

文章编号: 1007-5321(2005)05-0080-05

3.5 GHz 宽带信道测量和相关参数分析

张明¹, 张建华¹, 姜磊¹, 张平¹, 姜军¹, 吴宇菲²

(1. 北京邮电大学 中德研究所, 北京 100876; 2. 摩托罗拉公司, 伊利诺斯州 60196)

摘要: 借助于 3.5 GHz 频段、20 MHz 带宽的一发双收系统, 对中国典型的后 3 代(B3G)城市信道环境和典型的室内信道环境进行了测量和研究; 在该频段验证了室外小区的通用路径损耗模型, 提出了适用于中国环境的大尺度衰落模型, 为中国后 3 代信道建模和系统设计提供了参考. 通过对室内外信道时延扩展、时延-时间域信道响应、时频域信道响应, 以及室外信道传播环境相关性和天线相关性的测量、统计及分析, 为后 3 代系统的评估提供了重要的参数指标.

关键词: 信道测量; r.m.s 时延; 后 3 代; 信道冲激响应; 天线相关性

中图分类号: TN21; TN8 文献标识码: A

3.5 GHz Broadband Channel Measurement and Parameter Analysis

ZHANG Ming¹, ZHANG Jian-hua¹, JIANG Lei¹, ZHANG Ping¹,
JIANG Jun¹, WU Yu-fei²

(1. Joint Sino-German Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Motorola Inc, Illinois 60196, United States)

Abstract: Based on the 1-Tx and 2-Rx systems working in 3.5 GHz frequency and 20 MHz bandwidth, the typical beyond 3G (B3G) urban wireless propagation environment of China as well as typical indoor channel propagation environment was studied through a recent indoor and outdoor wireless propagation measurement. The general outdoor model of path loss was verified. A new large-scale fading mode was proposed, which provided reference model for China B3G channel modeling and system design. Important criteria for B3G system evaluation were provided by the measurement, analysis and statistic results of several parameters, namely 1) r.m.s excess delay and max excess delay in both indoor and outdoor scenarios, 2) the lag-time domain and time-frequency domain channel responses, 3) the correlation between different propagation environment in the singular cell, and the antenna correlation.

Key words: channel measurement; r.m.s excess delay; beyond 3G; channel impulse response; antenna correlation

2005 年初, 针对假设的 B3G 频段(3.49~3.51 GHz)和典型城市环境的信道测量项目, 在北京邮电大学附近, 使用一发双收的信道测量试验系统, 采集

了在不同移动速度(包括高速至 100 km/h)、不同传播环境(NLOS 和 LOS)下的室内、室外无线信道数据. 测量系统工作在 3.5 GHz 频点, 带宽 20 MHz.

收稿日期: 2005-02-24

基金项目: 国家“863 计划”项目(2002AA12311); 摩托罗拉 B3G 信道测量项目

作者简介: 张明(1978-), 男, 博士生, E-mail: zmisgod@126.com.

张平(1958-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: pzhang@bupt.edu.cn.

室外测量发射站架设在距地面约 50 m 的北京邮电大学主楼楼顶, 测试半径 2 km; 室内测量选择在大学校内的中德研究所移动技术实验室. 文献[1]介绍了这个试验系统的工作原理和构成, 并给出了一些初步的测量结果. 本文将对采集到的 8 400 个室外测量样本以及 4 397 个室内测量样本进行分析, 抽取信道冲激响应, 并给出路损、时延扩展统计、天线相关性、信道时频特性等参数的计算和分析结果.

1 信道冲激响应

通过文献[1]阐述的方法(系统如图 1 所示), 采集处理数据, 获得信道冲激响应样本; 把所得的冲激响应样本平方, 得到功率延迟分布. SIMO 信道测量联合功率延迟分布定义为对所有 N 个 SISO 路径的所有时间采样间隔的冲激响应的幅度平方取均值, 这里 $N=2$.

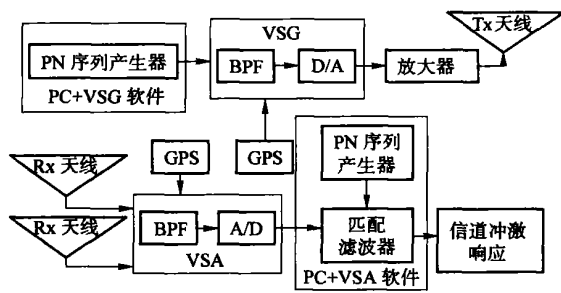


图 1 基于载波抑制滑动相关的一入双出测量系统

得到联合功率延迟分布样本后, 为判别样本的有效性, 需要设定一个门限对样本进行甄别. 首先设定一个噪声功率(噪底 noise floor)作为门限, 冲激响应样本中至少应该有一个径的幅度高于该门限 $15 \text{ dB}^{[2,3]}$, 否则该样本会被丢弃. 门限选取可使整个样本集上的平均模拟错误减小, 使描述多径信道传输的功率延迟分布有足够的动态范围, 以保证结果的完整性. 经过鉴别, 5 148 个室外测量冲激响应样本和 4 294 个室内测量冲激响应样本被保留下来. 噪底的拾取见文献[1].

2 路径损耗

路损是室外信道测量的关键参数, 定义为无线信号在传播空间的功率衰减, 它和室内短距离衰落特征^[4]不同. 大量的文献证明或证实从 100 MHz ~ 10 GHz 的频段内, 陆地传播损耗大致服从对数正态分布. 在 3.5 GHz 频段的信道测量结果验证了这个

规律. 考虑到发射天线在北京邮电大学主楼楼顶架设的位置, 把自由传播参考距离设为 10 m. 图 2 给出了在不同的传播距离和不同方向上的典型城市环境的空间传播功率损耗. 表 1 列出了路损指数 n 和相应的 RMS 误差 $\sigma_x^{[5]}$. 分析结果表明, 在中度误差($\sigma_x < 10$)下, 北京市区(典型的城市环境)的路损指数在 3.1~3.7 之间.

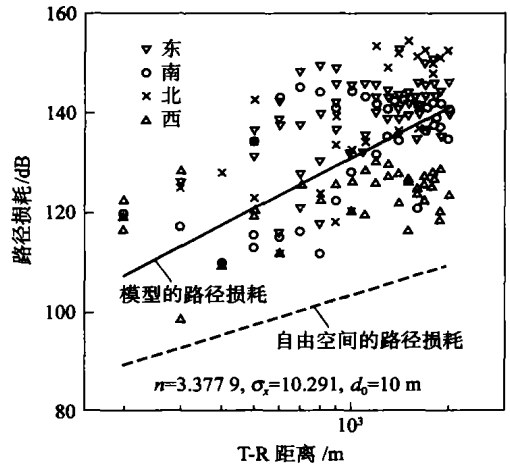


图 2 典型城市环境下不同传播距离不同的传播损耗

表 1 不同方位的路损指数 n 和 RMS 误差 σ_x

方位	北	南	西	东	全部
n	3.764	3.513 7	3.089 2	3.144 8	3.377 9
σ_x	0.619 37	6.549 7	10.897	1.938 7	10.291

3 时延扩展

r. m. s 时延和最大时延^[5]这 2 个参数被选择作为时延扩展的统计描述. 对于室外信道, 图 3(a)是 r. m. s 时延的概率分布, 99.9% 的情况下 r. m. s 时延小于 $3.6 \mu\text{s}$, 90% 的 r. m. s 时延小于 $3.1 \mu\text{s}$; 图 3(b)是最大时延的概率分布, 95% 的情况下最大时延小于 $5 \mu\text{s}$. 对于室内信道, 还分别考虑到了 LOS 和 NLOS 2 种独立的情况. 图 4(a)所示的是 r. m. s 时

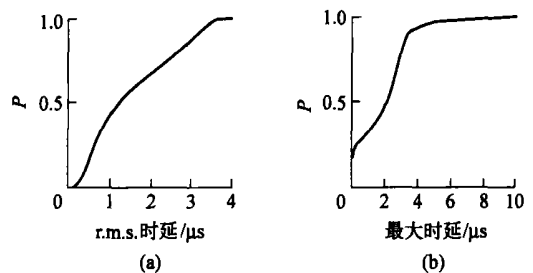


图 3 室外测量的 2 种时延扩展概率分布

延的概率分布, 90%的 r. m. s 时延小于 $0.575 \mu\text{s}$, 但在 LOS 信道下该值仅为 $0.075 \mu\text{s}$, 在 NLOS 信道下该值增大为 $0.625 \mu\text{s}$; 图 4(b) 所示的是最大时延的概率分布, 95%的 r. m. s 时延小于 $1.05 \mu\text{s}$, 但在 LOS 信道下该值仅为 $0.175 \mu\text{s}$, 在 NLOS 信道下该值增大为 $1.075 \mu\text{s}$. 由于绝大部分的室内测量都在 NLOS 环境下进行, 综合结果接近 NLOS 是正常的.

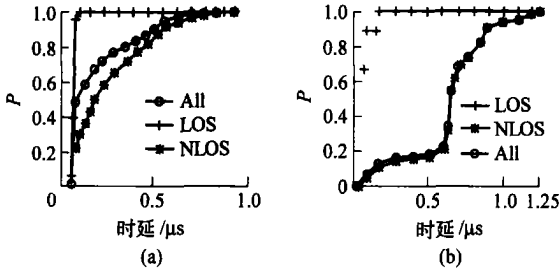


图 4 室内测量的 2 种时延扩展概率分布

4 时延域和时频域信道响应研究

通常来说, 使用三维图便于观察和分析信道响应在一段时间内的变化. 选择一次 10 min 的测试样本集来说明传播环境对信道响应的影响. 如图 5 所示, 车载接收机从学校西门(A)出发, 途经北邮科技大厦(B)向北行驶到学知桥(C), 桥下回转向南经过蓟门桥(D)一直行驶到明光桥(E). 10 min 内, 接收机共采集到 200 个信道响应样本, 这些样本的时延-时间域三维图如图 6 所示. 图中横坐标表示多径时延, 纵坐标是时间域, 灰度表示信号功率强度.

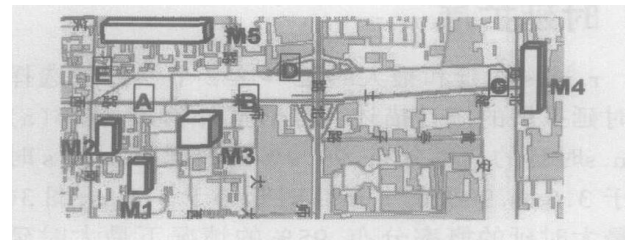


图 5 某次信道测试的路线

随着测试车的移动, 信道响应根据接收机周围反射物位置的变化而相应变化. 当接收机由 A 向 B 移动时, 有 3 簇明显的信号, 分别从 M1 (主楼, 发射机架设在该楼楼顶)、M2 (教三楼) 和 M3 (北邮科技大厦附近的楼群)、M5 (明光桥西北处的楼群) 4 个方位的高层建筑物 (楼高均在 10 层以上) 传来. 其中, 按照文献 [5] 介绍的相对传播时延的估计方法, 可以知道 M2 和 M3 反射的簇以大致相同的时间到达接收机. 当接收机由 B 向 C 移动时, M2 反射的簇被 M3

阻隔弱化后和 M3 反射的簇以及 M1 的直射簇合并为一簇. 此时信道响应呈现明显的 2 个径, 且绝对时延逐渐变大, 信号功率逐渐变小. 当接收机在 C 附近时, M4 (C 周围的楼群) 的反射信号使这段时间内的信道响应有 2 个在时间上对称的镜像径. 当接收机由 C 向 D 移动时, 绝对时延逐渐变小, 信号功率逐渐变大. 接收机向 E 移动时, 从 M1、M2 和 M3 直射或反射的簇的时延相隔很小又融合到一起形成一簇, 从 M5 反射的信号形成另一簇. 在这段时间内绝对时延和功率基本保持不变.

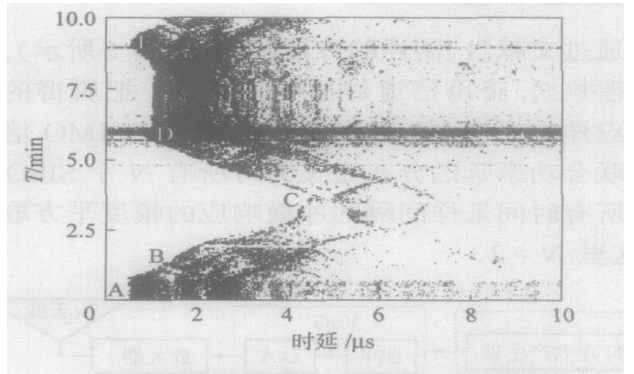


图 6 信道响应随时间变化的三维图

图 7 所示的是接收机在 E 处、移动速度为 60 km/h 的情况下, 时频域上频率响应的一个样本. 可以估计出的信道相关带宽约在 2.5 MHz 左右, 与前面得出的 r. m. s 时延的倒数基本一致, 这与文献 [6] 的式 (10) ~ (13) 提出的 r. m. s 时延和信道相干带宽的关系基本吻合.

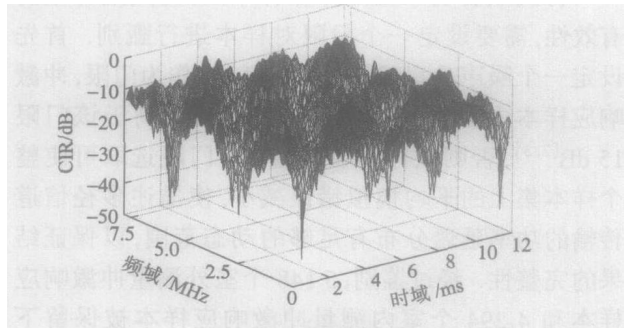


图 7 信道时-频响应

5 相关性研究

多天系统, 天线相关性和到达径之间的相关性限制了 MIMO 系统的容量^[7]. 因此, 多天系统的相关性分析成为研究 B3G 无线信道中很重要的组成部分.

设 v 、 u 为 2 个复信道冲激响应随机变量. 不

同的天线的包络相关系数 ρ_{env} 定义为

$$\rho_{env} = \frac{E[|u||v|] - E[|u|]E[|v|]}{\sqrt{E[|u|^2] - E[|u|]^2} E[|v|^2] - E[|v|]^2}}$$

已经证明^[8], 在某种假设下, 复包络相关系数

$\rho_{complex}$ 和 ρ_{env} 有以下关系:

$$\rho_{env} \approx |\rho_{complex}|^2$$

$$\rho_{j,j}^{12} = \frac{E[(c_j^{(1)} - E[c_j^{(1)}])(c_j^{(2)} - E[c_j^{(2)}])^*]}{\sqrt{E[(c_j^{(1)} - E[c_j^{(1)}])(c_j^{(1)} - E[c_j^{(1)}])^*] E[(c_j^{(1)} - E[c_j^{(1)}])(c_j^{(2)} - E[c_j^{(2)}])^*]}}$$

式中

$$E[x] = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(i)$$

$$E[xy] = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(i)y(i)$$

1) 信道响应随时间的相关性及小区内信道环境相关性

选 6 条测量路线, 每条测量路线上, 测量时间是 10 min. 此时间内, 接收机在小区内任意漫游, 采集到 200 个信道冲激响应样本. 图 8 给出了 6 条路线中的第 1 个信道响应样本和该路线中所有信道响应样本的相关系数. 在路线 1、2、3、6 中, 1 min 以后 (接收机所处的信道环境已经发生很大变化) 相关系数基本都降到 0.15 以下; 路线 5 中的样本来自 LOS 环境, 在这条路线中信道响应样本的相关系数始终保持在 0.5 附近. 在路线 3、5、6 中, 接收机在第 9 min 又回到出发地点附近, 使得相关系数回升到 0.5 左右.

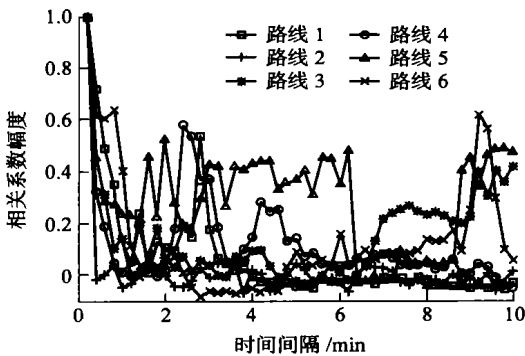


图 8 6 条测试路线上第 1 个响应样本和所有响应样本的相关系数

2) 天线间隔和天线相关性的关系

文献[9]给出了任意入射角(发射角)、任意分布下的天线相关性的表达式. 对该式采用 Jakes' 模型, 假设入射角的概率密度服从均匀分布, 可以简化

同一冲激响应样本 $c_j(i) (j \in [1, 2])$ 中不同径的相关性计算过程为, 第 l 条路径的采样定义

$$c_j^l = c_j(i)$$

在 $l=1$ 时为主径, 在 $l=2$ 时为第 2 条径, 计算这 2 条路径的相关函数如下:

该表达式, 得到必是解. 不同的信道环境下, 信号到达接收机时肯定会呈现不同的散射角度, 室外信道尤其如此. 甚至对于统一的信道环境, 不同的簇(包含多个径)到达接收机时也可能呈现不同的散射角度. 这都会影响天线间的相关性. 选择某次测量的信道响应样本做分析. 该组样本都有很明显的分隔开的 4 个簇. 图 9(a) 显示的是 2 个接收天线接收样本的第 3 个簇之间的相关系数. 该簇入射角度分布比

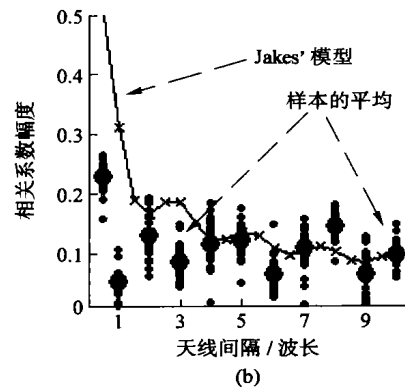
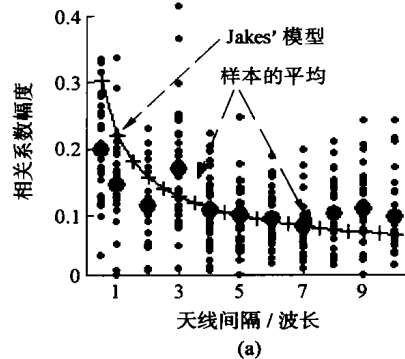


图 9 不同天线间隔下的天线相关性

较宽(可能是近距离建筑物的反射所致), 它与 Jakes' 模型(见文献[7]图 2)呈现了一定的吻合度. 图 9(b)显示了 2 个接收天线整个样本的相关系数. 它与 Jakes' 模型在以较小散射角度入射时的情形相吻合. 总的来说, 当天线间距从 1 个载波波长增大

到10个载波波长时,天线相关性在0.05~0.4之间波动,没有呈现明显变小的趋势。

6 结论

在3.49~3.51 GHz频段内的典型中国城市环境下,地面信号衰落仍服从经典的指数对数衰落。在中度误差($\sigma_x < 10$)下,路损指数在3.1~3.7之间。半径2 km的小区内,r.m.s时延在3~4 μ s之间;典型的办公室环境中,存在直达径时r.m.s时延小于0.1 μ s。在城市环境中,多径现象很明显,主要由高层建筑物引起,并以簇的方式存在。在城市中低速移动条件下(接收机移动速度小于100 km/h)某一强径的生存时间通常超过10 min,但相对到达时间会发生滑动。单一小区内的传播环境具有一定相关性,如果存在直达径,相关性会上升到0.4~0.5。此外,室外、室内的测量结果都可以证明Jakes模型关于入射角分布假设的合理性。当天线间距从1个载波波长增大到10个载波波长时,天线相关性在0.05~0.4之间。

参考文献:

- [1] Zhang Ming, Zhang Jianhua, Jiang Lei, et al. 3.5 GHz broadband propagation measurement in Beijing [A]. The 13th Meeting of the Wireless World Research Forum [C]. Jeju Island, Korea, 2005. 256-261.
- [2] Mercedes S, Manuel G. r. m. s delay and coherence bandwidth measurements in indoor radio channels in the UHF band [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2001, 50(2): 378-390.
- [3] Schulze H. Stochastic models and digital simulation of mobile channels [A]. Proc URSI/ITG Conf Kleinheubach' 88 [C]. 1989. 473-483.
- [4] 穆罕默德 Y E, 阿朴杜拉 A S, 刘元安. 室内2.4 GHz频率上穿透损耗的测量 [J]. 北京邮电大学学报, 2004, 27(2): 98-102.
Mohammed Y E, Abdallah A S, Liu Yuanan. Measurements of in-building penetration loss at 2.4 GHz [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27(2): 98-102.
- [5] Kepler J F, Krauss T P, Mukthavaram S. Delay spread measurements on a wideband MIMO channel at 3.7 GHz [A]. VTC Fall [C]. Vancouver, 2002.
- [6] Sklar B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems I. characterization [J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(7): 90-100.
- [7] 付景兴, 杨大成, 常永宇. 信道相关性对多入多出系统性能的影响 [J]. 北京邮电大学学报, 2003, 26(1): 23-26.
Fu Jingxing, Yang Dacheng, Chang Yongyu. The impact of channel correlation variation on the performance of multiple input-multiple output systems [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2003, 26(1): 23-26.
- [8] Steven H, Hakan I, John K. Result from MIMO channel measurements [A]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002, The 13th IEEE International Symposium on [C]. 2002. 1932-1936.
- [9] Salz J, Winters J. Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio [J]. Vehicular Technology IEEE Transactions 1994, 43(4): 1049-1057.