PLC 得以实现，扩频技术就不太适用了。

### 1.3.2 OFDM 传输方式

OFDM 应用于数字 TV、无线 LAN、ADSL（非对称数字用户线路）等通信方式，作为一种能很好适用于多径传播的信道的有效方式，最近得到了关注。在 OFDM 调制方式中，将高速串行传输码变换为多个低速的并行比特流，调制多个载波并行传输。由多径引起的传播时间差造成的脉冲波形畸变，在高速传输中信号受该畸变的影响大；而低速信号受其影响小，仅限于脉冲波形的上升沿和下降沿部分。如果将该部分作为保护间隔除去，就可完全不受多径脉冲的影响。同一信息量如果用多载波传输，则比用单载波需要更宽的频带。如图 1-7 所示，在 OFDM 中，通过将多载波和频谱相互重叠那样配置，可将带宽的扩大控制在最小限度。通常情况下，若频谱重叠则相互干扰，但如果相邻频谱的中心频率能靠近某频谱的电平为零的频率处，这样配置的话，则这些频谱在频域相互正交，所以互不干涉。这样，在 OFDM 中，不需要增加太宽的频带，就可在多通道传输路径中实现有效的传输方式。在 OFDM 中，由于可单独设定各子载波调制方式和发送电平，故在来自高速 PLC 的辐射电磁波影响到其他系统时，可不使用有问题的子载波，或者可进行降低发送电平等的设定。另外，对设置在广播发射台附近的高速 PLC 系统，在受到特定频率的强干扰时，也可通过将其频率调制方式改为 BPSK 等抗干扰能力强的调制方式，或不使用该频率，经过这样的设置后，即可将接收干扰控制在最小限度。

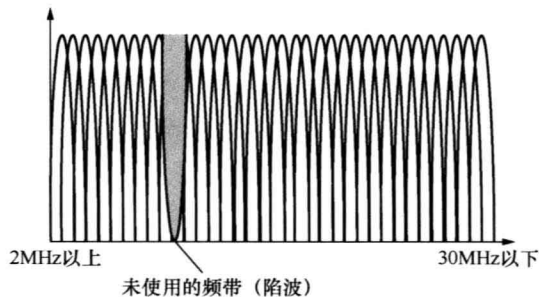


图 1-7 OFDM 的频率配置和陷波频带

如图 1-8 所示，原使用的 CP-OFDM 调制方式（Cyclic Prefix 型 OFDM）由于

单纯采用高速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 最大振幅的主瓣和第一副瓣之间的差为 13dB 左右。因此, 在设置多个 10dB 左右陷波的情况时, 就是效率极高的方式; 而在设置多个 30dB 左右深度陷波的情况时, 需要提取多个无用的子载波, 其频率利用效率极其恶化。

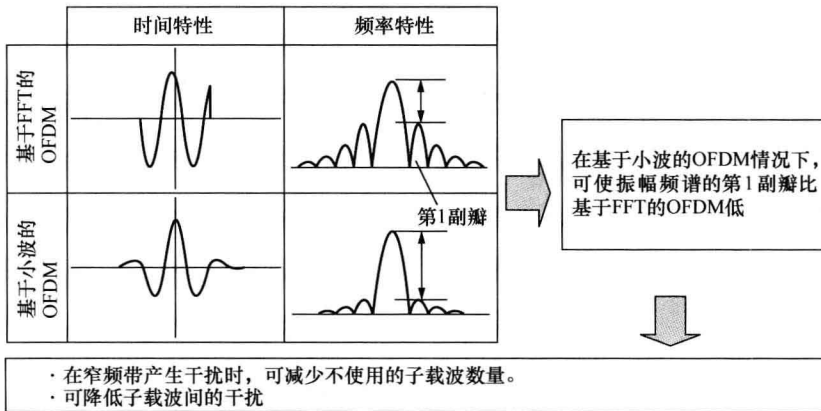


图 1-8 与 FFT 变换 OFDM 比较时的 Wavelet 变换 OFDM 的特征

在 Home Plug AV 中采用的 WD-OFDM (Windowed OFDM), 为其解决策略之一。在 WD-OFDM 中, 通过利用与基于 FFT 的时间波形有关的窗口函数, 实现 35dB 左右的副瓣。WD-OFDM 和 CP-OFDM 相比, 陷波时的频率效率极高, 但多少会产生一些随窗口函数处理时发生的时间轴上的无效时间 (可忽略不计)。

另外, 为了进一步提高传输效率, 不通过原基于 FFT 的频域正交传输的 OFDM, 而是通过时域和频域都能正交传输的 OFDM 来实现。其中一个例子就是小波变换 OFDM (Wavelet-OFDM)。小波变换 OFDM 的频谱如图 1-9 所示, 通过在时域中也采用确保正交性的小波变换, 实现 35dB 以上的副瓣。小波变换 OFDM 是不需要保护间隔的方式, 所以传输效率极高<sup>[3][4]</sup>。此外, 在 CEATEC 2006 中, 也发表了“在时域上用频域正交传输的奈奎斯特传输多重正交, 再将发信侧的副瓣降低到 40dB 的 LF-OFDM (Low Sidelobe OFDM)”这种方式。



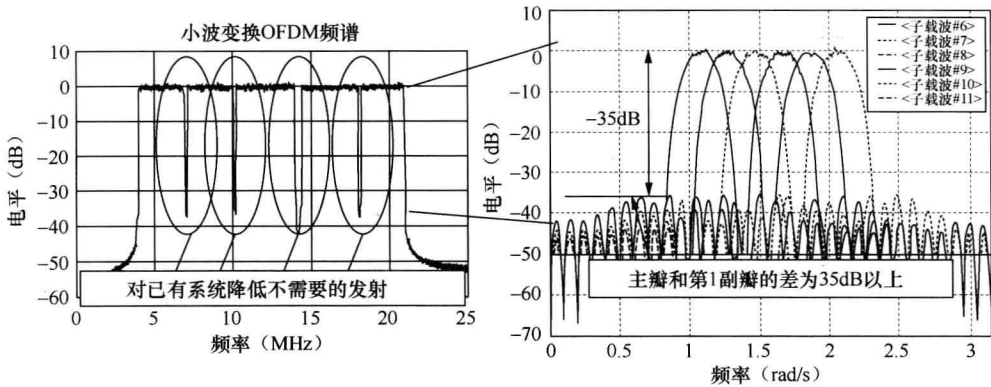


图 1-9 小波变换 OFDM 的频谱

## 1.4 日本在实现高速 PLC 方面所作的工作

高速 PLC 使用 2~30MHz 的短波带，但由于目前规定只允许使用 450kHz 以下的频率，故电波产业会（ARIB）从 2001 年 4 月就开始进行了如何放松管制的研究。在“e-Japan 重点计划 2002”中指出：“对于扩大电力线载波通信设备的使用频带（追加 2~30MHz），要对其对广播和其他无线业务有无影响进行调查，对其带宽利用的可能性进行研究，并要在 2002 年度中得出结论”。为此，日本总务省在 2002 年 4 月创立了“电力线载波通信设备研究会”[会长：衫浦行（东北大学教授）（时任）]，其组织结构如图 1-10 所示。该研究会设有公听和实际环境试验两个工作组，笔者以这两个工作组的组长身份参与策划了该研究会。2002 年 7 月末，该研究会得出的结论是：“①由于现有技术对已有无线设备会成为有害的干扰源，因此，扩大频带很困难。但是今后随着大幅度降低辐射电磁波技术的开发成功，要继续进行深入研究开发等。②为了促进研究开发，今后还要实施实际验证试验，为实现此目的，需要进一步完善制度（以研究开发为目的的设备许可制度）”。

总务省接受上述研究会的结论，以尽早实现日本国内高速 PLC 商业化为目标，2003 年 3 月，设立了高速电力线通信推进协议会（PLC-J），其概况如图 1-11 所示。在 A 会员中，带下划线的 10 个公司为最先开始的公司。笔者也作为特别会员，从一开始就参加了该组织。PLC-J 积极推动总务省工作的结果是修改了电波法，使以研究开发为目的的实际验证试验成为可能，并于 2004 年 1 月在官方