

无线信道空域特性的实验研究

唐 龚 克

(微波与数字通信国家重点实验室, 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 随着移动通信技术的发展, 特别是智能天线技术的引入, 提出了无线信道的空域(或角域)特性的问题. 本文介绍了信道空域特性的一些实验研究方法和近年来这方面的最新研究成果, 包括一些实验结果和理论分析, 并给出了详细而有条理的引文来源, 希望能够说明个人通信环境下空域传播特性研究的重要性和存在的主要问题. 同时文中还提出了一种新的测量思路, 以克服实验中遇到的困难.

关键词: 空域特性; 角度扩散; 实验研究; 时空联系

中图分类号: TN011.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)08-1138-04

Overview of Experimental Research on Spatial Characteristics of Wireless Channels

TANG Ao, GONG Ke

(State Key Lab. on Microwave & Digital Communications, Dept. of Elect. Eng., Tsinghua Univ, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper reviews the recent studies on spatial characteristics of wireless channels with emphasis on experimental work. Some results and main features of the experiments are introduced, which could be references for further research. A novel experimental method is also proposed to overcome some practical difficulties. It is shown that the emerging high speed wireless communications have put their urgent requirements on more in depth knowledge on spatial properties of wireless channel.

Key words: spatial characteristics; angular spread; experiment research; space time relationship

1 引言

对无线信道的研究一直是一个重要而活跃的领域. 在不同的技术发展时期, 信道研究的侧重点也不同. 如在早期的模拟窄带通信系统中, 我们关心的是信号的幅度或包络. 所以, 我们在研究信道方面十分重视对信号的衰落(Fading)作用. 又如随着数字通信技术逐渐进入到移动通信市场当中, 时延扩散效应所引起的码间串扰问题变得突出了起来, 它的出现可以造成接受信号的严重错乱, 因此, 有关信道时延扩散特性的研究就广泛地开展起来了. 在文[1, 2]中, 对这些发展有很好的论述.

随着移动通信的蓬勃发展, 对系统质量和容量的要求不断提高, 人们也在不断地寻找进一步提高服务质量和扩大系统容量的方法. 空分复用、智能天线等概念的提出与应用是数字移动通信中引人注目的新进展, 它们通过在空间域(角度域)区别不同用户以达到信道的空间(角度)复用和减少用户之间干扰的目的, 从而提高通信容量和质量. 但同时, 这些新思路也对无线信道研究提出了新的挑战. 主要体现在两方面:

(1) 多径传播信号在空间上的分布(即角度扩散问题). 一个简单的示意图如图 1 所示. 由于周围建筑物的反射、透射等效应, 使得到达移动台的来波有很多方向, 形成了角度扩散. 基站天线在收移动台的信号时, 也会出现角度扩散, 不过, 由

于移动台一般比较低矮, 处于很多反射体当中, 因此感到的角度扩散会更明显一些.

事实上, 上述现象的存在是一直人所共知的, 但由于在当时的接收体制下人们不关心来波的方向问题, 因此尚未有充分和深入的研究, 往往只是简单地认为到达功率在水平面内均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 上^[3].

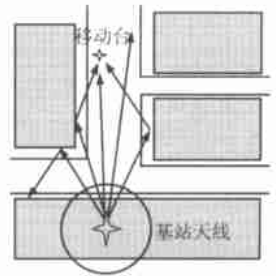


图 1

(2) 时域扩散与空域角度扩散之间的联系. 因为无论是时域扩散还是角度扩散, 其根源都是“多径传播”, 所以从不同的视角观察的“扩散”效应之间应该存在某种联系, 即存在某种“联合分布”特性.

由于空域上蕴含的极大潜力, 近些年人们对信道的空域特性研究热情十分高涨, 得出很多有意义的结果, 这方面文[4]已作了很好的综述. 但到目前为止, 绝大部分是理论或仿真的结果, 实际测量的结果很少. 而由于无线信道的复杂性, 理论与仿真往往难以考虑得很全面, 为了达到比较高的置信度, 实测研究是不可少的. 本文将在介绍、分析已有实验研究成果的基础上, 对今后的研究趋势提出一些看法.

2 角度扩散的主要实测方法及一些实验结果

Fuhl 等指出^[9], 实验获取来波功率在角度上的分布信息主要有三种方法: 高增益定向天线扫描、阵列结合普通 DOA 算法^[24,25]、阵列结合高分辨率 DOA 算法. 这里介绍目前应用较为广泛的两种, 即定向天线扫描和高分辨率的 DOA 算法.

2.1 定向天线扫描法

这种方法的原理直观易懂. 利用高增益天线在 0~360 度的范围内扫描, 从而直接获取功率在角度上的分布^[6,7]. 实验图景简单图示如图 2. 这种方法的最大缺点在于直接测得的结果是受天线方向图影响的. 事实上, 直接测得的功率分布是实际功率分布与天线方向图的一个循环卷积^[8]. 设 $H_m(f, \varphi)$ 为直接测得的来波功率分布, φ 为水平方位角, f 为频率, $F_e(f, \varphi)$ 为定向天线方向图, $E(f, \varphi)$ 为实际功率在方位角上的分布, 则

$$H_m(f, \varphi) = \int_0^{2\pi} E(f, \varphi') F_e(f, \varphi - \varphi') d\varphi' + N(f, \varphi) \quad (1)$$

其中 $N(f, \varphi)$ 代表噪声项. 如果在角度域上作傅立叶变换, ξ 代表空间频率,

$$F_e^{(\xi)}(f, \xi) = \int_0^{2\pi} F_e(f, \varphi) \exp\{-j2\pi\varphi\xi\} d\varphi \quad (2)$$

$$E^{(\xi)}(f, \xi) = \int_0^{2\pi} E(f, \varphi) \exp\{-j2\pi\varphi\xi\} d\varphi \quad (3)$$

$$H_m^{(\xi)}(f, \xi) = \int_0^{2\pi} H_m(f, \varphi) \exp\{-j2\pi\varphi\xi\} d\varphi \quad (4)$$

则式(1)在空间频率域上化为

$$H_m^{(\xi)}(f, \xi) = E^{(\xi)}(f, \xi) F_e^{(\xi)}(f, \xi) + N^{(\xi)}(f, \xi) \quad (5)$$

在测得 $H_m(f, \varphi)$ 并已知 $F_e(f, \varphi)$ 后, 如果忽略掉噪声项, 我们可以对实际来波功率分布的谱 $E^{(\xi)}(f, \xi)$ 作如下估计^[8]

$$E^{(\xi)}(f, \xi) = \frac{H_m^{(\xi)}(f, \xi)}{F_e^{(\xi)}(f, \xi)} \quad (6)$$

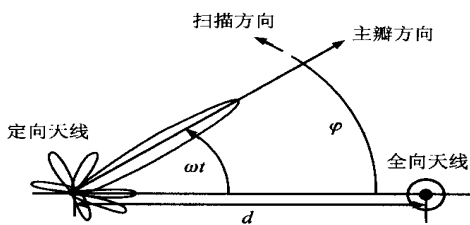


图 2 定向天线扫描法实验图景

目前见到的使用定向天线直接测量的工作主要都是在基站进行的^[6,8].

在文[8]中报道了在大区环境下的测量结果, 使用的定向天线的水平半功率角为 9 度. 为了同时获得时延方面的信息, 采用了一个宽带信道探测器^[9]. 测量环境包括乡村、郊区和城市, 基站定向天线架高分别为 12.3 米、25.8 米和 37.5 米. 载波频率为 1840MHz. 获得的主要结论有:

- (1) 在乡村、郊区甚至很多城市的环境下, 收到的功率主要集中在一个比较小的时延和比较小的角度区间内;
- (2) 使用定向天线, 可以减少时延扩散.

文[8]的作者们还从实测数据中提取了信道的空域参数.

并进而使用带有这些参数的模型对使用了定向天线的 CDMA 系统性能作了仿真^[10].

在文[6]中使用了从全向天线到半功率角仅 5 度的定向天线, 实测环境包括城市中心、乡村空地等室外环境到办公楼、大商场等室内环境. 主要结论有:

- (1) 半功率角为 18.3 度的定向天线就能够将时延扩展减少一半.
- (2) 使用定向天线会使有效空间分集所要求的距离加大.

2.2 高精度 DOA 算法

高精度的 DOA 算法一直是研究的热点. IEEE Transactions. AP 的 1986 年 3 月号总结了当时空间谱估计的成果. 如果使得天线阵列尺寸与来波数目联系的条件得以满足, 也就是说, 对阵列的几何特性的要求得到满足, 则可以解析地得到来波方向^[11,12]. 这类方法的好处在于可以达到高精度, 但缺点是整个系统的制作复杂, 使软、硬件协调工作的校准需要很大的工作量, 而且有时计算量也很大. 使用这种方法的工作主要有文[5,13].

文[5]的主要特色是使用了二维联合 ESPRIT 算法^[14,15], 从而同时获得了方位角和仰角的信息. 与一般实验工作着眼于基站不同, 它是从移动台的角度测量的. 载波频率 890MHz. 主要结论有:

- (1) 验证了街道的波导效应. 发现几乎所有大时延信号都是沿着街道方向来的.
- (2) 证明使用线阵(ULA)结合 DOA 算法估计方向时, 忽视仰角信息会导致错误. 并指出一般在 40 度的仰角范围内就集中了 90% 的来波功率.

文[5]的工作的进一步发展可以在文[16]中找到. 在那里, 作者认为越过房顶向下的信号往往很强, 经测定, 一般有 65% 的功率是仰角超过 10 度的来波带来的.

文[13]的特色在于用圆阵(UCA)代替了线阵(ULA), 这样便于估计仰角方向的功率分布. 中心频率为 1900MHz. 其主要工作在于测量系统的建立和算法的研究, 实测上的工作比较少. 他们用同样的方法对小区、低矮基站天线的情况作了实测研究, 认为在城市小区内, 穿过建筑物的透射可能是主要的传播机制^[17].

3 无线信道时空联合特性实验研究状况

正如引言中所述, 认识信道时域扩散与空域角度扩散之间的联系是人们面临的一个挑战. 为了描述联系, 我们需要能够描述这些现象的参数. 在时域方面, 描述参数是比较成熟的, 我们可以用平均时延扩散(Mean Excess Delay)、时延扩散均方差(mms Delay Spread)等参数^[1]. 在空域描述方面, Durgin 等提出了一个参数 Λ ^[18]. 设 $p(\theta)$ 为来波功率在水平方位角上的分布, 记 $F_n = \int_0^{2\pi} p(\theta) \exp(jn\theta) d\theta$, 定义

$$\Lambda = \sqrt{1 - |F_1|^2 / |F_0|^2} \quad (7)$$

可以看到当功率均匀分布在 0~2 π 时, $F_1 = 0$, $\Lambda = 1$; 当只有一条来波路径时, $\Lambda = 0$. 另外, 文[18]还提出了 Λ 与时域参数的联系, 定义衰落速度的方差

$$\sigma^2 = E \left\{ \left[\frac{dP(t)}{dt} \right]^2 \right\} - \left[E \left\{ \frac{dP(t)}{dt} \right\} \right]^2 \quad (8)$$

$$\sigma = kv\Lambda P_T \quad (9)$$

其中, v 为接收台移动的速度, P_T 是总的平均接收功率. 式(9)说明了一个在确定的地点, 对一个恒速的接收台而言, 它所受的衰落变化的方差与该处的角度扩散成正比.

Patwari 等给出了式(9)实验应用^[18]. 收发都采用低矮天线(1.7 米), 在两条垂直的轴(x, y)上测量衰落变化方差, $\sigma_x^2 = E[(\frac{dP}{dx})^2]$, $\sigma_y^2 = E[(\frac{dP}{dy})^2]$

$$\text{再由}^{[18]} \quad \sigma_s^2 = \frac{1}{2}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \quad (10)$$

可以给出任意方向的衰落变化方差 σ_s^2 , 并根据文[20]中的

$$\Lambda^2 = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sigma_s^2 \quad (11)$$

计算出角度扩散参数 Λ . (式(11)是式(9)在瑞利衰落信道下的结果). 但文[18]中没有并没有直接测量出角度扩散情况以验证其理论.

另一个角度扩散的描述参数 S_φ 是 Eggers 提出的^[6], 定义为

$$S_\varphi = \int_{\varphi} \frac{(\varphi - \bar{\varphi})^2 M(\varphi)}{M_{\varphi, total}} d\varphi = \int_{\varphi-180}^{\varphi+180} \frac{(\varphi - \bar{\varphi})^2 M(\varphi)}{M_{\varphi, total}} d\varphi \quad (12)$$

其中, $M(\varphi)$ 是 S_φ 所要描述的一个在角域上的分布函数, $M_{\varphi, total}$ 是 $M(\varphi)$ 在 $0 \sim 2\pi$ 上的积分. 这种定义在^[21, 22]中也用过. 并指出

$$S_{\varphi, environment} = \sqrt{S_{\varphi, measured}^2 - S_{\varphi, antenna}^2} \quad (13)$$

Eggers 还通过实验总结了 S_φ 与空间分集所需距离之间的关系^[6], 认为 S_φ 很适合于描述从基站角度看到的角度扩散现象.

从以上的结果看来, 目前很需要更多的基于实测的工作来进一步探寻信道的时空联合特性, 验证已有模型的准确程度. 定向天线结合已成熟的滑动相关法^[1, 23]是一条看来比较好的路子. 它的原理清楚, 方法成熟, 能达到较高的分辨率. 它的基本做法是采用定向天线匀速扫描(相当于空域上的一个不断移动的窄带滤波器), 后面接滑动相关法测量设备, 对同一角度上的多径信号再作时延上的区分, 从而获得多径信号在时空上的整个分布图景. 测量系统在角度域上的分辨力主要取决于天线的波瓣宽度, 而在时延上的分辨力则主要取决于滑动相关中的伪码速率. 另外, 天线的扫描速度要比较小, 以保证在滑动相关的一次测量过程中, 天线的指向基本不变.

在具体的实验研制中发现这种方法有以下两个主要难点:

(1) 窄波束定向天线的实现. 在目前研究的热点频率 2GHz 附近, 简单的计算表明, 窄波束定向天线的尺寸将会较大, 从而给制造、实验都带来相当的不便. 另外, 如果采用滑动相关法测时延, 为了达到一定的时延分辨率, 调制用的伪码速率一般都在 40MHz 以上, 这又对天线的带宽提出了要求, 使得像微带天线等的应用遇到一定的障碍.

(2) 收发系统的准确同频. 如果采用滑动相关法测时延, 要求收发严格同频, 一般要求频率稳定度至少达到 10^{-8} 量级. 在室内测量可通过利用电缆解决收发同频, 而在室外小区测量, 就比较难办了, 因为一般的锁相环路是难于达到这样标准的. Eggers 使用铷钟在 1845MHz 的中心频率下实现了收发频差不超过 0.1Hz^[6], 但高精度时钟价格不菲, 大大提高了系统的造价.

清华大学微波与数字通信国家重点实验室在仔细考察和分析了整个实验的目的、要求和过程之后, 提出了在定向天线后直接使用已较成熟的 RAKE 接收机(去掉合并多径的部分)的方案. 我们的仿真结果证明在有较窄波瓣(半功率角 10 度左右)的定向天线的前提下, 同一角度下的时延分量很少, 一般不超过 3~4 条. 典型的仿真结果如图 3, 4 所示, 基站在高楼上(22 米), 移动台在街上移动, 图 3 是存在直达波的情况, 图 4 是不存在直达波的情况, 我们只考虑比最大信号低 30dB 以内的信号, 这在工程上已是足够精细的考虑了. 可以看到, 在一个一定的角度范围内(如 15 度), 最多只有 1~2 个不同时延的信号. 因此使用一个有 6 个抽头的 RAKE 接收(目前已可实现), 就可以完整地获得所需信息. 而且, 现在 RAKE 接收在 2GHz 的中心频率上已能保证约 10^{-8} 量级的收发同频度, 能够达到系统要求. 目前正在实现整个测试系统.

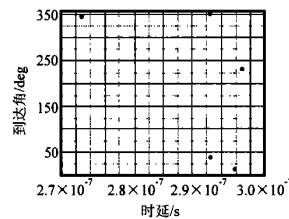


图 3 存在直达波的情形

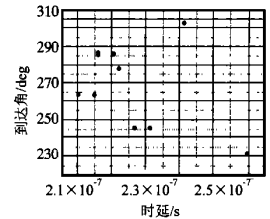


图 4 不存在直达波的情形

4 对今后研究趋势的几点看法

(1) 微小区的空域特性研究是当前和今后一段时间的重点. 这主要是因为智能天线最有可能在小区基站上获得大范围的应用.

(2) 信道的时空联合特性应当受到高度重视. 它比单一地从时域上研究信道要更深一个层次. 同时对联合特性的把握也是实现高速宽带无线传输系统所需重要基础研究.

(3) 多径效应是无线信道的基本特征, 是不可避免的. 但多径分集技术是一个引人注目的变不利为有利的手段. 这里的分集应当包括时间分集和空间分集. 事实上, 衰落或信道扩散的时空联合分布与时空联合分集技术是密不可分的, 只有充分了解了信道特性, 我们才能知道分集可能带来的好处和具体如何分集.

(4) 对各类典型环境的角度扩散情况的实测数据的积累尚不充分, 而这不仅是工程实际十分需要的, 也是深入具体的理论研究所必需的. 例如, 目前发展较快的信道时空统计模型^[26, 27]就迫切需要更充分的实验结果来验证与优化. 因此, 对角度扩散的实测以及对时空扩散的联合测量是应当引起重视的基础性工作.

参考文献:

- [1] T S Rappaport. Wireless Communications: Principles & Practice [M]. NJ: Prentice Hall PTR, 1996.
- [2] 龚克, 赵伟国. 个人通信的传播特性研究 [J]. 1995, 10, 23(10): 76- 80.
- [3] J D Parsons. The Mobile Radio Propagation Channel [M]. New York: McGraw Hill, 1989.
- [4] H B Ertel, A Cardieri, K W Sowerby, T S Rappaport, J H Reed. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems [J]. IEEE Personal Communications, Feb 1998: 10- 22.
- [5] Josef Fuhl, Jean Pierre Rossi, Ernst Bonek. High resolution 3D direction of arrival determination for urban mobile radio [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, April 1997, 45(4): 672- 682.
- [6] P C F Eggers. Angular dispersive mobile radio environments sensed by highly directive base station antennas [A]. in Proc. Personal, Indoor, Mobile Radio Conf., PIMRC 95 [C], Toronto, Canada, Oct. 1995: 522 - 526.
- [7] F Ikegami, S Yoshida. Analysis of multipath propagation structure in urban mobile radio environments [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., July 1980, 28(5): 531- 537.
- [8] A Klein, W Mohr, R Thomas, P Weber, B Wirth. Direction of arrival of partial waves in wideband mobile radio channels for intelligent antenna concepts [A]. In Proceedings of the 46th International Vehicular Technology Conference (VTC '96) [C], Atlanta, 1996: 849- 853.
- [9] T Felhauer, P W Baier, W König, W Mohr. Optimized wideband system for unbiased mobile radio channel sounding with periodic spread spectrum signals [J]. IEICE Trans. Commun., August 1993, E76 B(8).
- [10] J J Blanz, A Klein, W Mohr. Measurement based parameter adaptation of wideband spatial mobile radio channel models [A]. IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings [C], 1996, 1: 91- 97.
- [11] J Lähteenmäki. Radiowave propagation in office buildings and underground halls [A]. in Proc. 22nd Microwave Conf. [C], Espoo, Finland, Aug. 1992: 377- 382.
- [12] A H Abur Bakar, P A Matthiew. Direction of arrival of radio signals inside and outside buildings [A]. in Proc IEEE 44th Veh. Technol. Conf., VTC 94 [C], Stockholm, Sweden, June 8- 10, 1994: 1754- 1758.
- [13] Yvo L C de Jorg, Matti H A J Herben. High resolution angle of arrival measurement of the mobile radio channel [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Nov 1999, 47(11): 1677- 1687.
- [14] M Haardt, M D Zoltowski, C P Mathews, J A Nossek. 2-D unitary ESPRIT for efficient 2-D parameter estimation [A]. in Proc. ICASSP' 95 [C], Detroit, MI, May 1995: 2096- 2099.
- [15] M D Zoltowski, M Haardt, C P Mathews. Closed form 2-D angle estimation with rectangular arrays in element space or beamspace via unitary ESPRIT [J]. IEEE Trans. Signal Processing, Feb. 1996, 44(2): 316- 328.
- [16] A Kuchar, J P Rossi, E Bonek. Directional macrocell channel characterization from urban measurements [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Feb 2000, 48(2): 137- 146.
- [17] Y L C de Jorg, M H A J Herben, J F Wagen, A Mawira. Transmission of UHF radiowaves through buildings in urban microcell environments [J]. Electron. Lett., 1999, 35(9): 743- 745.
- [18] G Durgin, T S Rappaport. Basic relationship between multipath angular spread and narrowband fading in wireless channels [J]. Electronics Letters, 10th December 1998, 34 (25): 2431- 2432.
- [19] N Patwari, G D Durgin, T S Rappaport, R J Boyle. Peer-to-peer low antenna outdoor radio wave propagation at 1.8GHz [A]. IEEE VTC [C], Houston, TX May 17- 21, 1999: 371- 375.
- [20] G D Durgin, T S Rappaport. Effects of multipath angular spread on the spatial cross correlation of received voltage envelopes [A]. IEEE VTC [C], Houston, TX May 17- 21, 1999: 996- 1000.
- [21] F Adachi, et al. Crosscorrelation between the envelopes of 900MHz signals received at a mobile radio base station site [J]. IEE Proc., Oct. 1986, 133, Pt. F(6): 506- 512.
- [22] A A Saleh, R A Valenzuela. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., Feb. 1987, 5(2): 128- 137.
- [23] 赵友平, 龚克. 室内多径时延扩展的实验研究 [J]. 通信学报, 1998, 12, 19(12): 42- 46.
- [24] U Dersch, E Zollinger. Propagation mechanisms in microcell and indoor environments [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. Nov. 1994, 43(5): 1058 - 1066.
- [25] A J Levy. Fine structures of the urban mobile propagation channel [A]. in Proc. Commsphere 1991 [C], Herzliya, Israel, Dec. 1991, 511 - 516.
- [26] K I Pedersen, P E Mogensen, B H Fleury. A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments [J]. IEEE Trans. Vehicular Technol., March. 2000, 49(2): 437- 447.
- [27] T Zwick, C Fischer, D Didascalou, W Wiesbeck. A stochastic spatial channel model based on wave propagation modeling [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Comm., Jan 2000, 18(1): 6- 15.

作者简介:



唐 男. 1977年6月出生于江西省金溪县. 广西壮族自治区桂林人. 1995年9月入清华大学电子工程系无线电技术与信息系统专业, 1999年7月在清华大学电子工程系获工学学士学位. 同年9月免试保送入清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室攻读硕士研究生. 目前主要研究方向为无线信道特性研究. 另外对通信、网络理论, 智能天线, 电磁场数值解法, 射频电路, 微波CAD建模都有相当的兴趣.

龚克 男. 1955出生于北京. 清华大学电子工程系教授, 博士生导师. 1986年获奥地利格拉茨技术大学博士学位, 1987年回国后先后从事毫米波器件与系统及测试技术、点对多点数字微波系统、公共数字无绳电话系统、电波传播、CDMA小区规划工具等方面的研究. 已发表论文100余篇. 历任清华大学电子工程系副主任、系主任, 现任清华大学微波与数字通信国家重点实验室主任, 清华大学副校长.