

国防电子信息技术丛书

穿墙雷达成像

Through-The-Wall Radar Imaging

[美] Moeness G. Amin 主编

朱国富 陆必应 金 添 范崇祎 等译

周智敏 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

译者序

在城市作战、反恐维稳和灾后救援中，都面临着对建筑物或障碍物后隐蔽目标探测的难题。与其他穿透技术相比，穿墙成像雷达由于其良好的穿透能力和高分辨成像能力，成为当前的研究热点。但是由于工作环境的复杂性，穿墙成像雷达具有很大的技术挑战，涉及信号处理、阵列设计和成像算法等很多方面。因此，一本全面介绍穿墙成像雷达技术的专业书籍是非常必要的。

Moeness G. Amin 博士主编的《穿墙雷达成像》，是第一本关于穿墙雷达技术的书籍。Moeness G. Amin 博士和本书的其他作者，都是穿墙雷达领域的知名专家，他们将自己多年的研究心得倾注在本书中。第 1 章分析了墙的衰减和色散。第 2 章研究了天线的阵元设计和阵列配置。第 3 章讨论了波束形成技术。第 4 章描述了使用并列和分布孔径的墙后目标成像和定位技术。第 5 章讨论了适用于墙后目标检测和成像的波形。第 6 章介绍了穿墙成像中的逆散射方法。第 7 章讨论了微波穿墙建筑物层析成像技术。第 8 章介绍了穿墙雷达成像的射线追踪方法。第 9 章讨论了穿墙成像中的 SAR 技术。第 10 章描述了冲激 SAR 及其在穿墙人员和武器检测与识别中的应用。第 11 章介绍了基于属性散射中心特征的穿墙 SAR 建筑物内部结构描述方法。第 12 章讨论了穿墙雷达成像中的检测方法。第 13 章介绍了穿墙成像中的隐蔽目标检测方法。第 14 章研究了穿墙成像中的快速采集和压缩感知技术。第 15 章介绍了人体运动的雷达微多普勒特征。可见，本书 15 章的内容全面涵盖了穿墙成像雷达所涉及的所有重要方面，不仅有建模和算法，还有系统设计和实验验证，非常适合学生、学者和工程技术人员的使用。

本书由国防科学技术大学的几位老师翻译，其中第 1 章，第 2 章，第 5 章至第 7 章由陆必应博士和范崇祜博士负责翻译，第 3 章，第 4 章，第 8 章，第 9 章以及第 11 章由金添博士负责翻译，第 10 章，第 12 章至第 15 章和前言等由朱国富博士负责翻译，全书由周智敏教授审校。参加本书翻译的还有贺峰，杨俊刚，陈波，胡俊，孙鑫，王翰宁，原振龙，李志，张澜子和赵洋等研究生，在此一并感谢。还要感谢电子工业出版的编辑对我们工作的大力支持。对于本书翻译中的错误和不当之处，敬请指正。

目 录

第 1 章 墙体衰减与色散	1
1.1 引言.....	1
1.2 材质的介电性.....	3
1.2.1 材料的色散.....	6
1.2.2 典型墙体的电特性.....	7
1.3 穿墙中衰减和色散的测量技术.....	7
1.3.1 时域技术.....	7
1.3.2 频域技术.....	8
1.4 结构特性与时间选通.....	10
1.4.1 单次穿透技术.....	10
1.4.2 多次穿透技术.....	11
1.5 从材料参数至穿墙传播模型.....	12
1.6 近期研究和发展.....	14
1.6.1 墙体模型.....	15
1.6.2 穿墙传播的仿真.....	15
1.6.3 穿墙传播的测量.....	16
1.7 现有的系统、应用和研究方向.....	16
1.8 小结.....	17
参考文献.....	17
第 2 章 穿墙成像雷达天线单元, 阵列和系统	22
2.1 引言.....	22
2.2 TWRI 系统设计注意事项.....	22
2.2.1 墙体参数、传播模型和损耗.....	22
2.2.2 链路预算和系统功率考虑.....	26
2.3 阵列拓扑、带宽和超宽带天线.....	28
2.3.1 TWRI 阵列拓扑结构.....	28
2.3.2 宽带微带型天线单元.....	31
2.3.3 超宽带天线.....	35
2.4 TWRI 天线阵列开发实例.....	40
2.4.1 应用于便携式 TWRI 系统的印制宽带阵列的开发.....	40
2.4.2 用于 TWRI 系统的维瓦尔第阵列的开发.....	44
2.4.3 TWRI 系统中维瓦尔第子阵列的实现.....	46
致谢.....	49
参考文献.....	49
第 3 章 用于穿墙雷达成像的波束形成技术	54
3.1 引言.....	54

3.2	点扩展函数	55
3.2.1	分辨率	58
3.2.2	旁瓣	58
3.2.3	栅瓣	59
3.3	墙体对波束形成的影响	61
3.3.1	均匀墙体	61
3.3.2	非均匀墙体	65
3.4	波束形成阵列的实现	68
3.4.1	阵元功能	68
3.4.2	波束形成方式	68
3.4.3	阵列配置	69
3.5	波束形成算法	70
3.5.1	后向投影	70
3.5.2	直接频域成像算法	71
3.5.3	ω - κ 算法	71
3.5.4	Capon 波束形成器	72
3.5.5	计算效率对比	75
	参考文献	76
第 4 章	基于密布和分布孔径的墙后目标成像与定位	78
4.1	引言	78
4.2	雷达成像	79
4.2.1	相参雷达成像	79
4.2.2	同时发射正交波形	80
4.2.3	考虑墙体	81
4.2.4	非相参雷达成像	81
4.2.5	步进频方法	82
4.3	实际成像系统的性能限制	82
4.3.1	系统设计对成像系统性能的影响	82
4.3.2	用于目标定位的成像方法	85
4.3.3	分布式孔径系统	87
4.4	目标距离估计与定位	88
4.4.1	基于 DOA 和距离信息的目标定位	88
4.4.2	三边测量目标定位	89
4.4.3	距离估计	90
4.5	用于运动目标定位的时频分析	92
4.5.1	时频表示	92
4.5.2	基于 STFT 相位信息的距离估计	93
4.5.3	基于双线性时频分布相位信息的距离估计	93
4.5.4	基于多普勒特征的距离估计	94
4.5.5	例子	94

4.6	利用双频合成孔径雷达定位无生命的运动目标	97
4.7	小结	97
	参考文献	97
第5章	应用于穿墙探测与成像的传统及新兴波形	100
5.1	引言	100
5.2	传统雷达波形	100
5.2.1	窄脉冲波形	100
5.2.2	调频波形	101
5.2.3	M 序列相位编码波形	102
5.2.4	噪声波形	103
5.2.5	超宽带波形	104
5.2.6	传统波形结果	104
5.3	探测环境对电磁波传播的影响	107
5.3.1	对场景分辨率、天线尺寸与工作频率的分析	108
5.4	穿墙雷达波形设计	109
5.4.1	匹配照射波形	109
5.4.2	混沌波形	113
5.4.3	正交频分多址 (OFDM) 波形	114
5.5	小结	116
	参考文献	116
第6章	穿墙成像的逆散射方法	119
6.1	引言	119
6.2	墙体的类型及介电和散射特性	119
6.2.1	均匀墙体	120
6.2.2	非均匀墙体	120
6.2.3	均匀墙体参数估计	122
6.3	自由空间传播模型下的穿墙成像	122
6.3.1	墙体对雷达回波和目标成像的影响	122
6.3.2	实际建筑物场景中的成像退化	125
6.4	TWRI 逆散射方法	127
6.4.1	逆散射的数学表达	127
6.4.2	线性化 Born 模型	128
6.4.3	作为线性逆散射问题的 TWRI	129
6.5	雷达重聚焦增强的穿墙成像	133
6.5.1	墙体补偿的雷达回波和目标图像增强	133
6.5.2	灵敏度分析	134
6.6	运动目标检测和定位	136
	参考文献	138
第7章	穿墙建筑物微波层析技术	140
7.1	引言	140

7.1.1	章节安排	141
7.2	几何光学: 起始期、生命期和结束期	141
7.2.1	射线起始期: 发射天线特性	142
7.2.2	射线生命期: 传播与“繁衍”	144
7.2.3	射线衰亡期: 接收天线特性	145
7.3	射线的衍射	146
7.3.1	紧凑障碍物衍射	146
7.3.2	边界衍射	147
7.3.3	什么时候衍射变得重要	148
7.3.4	半阴影普遍性以及波前复原	149
7.4	射线与理想墙体的相互作用	151
7.5	布拉格散射和墙体波导共振	154
7.5.1	Bloch 定理: 周期结构散射的普遍特点	154
7.5.2	布拉格衍射和射线理论	156
7.5.3	波导模式以及长时间拖尾	157
7.5.4	分层墙体中的钢筋: 精确解	158
7.6	数值实现的一些思考	161
7.7	数值结果	162
7.7.1	深度限制: 一些敏感性试验	165
7.7.2	实际建筑物数据的例子	167
7.8	多径效应限制与衍射层析	169
7.9	小结	169
	致谢	170
	参考文献	170
第 8 章	用于穿墙雷达成像的解析射线追踪方法	172
8.1	引言	172
8.2	用于建筑物的射线方法	173
8.2.1	简介	173
8.2.2	UTD 概述	173
8.2.3	透射场和反射场	174
8.2.4	绕射场	174
8.2.5	高阶项	177
8.3	墙体建模	178
8.3.1	常见的多层钢筋墙体	178
8.3.2	周期介质墙	185
8.3.3	周期介电墙的等效均匀介质模型	187
8.4	在成像中的应用	189
8.4.1	穿墙成像算法	189
8.4.2	一个建筑物的简单例子	190
8.4.3	成像中的墙体消除	192

8.5	小结	194
	致谢	194
	参考文献	195
第9章	穿墙成像的合成孔径雷达技术	198
9.1	引言	198
9.2	电磁建模技术	199
9.3	人体的雷达特征信号	199
9.4	SAR 成像算法	202
9.5	简单房间的 SAR 图像	204
9.5.1	模型描述	204
9.5.2	简单房间中的人	205
9.5.3	煤渣空心砖墙房间和成像参数的折中考虑	207
9.5.4	用于条带 SAR 的后向投影算法	209
9.5.5	TWRI 中的极化技术	211
9.5.6	伪像分析	212
9.6	复杂房间的 SAR 图像	213
9.6.1	模型描述	213
9.6.2	仿真地面平台的 SAR 成像	214
9.6.3	仿真机载平台的 SAR 成像	216
9.7	雷达实测的 SAR 图像	217
9.8	消除墙体的成像技术	219
9.9	三维 SAR 成像	219
9.10	小结	220
	参考文献	221
第10章	冲激合成孔径雷达及其在穿墙检测和识别人与武器中的应用	224
10.1	简介	224
10.2	冲激合成孔径雷达基础	225
10.2.1	脉冲发生器	225
10.2.2	天线	227
10.2.3	平台	228
10.2.4	性能预测工具和系统设计注意事项	229
10.2.5	信号处理	232
10.3	ImpSAR 穿墙目标检测和识别	236
10.3.1	现象学	236
10.3.2	去墙	236
10.3.3	举例说明	237
10.3.4	ImpSAR 图像目标检测	239
10.4	三维立体 ImpSAR	242
10.5	小结	243
	致谢	244
	参考文献	244

第 11 章	基于属性散射中心特征的穿墙合成孔径雷达的建筑物内部结构描述	246
11.1	引言	246
11.1.1	雷达测量设备	246
11.2	SAR 标准散射模型	247
11.3	穿墙特征提取	250
11.3.1	子孔径成像	251
11.3.2	高度向处理	252
11.3.3	非参数反卷积	258
11.3.4	散射基元检测和最大似然参数估计	260
11.4	例子	261
11.5	小结	263
11.6	下一步工作	264
	致谢	264
	参考文献	264
第 12 章	穿墙成像雷达检测方法	268
12.1	引言	268
12.2	单视和多视图像的集中式检测	268
12.2.1	单视和多视成像	268
12.2.2	一个简单的门限检测方案	270
12.2.3	奈曼-皮尔逊检验	271
12.3	穿墙雷达图像的统计特性	271
12.3.1	成像	272
12.3.2	经验统计特性研究	272
12.3.3	墙体影响	276
12.4	穿墙雷达成像中的自适应检测	276
12.5	多视成像的分布式检测	279
12.6	实验结果	281
12.6.1	单视成像	281
12.6.2	多视成像	284
12.6.3	分布式检测	286
12.6.4	三维成像	287
12.7	小结	289
	致谢	289
	参考文献	289
第 13 章	穿墙雷达图像中的隐蔽目标检测	292
13.1	引言	292
13.2	隐蔽目标成像方法的特征	293
13.3	线性采样方法	294
13.4	LSM 方法的适用性	296
13.5	基于 LSM 方法的墙内成像	296

13.5.1	成像流程概述	297
13.6	概念验证的数值仿真	299
13.6.1	关于测量配置的几点考虑	300
13.6.2	成像过程的结果	300
13.7	小结	303
	致谢	304
	参考文献	304
第 14 章	穿墙雷达成像的快速录取与压缩感知技术	306
14.1	引言	306
14.2	方法 1: 使用少量数据的步进频率波束形成	307
14.3	方法 2: 压缩感知	310
14.3.1	TWRI 中的步进频率压缩感知	312
14.3.2	压缩感知成像	312
14.3.3	应用 CS 进行数据恢复	314
14.3.4	仿真	315
14.4	TWRI 时域脉冲压缩感知	319
14.4.1	问题陈述	319
14.4.2	压缩感知的应用	320
14.4.3	仿真	321
14.5	小结	323
	参考文献	323
第 15 章	运动人体目标的雷达微多普勒特征	326
15.1	引言	326
15.1.1	多普勒效应	326
15.1.2	雷达观测中的微多普勒效应	327
15.1.3	微多普勒处理、估计与分析	327
15.1.4	单站、双站及多站微多普勒特征	328
15.2	由微动力学引起的微多普勒的基本原理	331
15.2.1	目标运动的微多普勒特征	332
15.2.2	人体不同活动的雷达散射	336
15.2.3	人体运动的微多普勒特征分析	337
15.2.4	从微多普勒特征中恢复运动信息	338
15.2.5	人的心跳的微多普勒分析	339
15.3	多站微多普勒特征	340
15.3.1	多站微多普勒特征的优点	340
15.3.2	人体运动的多站微多普勒特征	340
15.4	利用微多普勒特征的目标分类	344
15.5	运动目标检测	345
	参考文献	346

第 1 章 墙体衰减与色散

Ali Hussein Muqaibel, M. A. Alsunaidi,
Nuruddeen Mohammed Iya, Ahmad Safaai-Jazi

1.1 引言

电磁波通过媒介时会发生幅度和相位畸变。这些畸变分属于媒介传播中的衰减和色散特性。迫切需要对这些削弱影响进行理解和建模,以便寻找更好的方法消除它们。在穿墙成像中,最终的目标就是利用这些色散和衰减模型来研究检测、分类和墙后目标定位的算法。这又反过来要求必须对传播、散射等相关的电磁影响进行精确建模,寻求设计可靠的解决方法。忽略传播影响将限制我们感知数据的广度,降低分辨率,并降低对所获精确结果的有效理解程度。成像架构必须要包含物理传播影响和环境的建模,只有这样系统才能在建筑物中“看得更远”。

传播路径障碍是指某一电磁波路径下,当人工或自然界的物体靠得足够近时,会引起反射影响之外的一个可测量的路径损失影响^[TIA]。材质的电特性可用于补偿这些障碍,对穿墙无线电通信的设计、建模及成像具有重要意义^[Hua96]。因此,研究这些介质的电磁特性对检验穿墙检测和成像问题以及探索期望的解决方法具有极为重要的意义。除了墙体材质,墙的形状和组成成分也会影响传播效应。另外墙体内部的多次反射也会造成影响,尤其当墙体非均匀时,这一影响会变得更显著。障碍物的介电常数以及它们的厚度会造成传播路径的不同延时。

信号路径穿过物体厚度的传输时间对高精度的延时测量而言是很关键的。为了评估延时、幅度和脉冲形状的影响,将不同的介质放在发射至接收天线的路径上。首先,进行自由空间的测量,接着插入介质板,获取穿透信号(参见图 1.1)。这里给了三个例子阐述墙体对信号延时的影响以及相应的成像能力(其他例子,读者可以参阅参考文献[Muq05])。第一个例子中,采用典型的夹板,其可看做相对同质的材料。夹板的厚度为 1.52 cm。第二个例子中,采用具有空气孔的混凝土方砖。混凝土方砖组成的墙厚度为 19.45 cm。第三个例子中,墙体由 8.72 cm 厚的砖砌成。图 1.2 给出了这三种情况下自由空间和存在墙体的测量结果。根据发射天线的性能,接收信号波形与发射脉冲的微分有关。图中还标注了阻尼振铃效应和多径分量。图 1.2 中的第二个峰值是地面的反射。

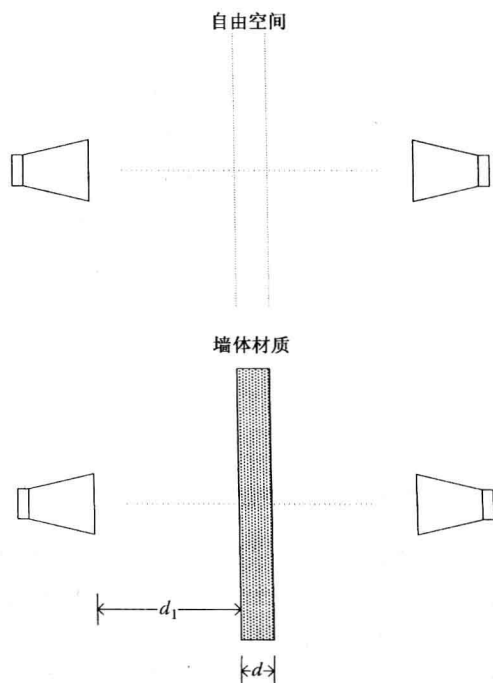


图 1.1 传输测量——“自由空间”(没有介质)和“穿透”(存在介质)

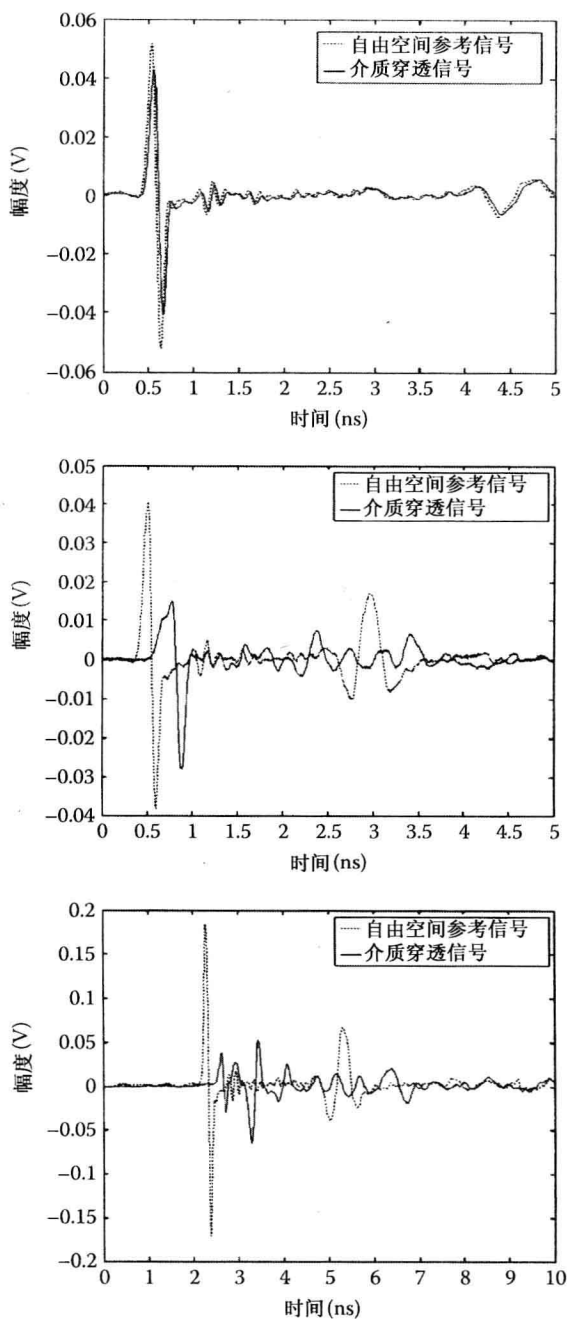


图 1.2 自由空间和三种不同墙体下的穿墙测量结果：木板(上)，砖(中)，混凝土(下)

当处理厚墙或是衰减较大的材质，例如钢筋混凝土时，反射、吸收会引起较高的传输损耗，导致面临较大的挑战。由于噪声的存在和测量设备有限的动态范围，微弱信号不能被精确测量。这种影响如图 1.3 所示，穿透后的信号被放大了 10 倍。在典型的成像应用中，发射和接收天线位于墙体的同一侧，这个问题会更严重。因为这需要信号穿透墙体两次，如图 1.4 所示。

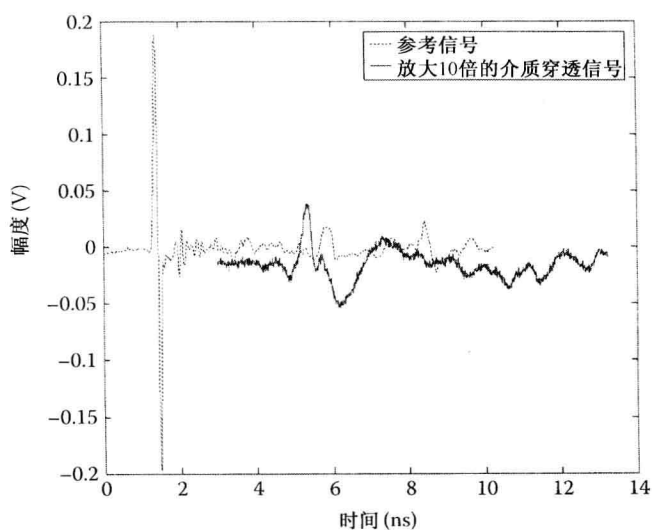


图 1.3 自由空间下的参考信号和钢筋混凝土下的信号参考

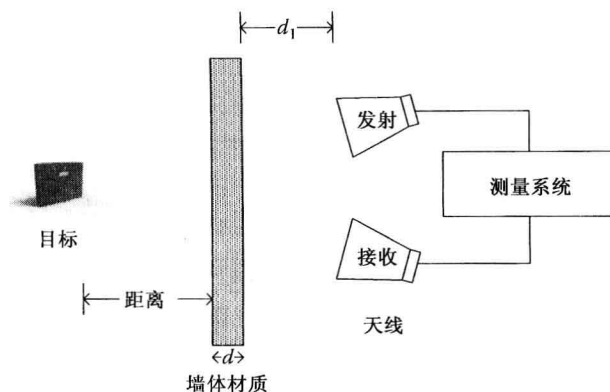


图 1.4 需要传播两次的穿墙成像

另一个重要挑战与墙壁入射角或到发射/接收天线的入射波角度有关。而且，在实际情形中，耦合效应、天线方向图、输入阻抗和发射/接收天线的极化也是必须考虑的重要因素。当采用全向天线时，会产生更严重的多径问题，其难度一定会比指向性天线大得多。

在后续小节中，我们将引入墙体材质的电介性，并用来分析衰减和色散影响。材质的电介性将在 1.2 节进行基本介绍。在 1.3 节，主要讨论信号穿墙传播中衰减和色散的测量技术。结构特性和时间选通将在 1.4 节进行验证，而 1.5 节将给出介质特性和墙体模型的联系。本章小结将综合近期的学术研究，旨在让读者深入洞悉研究方向和应用领域。

1.2 材质的电介性

电磁波穿墙的传播特性很大程度上取决于组成墙体的材料类型。通常情况下，墙体由自然界一些无磁性的绝缘材料组成，这些材质在磁场中没有响应。然而，当这类材质遭遇电场时，它们的分子结构中会产生大量的电偶极子。这些偶极子沿外部电场 E 的方向排列。在正

电荷和负电荷区域局部移动的累积效应称为极化 P 。它对应了材质的内部引起势能存储的压力。当外部电场消失时,这些能量便会释放出来。材质被极化或被外场“驱使”的能力取决于其分子结构。在墙体介质内部,电场线密度(如电流密度 D)会因极化得到增强,也就是

$$D = D_0 + P \quad (1.1)$$

式中, D_0 是自由空间下的电流密度。介质内部的场线数目与介质外部自由空间的场线数目比值称为绝缘系数或者相对介电常数。

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} \quad (1.2)$$

因此,介电常数是对材质内存储能量能力的度量。介电常数 ε 等于自由空间下 ε_0 乘以相对介电常数。表 1.1 列出了几种典型墙体材质的低频(基本静止)相对介电常数。

表 1.1 典型墙体材质的相对介电常数与损耗因子

材 质	相对介电常数	损 耗 因 子
树脂玻璃	3.4	4×10^{-2}
尼龙	3.8	2×10^{-2}
玻璃	4~9	1×10^{-3}
纸	3	8×10^{-3}
木头	1.2~4.5	1×10^{-2}
瓷	6	14×10^{-3}
混凝土	5~7(随含水量变化)	$1 \sim 7 \times 10^{-1}$

外部场的时变特性对材料的极化和介电常数具有很大影响。这种影响转化成依赖频率的变化,引起电导率的持续变化。材质对频率的依赖会引起色散现象,这一现象将在本节后进行讨论。为了研究材质电特性的时变影响,习惯上采用谐振模型或经典的质点弹簧系统来表示电偶极子。其他更精细的模型还可以包含一个以上的特性,特别是针对生物材料,假设移动量为 l 的电偶极子电荷为 q , 质量为 m , 其角频率 ω 下的时域谐振电场响应可由下面的微分方程表示为^[Ba189]

$$m \frac{\partial^2 l}{\partial t^2} + k \frac{\partial l}{\partial t} + sl = qE_0 e^{j\omega t} \quad (1.3)$$

式中, k 是阻尼系数(摩擦); s 是张力参数(振铃); E_0 是施加的电场幅度。

式(1.3)中,利用式 $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$, 易求得稳态下的偏移量 l 。其表达式为

$$l(t) = \frac{qE_0 e^{j\omega t}}{\left(\frac{s}{m} - \omega^2\right) + j\omega \left(\frac{k}{m}\right)} \quad (1.4)$$

极化值取决于材质单位体积内 N 个类似的电偶极子,其公式如下

$$p = Nql(t) \quad (1.5)$$

因此,相对介电常数为

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{Nq^2}{\varepsilon_0 m \left[\left(\frac{s}{m} - \omega^2\right) + j\omega \left(\frac{k}{m}\right)\right]} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (1.6)$$

上式一般为复数, ε_r 的实部与虚部对应值为

$$\varepsilon_r' = 1 + \frac{Nq^2 \left(\frac{s}{m} - \omega^2 \right)}{\varepsilon_0 m \left[\left(\frac{s}{m} - \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega k}{m} \right)^2 \right]} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{Nq^2 \left(\frac{\omega k}{m} \right)}{\varepsilon_0 m \left[\left(\frac{s}{m} - \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega k}{m} \right)^2 \right]} \quad (1.8)$$

相对介电常数的实部说明了材质存储能量的能力, 而它的虚部引起电导率的持续变化。因此, 材质的有效电导率可表示为

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a = \sigma_s + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \quad (1.9)$$

式中 σ_s 为静态电导率(有时也被称为直流电导率), 对应电介质材料内部的欧姆损耗; 对良性电导体, 其数值很小。由于偶极子振荡, 交流场电导率 σ_a 会对电介质材料加热。两种能量的比值, 即电导率引起的存储(偏移)能量与损耗能量的比值称为损耗因子。考虑到交流变化, 损耗因子 $\tan \delta$ 可表示为

$$\tan \delta = \frac{\sigma_s + \sigma_a}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'} = \frac{\sigma_s}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'} + \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (1.10)$$

表 1.1 列出了几种特定墙体材料的损耗因子典型值。确定墙体电特性是必要的, 这些特性影响穿墙成像等一些实际应用。墙体改变超宽带信号传播的能力在很大程度上取决于介电常数的实部和墙体的有效电导率。这两个量可用于参数设计, 以获得更好的成像。根据上述讨论, 材质的总电流密度可表示为

$$J = \sigma_e E + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r' E = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r' (1 - j \tan \delta) E \quad (1.11)$$

其时谐波方程为

$$\nabla^2 E = j\omega \mu \sigma_e E - \omega^2 \mu \varepsilon_0 \varepsilon_r' E = \gamma^2 E \quad (1.12)$$

式中 γ 是复传输常数, 定义为

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega \mu (\sigma_e + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r')} \quad (1.13)$$

参数 α 和 β 分别为熟知的衰减常数和相位常数。依据材料性质和频率, 其计算式如下

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.14)$$

和

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

通常, 信号作用于墙体而产生的衰减主要有电导率损失、反射损失以及墙体内部的多次反射。对高频信号或存在液体时, 电导率损耗可能是很重要的衰减因素。不过, 大部分干燥的墙壁不会表现明显的欧姆损耗。反射损耗依赖于墙体电导率与自由空间电导率的对比度以及

入射角度。当墙体不是各态同性且墙体厚度远大于信号波长时,墙体内部多次反射造成的影响就会很严重。重建一幅图像需要正确的信号相位信息。墙体会明显改变信号的相位,从而造成图像的畸变。然而穿墙传播中的衰减是很易于补偿的,可通过增加发射功率实现,而信号相位问题则需要更精细的解决方案。

1.2.1 材料的色散

穿墙成像雷达的超宽带频谱覆盖频率范围为 3.1 ~ 10.6 GHz。因此超宽带信号的传播更易受材料,包含传播媒介的,与频率相关的特性影响。对于这样宽的频率范围,材料对电磁波表现出不同的性能。当作用的电磁场频率增加,材料的分子偶极子不能立刻做出响应,这种材料对电磁波的惰性就是色散。这种现象造成超宽带信号不同频谱成分传输速度的不同。由于电抗损失(偶极子振荡)所造成的衰减也是与频率相关的,因而信号不同的谱成分也对应不同的衰减。这些影响中最重要的是脉冲展宽,幅度损耗以及常规的信号失真。这些损耗直接导致下述所有或部分方面造成损失:带宽、准确性以及识别能力。在超宽带系统中,常采用窄时宽的脉冲信号,脉冲的传播特性可以用群速度很好地解释,群速度 v_g 是电磁能量传输的速度,其定义式如下

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (1.16)$$

对于非色散媒质,群速度与相位速度相同, $v_p = \frac{\omega}{\beta}$, 对所有频率皆是常数,而对于色散媒质,群速度是关于频率的函数,因而不同频率成分的延时不同,这种延时的差异性造成脉冲的展宽,脉冲的时宽增大而带宽减小(带宽损耗)。对于极窄脉冲,其脉冲展宽现象会更加明显。由于强色散造成的脉冲分裂,脉冲会出现变形失真。由于衰减系数与频率有关,脉冲的部分谱成分会比其余谱成分的衰减更严重。

根据色散理论可预计,在远离共振区,材料的介电常数会随频率的增加而增大。事实上,可以表明很多材料的色散符合一些经典模型,比如 Debye 和 Lorentz(洛伦兹)模型。在 Debye 模型里,定义了松弛时间来描述电偶极子随施加的电场变化。在低频区,由于强极化的原因,偶极子与电场变化几乎同步,然而,随着电场振荡频率的增大,偶极子开始与电场不同步,极化变弱。因此,长松弛时间的材料表现出较弱的极化,而短松弛时间材料展现出较强程度的极化,对于电介质材料,式(1.6)中的色散关系可表示为

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)} \quad (1.17)$$

式中, ε_∞ 是光学介电常数; ε_s 是静态介电常数; τ 是材料的松弛时间。

式(1.17)的 Debye 模型是一个用于拟合实验数据的数学表达式。一旦拟合完成,该模型可以用于分析或数值模拟。Lorentz 模型考虑了材料的多重共振以及偶极子耦合效应。它直接来源于运动方程(1.3)。引入 $\omega_p^2 = Nq/\varepsilon_0 m$ 和 $\omega_0^2 = s/m$, 式(1.6)可表达为

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega_p^2}{\omega_0^2 + 2j\omega\Gamma + \omega^2} \quad (1.18)$$

式中, ω_0 是材料的共振频率; Γ 是阻尼因子。

当频率远低于材料的共振频率时,介电常数是实数且与频率无关,因此没有色散。随着频率接近共振频率,介电常数增大,衰减也变得明显。

1.2.2 典型墙体的电特性

当然,由于材料原子结构、物理性质的不同,不同的材料表现出不同的色散和衰减度。混凝土是迄今为止最多样化的建材,因而它的电特性得到了关注。其水分含量、总密度、均匀性、孔隙度、添加物密度等因素,在确定精确的混凝土物理模型时起着重要的作用。上述结论同样适用于石灰砖。其他的建材,诸如木材、纸张、玻璃也有类似的一些研究问题。大量研究人员采用实验及理论的方法对不同应用、不同频率范围下的材料介电特性展开了研究。1.2.2.1节至1.2.2.3节总结了超宽带频率范围下的典型墙体材料的介电性能。在某些时候,湿度和含水量对材料介电特性影响最突出。然而,总体而言,湿度超过50%时,传导损耗显著增加。

1.2.2.1 混凝土和石灰砖

对于几乎所有的水分含量为零的干燥方砖而言,在超宽带频率范围下,其相对介电常数实部值通常为 $3.7 \sim 4$,虚部值通常为 $0.12 \sim 0.6$ ^{[Sta03][San07]}。这一结果会随含水量的增加发生显著变化。据记录,相对介电常数的实部和虚部变化范围分别对应 $3 \sim 10$ 和 $0.12 \sim 2.0$ 。对于未加固的干燥混凝土,复介电常数不会随着频率和材料混合比例的变化而发生显著的变化,其相对介电常数实部和虚部通常为 $5 \sim 7$ 和 $0.1 \sim 0.7$ 。

1.2.2.2 玻璃

玻璃的介电性能与玻璃成分关联较大,而受频率影响较小。熔融石英,其相对介电常数在整个UWB频带内约为4。高温导致离子的流动性增加,因而温度对介电性能的变化影响较大。玻璃的损耗因子会随着材料组成成分发生改变,其在微波频段的典型值为 $0.000\ 05 \sim 0.035$ 。

1.2.2.3 木材

在确定木材的介电性能时,需要考虑诸多因素,包括木材类型、木材密度、水的含量、温度以及工作频率。在UWB频率范围内,干燥的木材相对介电常数通常为 $1.2 \sim 4.5$,损耗因子为 $0.007 \sim 0.061$ 。在常温下,湿度在 $0\% \sim 100\%$ 之间时,这些值会显著提高。

1.3 穿墙中衰减和色散的测量技术

与窄带无线通信系统中,信号失真基本上是由多径效应造成的不同,超宽带无线电系统中,信号经历的严重失真,主要取决于传播途径中墙体的色散性、多径分量以及发射/接收天线的带宽限制。在本节中,穿墙中衰减和色散的测量技术将得到讨论,特别是时域和频域中的辐射测量技术,这种技术通常用于现场无损检测中。

1.3.1 时域技术

在时域技术中,采用持续时间非常短,脉冲间隔相对较长的周期高斯脉冲串来测量信号穿墙传播。这些脉冲由带宽足够大的宽带天线进行辐射,以保证失真可以忽略不计。在接收端,信号被另外一个宽带天线接收并被宽带检测器检测(如数字采样示波器)。如图1.5所示,测量设备由一对发射/接收宽带天线(如横向电磁波喇叭天线)、脉冲发生器、数字采样示

波器以及触发信号发生器等组成。脉冲发生器通过低损耗宽带电缆连接到发射天线。当需要高辐射功率时,可在发射天线的反馈端使用低噪声宽带功率放大器。接收天线通过宽带电缆连接到数字采样示波器。为了提高接收信号功率,低噪声功放可用于接收天线的输出端。在感兴趣的频谱内,放大器应该具备恒定的增益和线性相位特性。

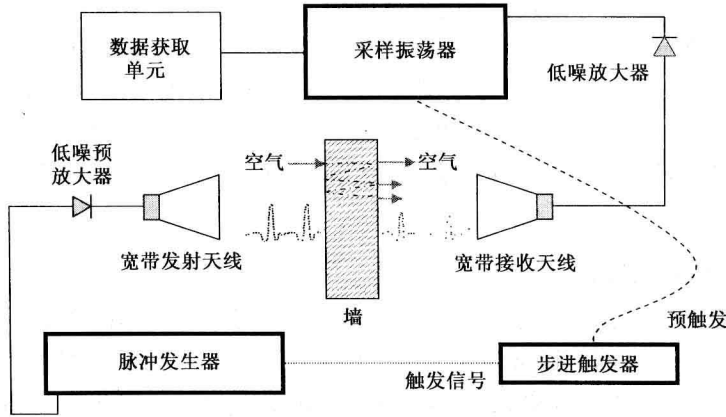


图 1.5 时域测量装置图

传播信道中发射和接收双方的同步是时域测量的一个重要要求,为了保持同步,在脉冲产生器和数字采样示波器之间应建立一个低抖动脉冲触发器。采样示波器需要一个预触发。这由步进触发器提供所需的触发和预触发信号实现。触发电缆和脉冲传输路径造成的延时可通过调整预触发和延迟触发信号之间的时间延迟来进行补偿。校准和噪声是另外两个需要解决的问题,校准的目的是为了消除测量仪器测得的数据的非理想特性影响。另外,接收信号可能会由于各种干扰和噪声而恶化。窄带噪声通常是由附近窄带系统的电磁干扰造成的,而且往往以正弦波的形式加入到接收信号中,这种信号可通过带通滤波器消除。另一方面,宽带噪声是指接收机的热噪声。宽带噪声通常以随机短脉冲的形式出现,可通过多信号取均值的方法得到显著降低,这一特点通常用于采样示波器。

脉冲穿墙传播所遭受的衰减和色散特性的宽带特征可通过定义一个插入传递函数表征。它是指穿墙后的接收脉冲和自由空间下的传播信号对应的傅里叶变换后的比值,后者在这里用做参考信号。墙体材料的复介电常数,可以从插入传递函数中提取。介电常数的实部和虚部可用于对应解释脉冲传播的延迟失真和衰减问题。

1.3.2 频域技术

在频域测量技术中,穿墙传播测量主要是通过不同频率上使用扫描谐波发生器实现的。频域方法较之时域方法的最大优势是有更大的动态范围。每一个测量点数据都是一个复数,有幅度和相位信息。图 1.6 给出了频域测量的组成图。网络分析仪用于执行频率扫描测量。如图中所示,端口 1 的 S 参数测试装置连接至发射器,而端口 2 连接至接收器。网络分析仪只扫描我们感兴趣的频段。研究宽频带特性,则需要扫描一个较宽的频率范围,人们需权衡频率分辨率和测量数据量之间的关系。这是因为频率分辨率越高,数据量越大,执行的时间就越长,同时对存储空间也有更高的要求。

长传输距离下的测量需要很长的电缆连接 S 参数测量端口和发射器及接收器,这么长的