

and Networking in China. Shanghai, China: IEEE Press, 2007:115 – 119.

[7] SHEN Zu-kang, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4 (6) : 2726 – 2737.

[8] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM – based spectrum pooling systems [C] // IEEE Vehicular Technology Conference. Milan, Italy: IEEE Press, 2004:1873 – 1877.

Study on the Fairness of OFDMA Resource Allocation Strategy in Cognitive Radio

YANG Shou-yi, HAO Wan-ming

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: For the resource allocation unfair problem among the second users in cognitive radio, a resource allocation algorithm based on the fairness of the second users rates is proposed, and it also makes the throughput maximum. The algorithm can be divided into two steps, cognitive user subcarrier allocation and subcarrier power allocation. In the first step, two subcarrier allocation schemes are put forward, and those two schemes allocate subcarriers to cognitive users according to their rates ratio. But, the difference is that subcarriers are divided into two classes in the second scheme, and this scheme improves fairness among the users. In the second step, water-filling algorithm is used to make the throughput maximum. The simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: cognitive radio; resource allocation; fairness

(上接第 54 页)

Study of Density of Progress for Distributed Networks

LI Na-na¹, CHEN Chang-hai^{2,3}, GAN Yong¹, DING Han-qing¹

(1. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Electrical Information Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China; 3. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on the assumption that the distance between the source transmitter and the final receiver is not infinite in distributed network, the effective transmission distance is redefined, the upper and lower bounds of the expectation of effective transmission distance and the density of progress are derived, and how the network parameters affect the density of progress is studied. Numerical and simulation results show that: the simulation value for the expectation of effective transmission distance is between its upper and lower bounds, and decreases with the angle of the region for the selection of relay; the simulation value for the density of progress, which is between its upper and lower bounds, is closer to its upper bound, and the density of progress is determined by the expectation of effective transmission distance and the maximum probability of outage.

Key words: network capacity; density of progress; probability of outage; effective transmission distance

基于 FDTD 的钢筋混凝土墙对通信信号衰减研究

杨明珊, 孟小超, 邱志勇, 郭云

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法研究了钢筋混凝土墙中钢筋网孔大小、钢筋半径以及其墙厚对通信信号衰减的影响. 采用等效模型分析了钢筋混凝土墙的谐振频率. 研究得出了上述三种参数变化时钢筋混凝土墙的透射系数的幅值衰减和谐振频率分布规律, 并且其谐振频率符合等效模型计算出的理论值, 从而验证了等效模型的合理性.

关键词: 时域有限差分法; 高斯脉冲; 钢筋混凝土墙; 透射系数

中图分类号: TN011.92

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.015

0 引言

随着我国通信技术的快速发展和城市规模的不断扩大, 城市电磁环境越来越复杂, 且现代建筑大多采用钢筋混凝土架构, 致使室内的无线通信质量日趋下降. 目前在建筑设计时, 普遍只考虑建筑材料满足结构要求的力学性能^[1], 并没有考虑到建筑区域内的通信质量. 为了指导建筑设计满足通信需求, 系统地研究钢筋混凝土墙对通信信号衰减的影响, 提前对墙体衰减预测很有必要.

对于钢筋混凝土墙对通信信号衰减的研究, 国内外有 Roger^[2]、Richalot^[3]、张恒伟^[4]、刘峰^[5]等人做过这方面的研究, 但是他们并没有对钢筋混凝土墙谐振以及衰减幅值方面做具体的讨论. 笔者将着重讨论钢筋混凝土墙中的钢筋网孔大小、钢筋半径以及其墙厚对通信信号衰减的影响, 并将钢筋混凝土墙整体等效为左右两谐振腔中间通过波导连接组成的模型, 来预测其谐振频率以及幅值衰减.

1 基本布局

时域有限差分方法是 1966 年由 K. S. Yee 首次提出的一种电磁场数值计算方法. 该方法对电磁场 E 、 H 分量在空间和时间上采取交替抽样的离散方式, 应用该方式将含时间变量的 Maxwell 旋度方程转化为一组差分方程, 并在时间轴上逐

步推进地求解空间电磁场^[6].

为了在有限计算区域模拟无界空间中的电磁问题, 在波的传播方向截断边界上设置为吸收边界 PML, 而为了减少计算量和避免波的绕射, 在另两个方向上采用周期边界 PBC. 文中统一采用高斯脉冲, 波的传播方向沿 Y 轴正方向, 其极化方向沿 Z 轴. 透射测试点 S 设置在墙面的正中间, 离墙面 1 000 mm 处. 钢筋网的相对介电常数 $\epsilon_r = 1$, 电导率 $\sigma = 10^7$ s/m; 混凝土的相对介电常数 $\epsilon_r = 6$, 电导率 $\sigma = 1.95$ ms/m. 墙体模型如图 1 所示, 该图为单层无限大钢筋混凝土墙的模拟计算布局图, 其中 L 为单层钢筋网的中心到左侧墙面的距离, a 为墙内任意 $X-Z$ 方向截面到左侧墙面的距离, T 为钢筋混凝土墙的厚度, R 为钢筋的半径, P 为钢筋网孔大小.

2 数值计算

2.1 钢筋混凝土墙中钢筋网孔大小对电磁波衰减的影响

入射波采用高斯脉冲, 其脉冲宽度为 $64\Delta t$, 其中 $\Delta t = 7.699 \times 10^{-12}$ 为 FDTD 方法中的单位时间步长. 网格单元为 4 mm. 钢筋半径 $R = 10$ mm, 钢筋混凝土墙厚 $T = 200$ mm, 钢筋网孔大小分别取 $P = 150, 180, 210, 240, 270, 300$ mm. 对上述六种网孔情况的钢筋混凝土墙分别进行数值计算, 将得到的时域结果, 通过傅里叶变换转换到频域,

收稿日期:2013-10-16; 修订日期:2013-12-10

基金项目:河南省科技攻关计划资助项目(112300410055)

作者简介:杨明珊(1968-), 女, 江西南昌人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电磁兼容、金属材料和非金属材料电磁性能的研究, E-mail: zhulinyinmeng@foxmail.com.

然后利用 Matlab 进行处理,部分结果如图 2 所示.图 2 为钢筋网孔大小 $P=150,180,210$ mm 时钢筋混凝土墙的透射系数频谱图.

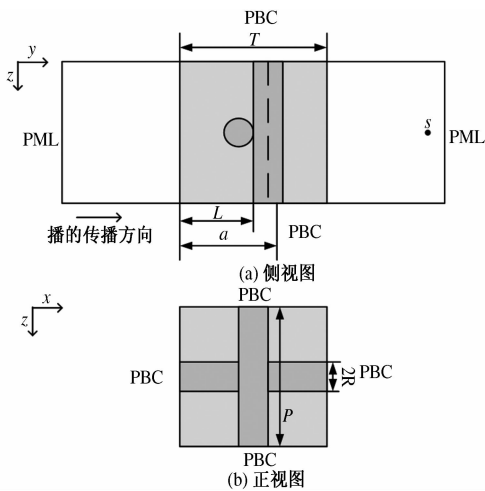


图 1 模拟计算布局图

Fig. 1 Description of simulated placement

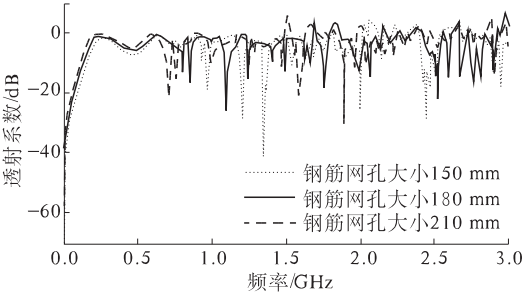


图 2 不同钢筋网孔大小钢筋混凝土墙透射系数频谱图

Fig. 2 Transmission coefficients spectrum for the different sizes of steel mesh in reinforced concrete wall

在钢筋网网孔与入射波波长接近时会出现谐振现象,将钢筋网看成光栅^[7],则钢筋网发生谐振波长与钢筋网周期的关系如下:

$$\lambda = P, P/2, P/3, \dots, P/n \tag{1}$$

式中: λ 为谐振波长; P 为钢筋网网孔大小; n 为正整数.由式(1)可得,图 2 中网格大小为 150, 180, 210 mm 的钢筋网的谐振频率 f_n 分别为 $0.816\ 5n, 0.680\ 4n, 0.583\ 2n$ GHz.

同时,钢筋网的每个网孔可粗略的看成一段矩形波导.某种导模在波导中能够传输的条件是 $f > f_c$,导波系统中截止频率 f_c 对应的最低导模为 TE_{10} 模^[8],截止频率为

$$f_{c10} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r} 2P} \tag{2}$$

式中: c 为光速; μ_r 为相对磁导率; ϵ_r 为相对电导率; P 为钢筋网孔大小.

由图 2 可得,①当 $f < f_{c10}$ 时,电磁波衰减很

大,其主要是由于钢筋网孔相当于短波导,小于截止频率时进入截止区,任何模式的波都不能传播.当 $f < f_{\text{peak}}$ (f_{peak} 为透射系数曲线的第一个峰值对应的频率,且计算知 $f_{\text{peak}} < f_{c10}$) 时,透射系数斜率变化规律如图 3 所示,基本趋于一条直线.②当 $f_{c10} < f < f_{n|n=1}$ ($f_{n|n=1}$ 为 $n=1$ 时钢筋混凝土墙中钢筋网的谐振频率) 时,钢筋网对电磁波的衰减减弱,曲线波动周期约等于混凝土墙形成的谐振腔的谐振周期,其波动周期主要由墙体厚度决定,在 2.3 小节中具体说明.在 $0 < f < f_{n|n=1}$ 整段内,3 条曲线的走势相同,但钢筋网孔越小对电磁波衰减越大.③当 $f > f_{n|n=1}$ 时,曲线产生剧烈震荡,主要是因为钢筋网网孔和入射波波长接近发生谐振,再加上钢筋网和混凝土墙的相互调制,波形震荡更为复杂.在谐振频率 f_n 附近三曲线走势基本相同,但在其余频段内差异较大,这是因为在谐振频率处,墙体中钢筋网幅值衰减相对于混凝土较大,墙体中钢筋网对电磁波衰减起主要作用,而不同网孔大小的钢筋网透射系数曲线在 f_n 处波动走势相似^[4],故钢筋混凝土墙透射系数曲线在 f_n 处基本相同,仅曲线谐振频率随着网孔增大向低频移动.

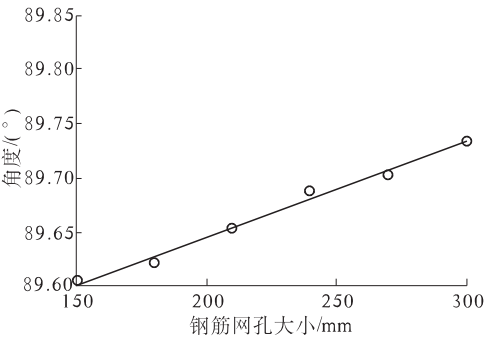


图 3 不同钢筋网孔大小的钢筋混凝土墙透射系数曲线斜率 ($f < f_{\text{peak}}$)

Fig. 3 The sizes of steel mesh lattice versus the slope of the transmission coefficient curve of reinforced concrete wall ($f < f_{\text{peak}}$)

2.2 钢筋混凝土墙中钢筋半径对电磁波衰减的影响

入射波采用高斯脉冲,其脉冲宽度为 $64\Delta t$,其中 $\Delta t = 5.777 \times 10^{-12}$ 为 FDTD 方法中的单位时间步长.网格单元为 3 mm.钢筋混凝土墙厚 $T=200$ mm,钢筋网孔大小 $P=150$ mm,钢筋半径分别取 $R=3, 6, 9, 12, 15, 18$ mm,对这 6 种半径情况的钢筋混凝土墙进行数值计算,将得到的时域结果,通过傅里叶变换转换到频域,然后利用 Matlab

进行处理,部分结果如图 4 所示. 图 4 为 $R = 3, 9, 15\text{ mm}$ 时钢筋混凝土墙的透射系数频谱图.

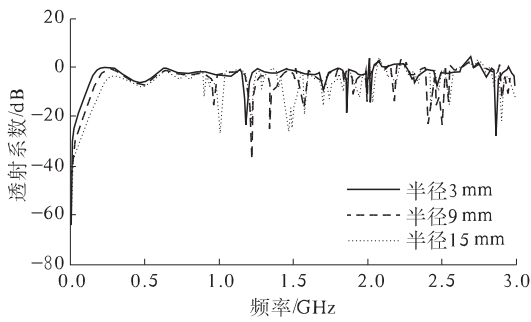


图 4 不同钢筋半径的钢筋混凝土墙透射系数频谱图
Fig. 4 Transmission coefficients spectrum for the different radiuses of steel mesh in reinforced concrete wall

由图 4 可得,①3 条曲线的走势基本吻合,随着半径增大,曲线衰减增幅较小,各谐振频率向高频移动不明显,这是因为这三者的钢筋网孔大小和墙体厚度相同,网孔大小是两平行钢筋中心的间距,钢筋半径增大后截面积变大,相当于网孔变小,但半径增大引起网孔的减幅较小. ②钢筋网孔大小决定曲线震荡的频率点. 由公式(1)可得, $f_n = 0.8165n\text{ GHz} (P = 150\text{ mm})$. 当 $n = 1$ 时,3 条曲线开始震荡;当 $n = 2, 3$ 时,亦可观察到墙体中钢筋网的谐振点;当 $n > 3$ 时,超出图示范围. 3 条曲线都在谐振点之后出现先剧烈震荡,然后震荡的周期逐渐变大的现象,其与空气中钢筋网的谐振规律相同,具体钢筋网透射系数频谱图参见文献[4]中图 6. ③对比 3 条曲线可知,随着半径增大,透射系数的谐振频率增多. 经大量计算知,谐振频率与钢筋混凝土墙内部结构有关,笔者提出一种模型来等效其内部结构,计算出的谐振频率和图中谐振频率基本相符,具体参见第 2.4 小节. 根据提出的等效模型,半径增大,则形成的谐振腔个数增加,故而其谐振频率增多. ④当 $f < f_{\text{peak}}$ 时,不同钢筋半径的钢筋混凝土墙透射系数曲线的斜率变化规律如图 5 所示,图 5 是通过指数拟合绘出的图形.

2.3 钢筋混凝土墙厚度对电磁波衰减的影响
该小节入射波采用高斯脉冲,其脉冲宽度为 $64\Delta t$,其中 $\Delta t = 7.701 \times 10^{-12}$ 为 FDTD 方法中的单位时间步长. 网格单元为 4 mm . 钢筋半径 $R = 10\text{ mm}$,钢筋网孔大小 $P = 150\text{ mm}$,钢筋混凝土墙厚分别取 $T = 150, 190, 230, 270, 310, 350\text{ mm}$. 对上述 6 种墙厚情况的钢筋混凝土墙分别进行数值计算,将得到的时域结果,通过傅里叶变换转换到

频域,然后利用 Matlab 进行处理,部分结果如图 6 所示. 图 6 为 $T = 150, 230, 310\text{ mm}$ 时钢筋混凝土墙的透射系数频谱图.

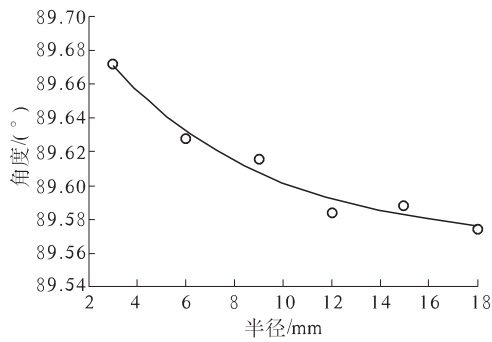


图 5 不同钢筋半径的钢筋混凝土墙透射系数曲线斜率 ($f < f_{\text{peak}}$)
Fig. 5 The radius of steel mesh versus The slope of the transmission coefficient curve of reinforced concrete wall ($f < f_{\text{peak}}$)

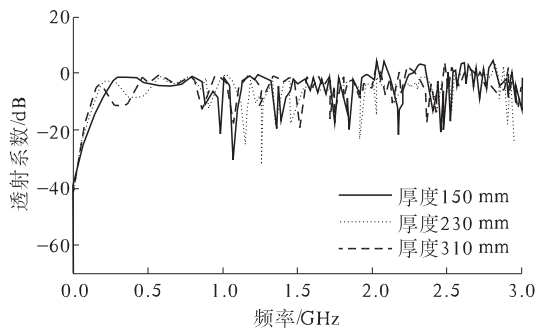


图 6 不同钢筋混凝土墙厚透射系数频谱图
Fig. 6 Transmission coefficients spectrum for the different thicknesses of reinforced concrete wall

由于墙的 X 和 Z 方向设为 PBC 周期边界,所以将墙体看成两个方向无限长而一个方向有限宽的矩形谐振腔,则矩形谐振腔的谐振频率理论公式^[8]可以简化为

$$f_m = \frac{1}{2} \frac{m}{\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{1}{T} \tag{3}$$

式中: m 为正整数; T 为墙体厚度; μ, ϵ 分别为墙体的磁导率和介电常数.

由图 6 可见,随着墙厚增加,曲线衰减的幅值逐渐增大但增幅不大,可知,钢筋混凝土墙厚度变化对电磁波衰减影响较小. ①当 $0 \sim 0.044\text{ GHz}$ 时,3 条曲线基本重合,这是由于在此频段钢筋网对电磁波衰减非常大,混凝土则相对较小可忽略,3 种墙体中钢筋网网孔大小和钢筋半径又相同,故对电磁波的衰减也相同. ②当 $0.044 \sim 0.8165\text{ GHz}$ 时,墙体厚度越大,曲线幅值衰减越大,这是因为随着频率增大,钢筋网对电磁波衰减逐渐减小,此时混凝土相对钢筋网的衰减较大,混凝土对

电磁波衰减起主要作用. 当 $0.044 \sim 0.29$ GHz 时, 不同墙体厚度的透射系数曲线斜率的变化规律如图 7 所示, 其是通过拟合出的结果. 当 $0.29 \sim 0.8165$ GHz 时, 随着墙体厚度增大, 曲线的波动周期减小, 这是由于此段混凝土起主要作用, 由式 (3) 可知, 随着厚度增加, f_m 减小, 即曲线波动周期减小. ③当 $0.8165 \sim 3$ GHz 时, 3 条曲线在 0.8165 GHz (其为 $n = 1$ 时钢筋混凝土墙中 $P = 150$ mm 钢筋网的谐振频率) 处的透射系数相同, 这是由于钢筋网网孔大小和钢筋半径相同, 由公式 1 得到的钢筋网谐振频率亦相同. 当大于 0.8165 GHz 时, 随墙体厚度增加, 曲线谐振频率向低频移动, 这是因为 T 增大, 相当于 a 也增大, 从而形成的谐振腔厚度增大, 根据公式 3 可知, 谐振频率减小, 从而谐振频率向低频移动, 亦验证了 2.4 小节提出等效模型是合理的.

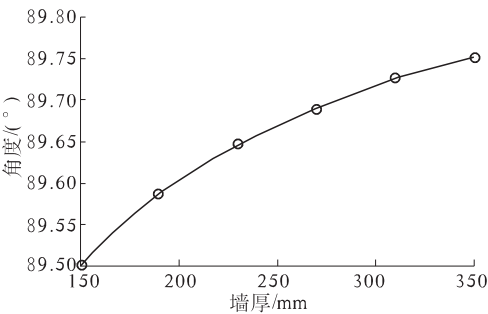


图 7 不同钢筋混凝土墙厚度的钢筋混凝土墙的透射系数曲线斜率 ($f < f_{\text{peak}}$)

Fig. 7 The thickness of reinforced concrete (RC) wall versus The slope of the transmission coefficient curve of RC wall ($f < f_{\text{peak}}$)

2.4 钢筋混凝土墙谐振频率的研究

该小节钢筋位置 $L = 100$ mm, 即钢筋网处于墙体正中间, 钢筋混凝土墙的参数和 2.1 节中 $P = 150$ mm 情况下的相同, 其透射系数的频谱曲线如图 2 短虚线所示.

为了预测钢筋混凝土墙透射系数的谐振频率, 根据墙体内部结构, 提出一种模型, 即将钢筋混凝土墙等效为左右两个一定厚度的谐振腔和中间矩形波导级联的模型. 该模型既包括了混凝土对电磁波的影响, 又包含了墙内钢筋网对电磁波的影响, 较为全面地贴合实际内部结构, 故而利用等效模型求解出的谐振频率即是钢筋网和混凝土相互调制后的谐振频率. 由于钢筋网中横向和纵向的钢筋不在一个平面上, 并且钢筋是圆柱形的, 其结构如图 1 所示, 则电磁波在墙体中传播时会遇到钢筋上不同点发生反射, 而对于无限大钢筋

网来说, 钢筋网上离外墙面相同距离的点有无限多个, 那么就可以将这些点近似为一张无限大的面, 这个面与两侧外墙面分别形成厚度为 a 和 $T - a$ 的两个谐振腔, 其中 $a \in (L - 2R, L + 2R)$ 且 $a = T$, 从而形成多种厚度的等效模型. 在本小节中 $a = 80 \sim 120$ mm、200 mm, 取几个特殊位置的厚度, $a = 80, 90, 100, 110, 120, 200$ mm. 表 1 中, f_{FDTD} 为用 FDTD 法计算出的钢筋混凝土墙透射系数衰减较大谷值对应的频率; f_{theory} 为上述 6 种墙体厚度计算出来的理论谐振频率; a 为与 f_{theory} 对应的谐振腔厚度.

表 1 $L = 100$ mm 时等效模型谐振腔的谐振频率理论值及厚度与 FDTD 计算结果对比

Tab. 1 Comparison of the theoretical values calculated by using the equivalent model and values calculated by using FDTD method for $L = 100$ mm

$f_{\text{FDTD}}/\text{GHz}$	$f_{\text{theory}}/\text{GHz}$	a/mm
0.979	1.021	120
1.228	1.225	100/200
1.371	1.361	90
1.557	1.531	80/120/200
1.703	1.67	110
1.921	1.837	100/200
2.016	2.041	90/120
2.191	2.227	110
2.321	2.296	80
2.440	2.450	100/200

从表 1 可以看出, ① f_{FDTD} 和 f_{theory} 两者值较为接近, 说明建立的钢筋混凝土墙等效模型是合理的. 对于上文中钢筋网孔、半径和墙厚的变化都可以看作是模型中 a 的变化, 从而可判断出谐振频率如何移动. ②结合图 2 中短虚线可知, 在 1.228 GHz, 1.371 GHz 处幅值衰减最大, 而这两个频率对应的谐振腔厚度为接近或等于 100 mm 和 200 mm, 从而可知, 钢筋混凝土墙厚度 T 或者其内部等效厚度为 L 的谐振腔对通信信号衰减最大, 而其他厚度为 a 的谐振腔对应衰减要小一些, 故在预测最大衰减对应的谐振频率时, 只需通过计算这两种厚度对应的谐振频率即可, 其他衰减相对小的谐振频率可通过 a 的取值范围大致计算出. ③在 2.3 节知墙体厚度增加对衰减影响不大, 而在这些谐振点处, 衰减普遍达到 -10 dB 以上, 这是因为波在墙体中不断反射损耗的缘故, 波从一边谐振腔经过波导到达另一边谐振腔, 然后再经过多次的反射传播, 致使衰减幅值增大.

3 结论

采用时域有限差分法分析了不同钢筋网孔大小、钢筋半径和混凝土墙厚的钢筋混凝土墙对电磁波衰减的影响,然后利用等效模型得出了谐振频率分布的规律.

(1)钢筋混凝土墙中钢筋网孔增大,透射系数幅值衰减减小,曲线开始剧烈震荡的频率降低.当 $f < f_{\text{peak}}$ 时,钢筋混凝土墙对电磁波的衰减主要由钢筋网决定,透射系数曲线斜率随网孔增大成直线拟合增大.当 $f_{\text{peak}} < f < f_{n|n=1}$ 时,曲线波动周期主要由混凝土厚度决定.

(2)钢筋混凝土墙中钢筋半径增大,整体上对电磁波衰减影响较小,幅值衰减有所增大,透射系数曲线谐振频率增多且向高频移动不明显.当 $f < f_{\text{peak}}$ 时,曲线斜率随钢筋半径成指数拟合变化.

(3)钢筋混凝土墙厚度增大,透射系数幅值衰减逐渐增大但增幅较小透射系数的谐振频率向低频移动.当 $f < f_{\text{peak}}$ 时,透射系数曲线斜率随墙厚度成对数拟合变化.

(4)将钢筋混凝土墙等效为左右两个谐振腔和中间为矩形波导级联的模型,可得出谐振频率和厚度的对应关系,从而可大致计算出曲线中各谐振频率.

参考文献:

- [1] 王新玲,吕林,朱俊涛,等. CFRP 布加固破坏混凝土框架的拟静力试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(3):13-17.
- [2] DALKE R A, HOLLOWAY C L, MCKENNA P, et al. Effects of reinforced concrete structures on RF communications[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000,42(2):486-496.
- [3] RICHALOT E, BONILLA M, WONG Man-fai, et al. Electromagnetic propagation into reinforced-concrete walls[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000,48(3):357-366.
- [4] 张恒伟,冯恩信,张亦希,等. 钢筋混凝土墙对电磁脉冲屏蔽的 FDTD 分析[J]. 微波学报,2007(23):189-193.
- [5] 刘峰,吕昕,李跃波,等. 钢筋网对高功率微波衰减特性的影响[J]. 强激光与粒子束,2012,24(11):2713-2717.
- [6] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [7] 严瑛白. 应用物理光学[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [8] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京:电子工业出版社,2001.

Study on Attenuation of Reinforced Concrete Walls on Communication Signals Based on FDTD

YANG Ming-shan, MENG Xiao-chao, QIU Zhi-yong, GUO Yun

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper studies the size of steel mesh lattice, the radius of steel mesh and the thickness of wall in reinforced concrete wall on communication signal attenuation by using the Finite Difference Time Domain (FDTD). The resonant frequency of reinforced concrete wall is discussed by using the equivalent model. Study results show the laws of the amplitude attenuation and the resonance frequency distribution of the transmission coefficient when three parameters change, and resonant frequencies of the reinforced concrete wall are in accordance with the theoretical values calculated by using the equivalent model, which verifies the rationality of the equivalent model.

Key words: FDTD; gaussian pulse; reinforced concrete wall; transmission coefficient