

未来移动通信的技术挑战和解决方案

朱近康

(中国科学技术大学 个人通信与扩频实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 本文对未来移动通信技术研究中的热门课题进行探讨, 重点就高速高效传输技术的瓶颈、高速编解码的启示、小区结构和无线覆盖的困扰、网络并存和包容的期待等进行论述, 指出它们所面临的挑战和可能的解决方案。

关键词: 未来移动通信; 4G; 高速高效通信技术; 移动小区结构; 移动网络结构和协议

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-006-05

Technical Challenge and Revolution of Future Mobile Communications

ZHU Jinkang

(PCN & SS Lab., University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: This paper discusses key research topics of future mobile communications, analyzes specially technique bottleneck of high speed and efficiency transmission, revelation of high speed coding, obsession from cellular structure and wireless coverage, and harmonization of mobile networks, then points out technical challenge faced and revolutionary new method.

Key words: future mobile communications; 4G; high speed and efficiency techniques; mobile cellular structure; mobile network configuration and protocol

1 引言

第三代移动通信(3G)正在走向成熟,其发展应用前景不容质疑.因此,未来移动通信的研究,越来越被重视,并逐步形成研究热潮.期待数据传输速率高达 100Mbit/s 以上,频谱效率达到 10bit/Hz.s 以上、系统容量是 3G 系统的 10 倍以上、手机集各种功能和应用业务于一身的移动通信技术和系统.

QAM 和 OFDM 结合的正交并行多路高阶调制技术, MIMO 和时空编码结合的空间多路技术,分布式交叉覆盖和异构网络重叠的新型移动小区结构和相关技术等,是很有潜力的未来移动通信技术.

QAM 的高阶调制不需要扩展频带,是实现高速传输的重要手段.但传输速率仅随调制阶数对数增长,调制阶数更大增加对速率增长的贡献会变小.并行多路传输对速率的贡献按线性增长,对提高传输速率更为有效. OFDM 采用 FFT 快速变换,可以一次处理几千路数据并行高速传输,但以增加频带资源为代价.因此, QAM 和 OFDM 结合的传输技术,是一项很有前景的未来移动通信技术.

采用多天线、时空编码的技术, 3G 已开始采用.如果有 M 个发送天线 M 个接收天线,各收发天线间的传输特性相互独立,能提供的最大信息传输能力将增加 M 倍.当然,各收发天线间的传输特性完全独立是很难自然存在的,因此引入时空编码,帮助构建各自独立信道.进一步把时空编码扩展为多维

编码,实现多重分集,提高接收信号信噪比,增强抗干扰能力.这些是未来必不可少的技术.

目前的移动通信系统,包括 3G,是采用蜂窝小区实现无缝无重叠覆盖的体系结构,是基于单基站独立收发、相互不干扰的体系结构,会造成信号功率浪费,并形成干扰.对低功率微小小区大容量移动通信十分不利.因此,研究分布式基站密集覆盖、各信号交叉重叠的新型小区结构,对未来移动通信非常必要.异构网络的重叠应用已经开始出现,将来不仅是地面异构网络的重叠,还有空间和地面网络的重叠,实现无处不在的移动网络覆盖和各种系统的并存与包容,是未来移动通信又一显著特征.

这些技术的实现和应用,还面临诸多技术困难和挑战.分析和研究它们,进而提出解决之道,十分重要.本文将就高效高速传输技术的瓶颈、高效编解码的启示、小区结构和无线覆盖的困扰、网络并存和包容的期待等进行论述,提出相关技术的可能走向和解决方案.

2 高效高速传输的技术瓶颈

未来移动通信的高效高速传输技术,以 QAM、OFDM 和 MIMO 技术为代表,最有前景. QAM 是高阶调制在相位和幅度上同时进行.传送 $(\log_2 M)$ bit 数据的 M ary QAM 的调制,随着 QAM 调制阶数 M 的提高,调制信号状态的差异和距离就急剧减小,提高了解调难度.在移动通信衰落信道中,接收的

QAM 调制信号为:

$$r_i(t) = h_i(t) * S_i(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $s_i(t)$ 是发送的 QAM 信号, $h_i(t)$ 是信道转移函数, $n(t)$ 是高斯白噪声。显然, 信道的传输特性起伏不定, 引起信号幅度起伏和相位抖动, 对高阶 QAM 信号的解调, 要确定检测门限, 变得极其困难, 容易造成解调差错。为了正确解调, 这就需要信道估计, 否则不能可靠通信。

OFDM 是一种并行传输技术, 众多子载波同时被大量数据调制传送, 实现高速通信。它与其他并行传输技术(如 TDM、CDM)明显不同的, 是只对一个子载波取一个样点、各子载波样点完全正交而不干扰。在众多正交子载波上同时进行调制的 OFDM 信号, 经 IFFT 变换成时域信号发送, 为:

$$S(t) = \sum_{\ell=1}^K \left(\sum_{i=1}^K a_i e^{-j\omega_i t} \right) \cdot e^{-j\omega_c \ell} \quad (2)$$

其中, $\omega_i = i\Delta\omega$, $\Delta\omega$ 为正交子载波间隔, a_i 为 QAM 调制信号, K 为正交子载波数。信号经过移动衰落信道, 接收信号为:

$$r(t) = \sum_{\ell=1}^K h_c(t) \left(\sum_{i=1}^K a_i e^{-j\omega_i t} \right) e^{-j\omega_c \ell} + n(t) \quad (3)$$

显然, 由于接收解调的 FFT 变换, OFDM 信号受移动衰落信道影响, 不同时刻的起伏变化将分散到每个子载波信号上, 影响对各子载波信号的解调, 给 OFDM 的解调带来极大困难。

MIMO 技术是又一新兴技术, 利用多天线发送多天线接收实现并行传输。输出用 M 个天线送出 M 组数据 D , 经移动衰落信道传输, 到有 M 个天线输入 M 组数据 R 的接收端, 收发关系如下:

$$R = WD \quad (4)$$

W 是信道转移矩阵。如果 W 存在逆矩阵, 则有:

$$D = W^{-1}R \quad (5)$$

能准确解出送到接收端的并行数据。如果不存在逆矩阵, 还有处理方法, 至少能给出近似解。但是, 对衰落信道而言, 准确给出信道转移矩阵相当困难, 那 MIMO 信号的求解也就相当困难。

综上所述, 未来移动通信的高速高效传输技术, 取决于信道估计。信道估计准确及时, 这些技术的性能就可充分发挥, 反之亦然。因此, 信道估计成为未来移动通信实现高速高效传输的技术瓶颈。

由于信道估计的重要性和关键性, 已有众多研究和积极成果。无线信道的估计和预测可分成三类: 基于信道统计特性的均方估计, 基于信道平稳特性的实时估计, 基于信道传输特性的精细估计。

基于信道统计特性的均方估计, 是把信道参数的衰落起伏看成一个随机变量, 通过统计分析, 给出统计分布特性、均值和方差, 作为信号设计和信号检测与判决的依据。现在的信道均衡滤波器, 就是平衡和抵消无线信道的衰落和起伏, 使接收输出信号受到的影响尽量低。这种方法只有在移动速度不快、传送速率不高、解调要求不高的场合有效。

基于信道平稳特性的实时估计, 是在给定时间间隔内对信道的衰落平稳性和随机性进行估计, 获得给定时间间隔内

的信道衰落起伏参数。只要给定的时间间隔(或频率、相位间隔)小于信道相干时间(或相干频率、相干相位)的 $\sqrt{2}$, 认为信道参数能被正确估计。收发端利用这些估计参数, 实时调整, 与信道衰落起伏相匹配, 实现最佳收发, 如图 1 所示。

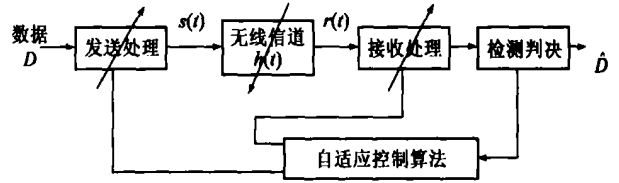


图 1 针对信道衰落的自适应收发技术

未来移动通信实现高速高效传输, 在快衰落信道传输环境下, 希望能对信道传输特性作精细估计和预测。对信道作精细估计, 主要涉及信道冲激响应、信道转移矩阵等信道特性的准确参数估计; 信道传输时延、多普勒频移、波束偏差、功率起伏等信号的精细参数估计。目前实现信道的精细估计, 通常以提高估计滤波器的阶数和扩大估计空间维数来实现, 从而得到性能改善。把盲估计方法与有导频(pilot)和参考信息的估计方法结合起来, 是实现精细估计的又一途径。盲估计给出信道参数的统计平均结果, 基于这个结果, 再利用导频信号或其他参考信息, 得到精细估计。最近, 我们把基于 OFDM 信号周期平稳特性的信道盲

估计和基于 pilot 动态插入的信道估计方法结合起来, 使用较少的 pilot 子载波可实现较高精度的信道估计, 达到 QAM-OFDM 的解调要求。图 2 给出了 16QAM、2048 OFDM、终端速率 20Mbps、在衰落信道环境下使用 16 个 Pilot(不到 OFDM 资源的 0.8%) 获得的信道估计性能。

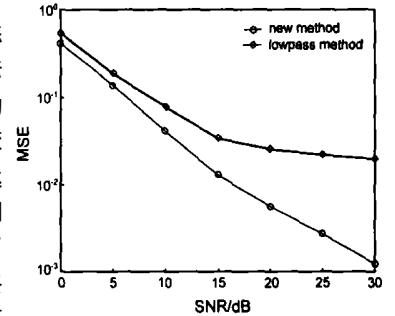


图 2 用少量 Pilot 信号的综合信道估计性能

因此, 未来移动通信的热门传输技术, 如 QAM、OFDM、MIMO 等, 其性能的充分发挥和实际应用, 严重依赖对移动衰落信道的估计能力。精细信道估计是未来移动通信实现高速高效传输的解决之道, 必须深入研究和解决。

3 高效编解码的启示

信道编解码技术是移动通信又一关键技术。2000 年 IEEE Spectrum 杂志对 21 世纪初期十大信息技术发展预测时, 特别列出信道编解码技术, 它对将来的信息通信有至关重要的作用。

从早期的 BCH 编码, 到卷积码, 到现在的 Turbo 码和 LD-PC 码, 其共同特点是: 有意设置多余冗余, 使数据 bit 与多个编码 bit 有关, 用多个编码 bit 状态作为数据 bit 是否正确的判决参考, 用于检错和纠错; 用相互正交的生成矩阵 G 和检验矩阵 H , 建立发送数据 bit 与解码判决 bit 之间的双向关系。

使用多次迭代处理, 逐次修正改进解码结果, 最终实现最

大可能的正确解码,逼近解码的香农极限.未来移动通信技术中特别关注的LDPC码,如图3所示,检验矩阵为稀疏矩阵,采用接收bit与检验bit的双向关系和 $HR^T=0$,推断接收信号是否有错,逐次迭代,实现纠错.

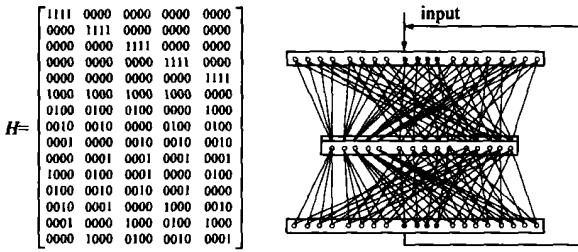


图3 一个LDPC码检验矩阵和相应的解码迭代处理

编解码技术,和调制解调技术一样面对无线移动衰落信道,但它实现准确解码并不特别依赖对信道模型的了解和对信道参数的估计,而是采用交织、卷积、交错和迭代等方式,把数据bit分散在众多编码bit上,使它的差错风险分散到多个编码bit.解码时,对多个编码bit与数据bit的编码对应关系是否符合进行多次迭代比对、修正,直到收敛、聚焦,最后做出解码判决.这一成功范例,是高速高效传输处理中,对移动衰落信道难予作到精细估计,也能进行准确解调的重要启示.

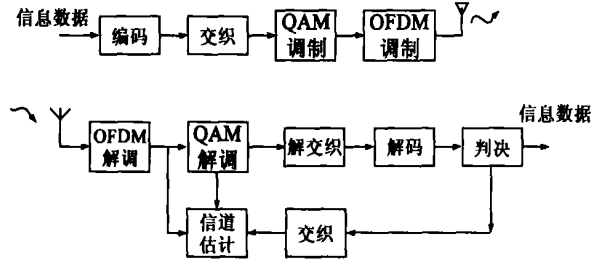


图4 Turbo接收原理图

近几年发展起来的Turbo接收技术,又称迭代接收(Iterative receiver)技术,是一项新兴技术. OFDM Turbo接收原理如图4所示.引入迭代处理到信道估计和数据解调中,最终收敛到最好结果.图5给出了采用Turbo接收的性能改善,迭代处理4次,解调性能与理想情况比较,已相差很小,仅0.2dB,达到满意结果.

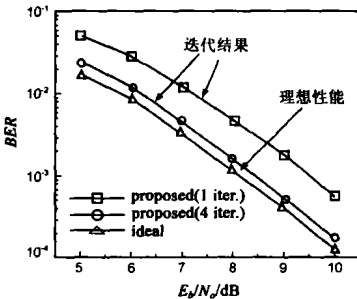


图5 采用Turbo接收的性能改善

把时空码(space-time code)引入到MIMO系统中应用,把定点定时的一次数据调制关系,改变为前后时间相关、空间相关的编码调制关系,经过迭代处理,可以获得相当好的传输性能.正交时空码还可改善传输信道的衰落不确定性,保证信道传输的正交性和可分集性,提高通信性能.

这些成果表明,Turbo接收、时空编码和分集合并是有极大应用前景的信号处理技术.但现有的研究进展,还没有充分利用和反映现代编码采用的多种有效手段,因此有必要进一步研究能充分体现编解码突出特点的、能分散数据到较多的信号点、有固定处理关系和准确判决准则、适合迭代运算和逐次逼近的新型通信方式和信号处理方法,不依赖对信道的精细估计,实现高效高速通信.

4 小区结构与无线覆盖的困扰

小区结构和无线覆盖是移动通信的基础,蜂窝小区结构是在20世纪50年代由美国BELL实验室提出,60年代开始在移动通信系统中应用的,至今仍然是移动通信组网的基础.

蜂窝小区结构,采用紧密拼接的正六边形,即蜂窝结构,实现在有限频率情况下无缝隙覆盖任意区域:移动用户在小区内(和小区边缘),与区内中心的基站无线收发,实现双向通信.各小区基站与基站控制器相连,进而与移动交换中心连接,从而接入整个通信网络.因此,蜂窝小区结构支持集中式通信处理系统,小区间各自独立、单一收发.由于各小区紧临而互不交叉重叠,小区基站发送的信号会传输进入邻近小区,造成浪费,形成干扰,不利提高系统容量和效率.随着未来多天技术,分布处理技术和网络技术的发展,会出现充分利用这些新技术的新型小区结构和无线覆盖方法,具有分布式处理、多无线收发、

小区间重叠的特点,如图6所示.分布式基站和分布式覆盖,是近年为实现微蜂窝小区结构,提高系统容量发展起来的新方式.采用这种技术方式,使移动

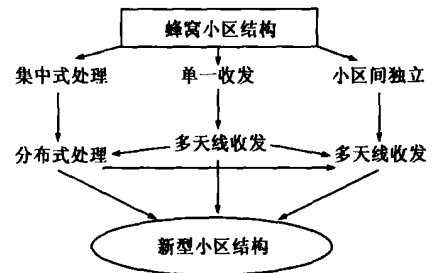


图6 移动通信小区结构发展趋势

通信系统扩大容量、调整覆盖、改善性能、节省投资都极其有效和方便.由于覆盖灵活,可简化到基站无线前端延伸到不同覆盖点,成为现有移动通信的微小区覆盖组网新方式,开始得到广泛应用.

Ad Hoc网络技术和无线网状网络(Wireless Mesh Networks)技术,是近年发展起来的,与小区结构和无线覆盖有关的组网技术. Ad Hoc网络的移动终端(或部分终端)具有路由功能,可通过无线连接构成任意的网络拓扑,形成无中心和自组织、自动连接配置和网络拓扑展开、多跳转发、重叠交叉的无线覆盖等特点.但是,组网开销大,频带效率低、安全性差等是致命缺点,很难作为主流组网技术应用,但在终端网络上有应用前景.无线网状网络是把IP网协议和构架延伸到无线移动网,网络协议和组网特点与Ad Hoc网络技术有极大的相似性,实现自组织、自我管理、自平衡.无线网状网络的不足也是频带效率低、安全性差.尽管2004年美国“Telecommunications”杂志把这项技术称为本年度的十大热门技术之一,应用在有线光网络结构中,有更好的前景.

尽管它们不大会成为未来移动通信的主体网络技术, 但有一点值得研究和借鉴, 即无线信号交叉重叠覆盖, 分布式结构, 相互支持合作的低功率信号应用. 如果加以一定约束和规范, 不仅在终端节点, 基站系统也可一并考虑, 有可能提出新型小区结构和无线收发系统, 满足未来移动通信的需要.

5 网络并存和包容的期待

异构网络的并存和兼容, 现在第二代移动通信系统中已经开始出现, 第三代系统会进一步应用. 如果用户仅用一个移动号码(和终端)可在任何地方接入任何运营网络, 用户通信将十分方便, 提供运营服务也更为灵活. 第三代移动通信标准制定时期, 面对多项技术和系统建议与利益需求, 曾希望能融合成一个标准版本. 经过诸多奋斗, 结果没有实现. 由于无线接入网的介入, 将来运行的移动通信系统和设备会更多. 可以预计, 未来移动通信系统, 不可能是单一标准的系统, 会有多种标准化建议和多种技术登场. 未来移动通信必须考虑不同系统之间的并存和融合, 不怕重叠和交叉, 不怕有多种制式和标准. 为此, 我们

提出未来移动通信网络的新型总体框架结构, 如图 7 所示, 在整个网络总体结构下发展各自的系统, 实现不同系统和标准的并存和包容.

未来移动通信网络的总体结构, 建议由高速核心网, 运营专用网, 无线接入网, 和终端用户网组成, 如图 7 所示. 高速核心网, 是整个网络的骨干, 连接

下层子网, 支撑整个网络. 运营专用网, 是网络的子集, 可以是业务运营网, 可以是部门专用网, 可以是功能社区网, 在高速核心网支持下, 功能齐全、结构完整、独立运行. 无线接入网, 是无线移动通信的主体, 可以是蜂窝小区网, 可以是多点接入网, 可以是分布交叉小区结构的无线网. 只要接入网络的接口一致, 不同无线系统和网络就可并存和兼容. 终端用户网, 是未来移动通信的突出特点. 一个随用户移动和近距离通信、可以自组织的个人网络, 能根据不同接入系统, 实现入网通信.

未来移动通信网络结构的复杂性和多样性, 支持网络运行的协议和管理软件将十分重要. 为此, 我们建议, 未来移动通信要在网络协议的信道设置中增设管理信令信道, 形成有管理信令信道(网络管理、网络连接、网络维护等), 业务信令信道(用户管理、接入与释放、漫游与切换等), 业务通信信道

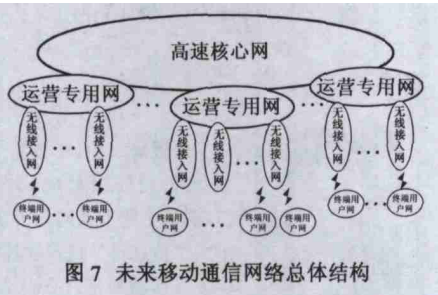


图 7 未来移动通信网络总体结构

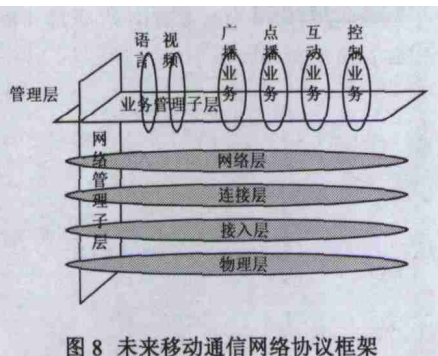


图 8 未来移动通信网络协议框架

(业务传输)的信道结构. 因此, 增加网络管理层(网络管理子层和业务管理子层), 形成如图 8 所示的未来移动通信的网络协议结构. 它把业务链路建立和业务传输协议、与网络管理和网络连接分开, 把业务对网络的需求、与物理传输能力和接入协议分开, 有利于不同无线异构网络并存和包容.

6 结语

未来移动通信技术和系统的研究发展. QAM、OFDM、MIMO 等技术被特别看好, 很可能成为主流技术, 但它们的性能发挥和有效应用, 面临诸多技术挑战, 本文对此提出了可能的解决方案. 首先指出, 需要准确估计信道, 提出了可能的技术途径和初步研究成果. 其次, 论述了发展 Turbo 接收(迭代接收)技术, 把数据分散到较多信号点、采用逐次逼近的处理方法, 实现高效高速通信.

未来移动通信提高系统容量和传输效率的另一重要技术方向, 是研究分布式、多天线、交叉重叠的新型小区结构和基站, 提出了加以一定约束和规范分布式收发系统和结构, 是有效的技术方向.

未来移动通信, 会采用不同系统和不同技术, 为此, 提出了未来移动通信网络总体结构和协议框架, 建议增设管理信令信道、和网络管理层, 有利于无线异构网络并存和多种业务的管理和运行.

参考文献:

- [1] T S Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. USA: Prentice Hall PTR, 1999.
- [2] H Kobayashi, T Fukuhara, H Yuan, Y Takeushi. Proposal of signal carrier OFDM technique with adaptive modulation method [A]. IEEE VTC 03 spring, 22-25, April [C]. IEEE, 2003.
- [3] G L Stuber, J R Bany, S W McLaughlin, Y Li, M A Ingram, T G Pratt. Broadband MIMO-OFDM wireless communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 271-294.
- [4] S Chang, E J Powers. A new estimation scheme for frequency and timing offsets in OFDM systems. IEEE VTC Fall, 24-28, Sept [C]. IEEE, 2000.
- [5] A Goldsmith, S A Jafar, N Jindal, S Vishwanath. Capacity limits of MIMO channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas on Communications, 2003, 21(5): 684-702.
- [6] N A Dhaic, C Fragouli, A Stamoulis, W Younis, R Calderbank. Space time processing for broadband wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9): 136-142.
- [7] G B Giannakis, Y Hu, P Stoica, L Tong. Signal Processing Advances in Wireless and Mobile Communications[M]. USA: Prentice Hall PTR, 2002.
- [8] S Wu, Y Bar-Ness. OFDM channel estimation in the presence of frequency offset and phase noise[A]. IEEE ICC' 03, 14-15, 2003 [C]. IEEE, 2003.
- [9] Shengli Zhang, Xingzai Lv, Jinkang Zhu. A new channel estimation method based on parametric channel model in UL OFDM systems[A]. IEEE WCNC, 13-15, March, 2005 [C]. USA: IEEE, 2005.
- [10] Erico Guizzo. Cbsing on the perfect code[J]. IEEE Spectrum, 2004, 41

- (3): 28– 34.
- [11] Sergio Benedetto, Guido Montorsi, Dariush Disalar. Concatenated convolutional codes with interleavers [J]. IEEE Trans Communications, 2003, 41(8): 102– 108.
- [12] Tom Richardson, Rudiger Urbanke. The renaissance of gallager's low-density parity check codes [J]. IEEE Communications, 2003, 41 (8): 102– 108.
- [13] S Y Park, Y G Kim, C G Fang. Iterative receiver for joint detection and channel estimation in OFDM systems under mobile radio channels [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2004, 53(2): 450– 460.
- [14] Engling Yeo, Borivoje Nikolic, Venkat Anantharam. Iterative decoder architecture [J]. IEEE Communications, 2003, 41(8): 102– 108.
- [15] Ben Lu, Xiaodong Wang. Iterative receivers for multiuse space time coding systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 2000, 18(11): 2322– 2335.
- [16] Sudhaman K Jayaveera, H Vincent Poor. A RAKE Based iterative receiver for space time block codes multipath CDMA [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 52(3): 796– 806.
- [17] Francesco Saverio Ostuni, Bilal Abdool-Rassool, Mohammad Reza Nar Khai, Hamid Aghvami. Layered space time codes with iterative receiver and space time soft output decoding in a rayleigh fading environment [A]. IEEE PIMRC' 02, 15– 18, Sept, 2002 [C]. IEEE, 2003.
- [18] Manyuan Shen, Huaning Niu, Hui Liu. Iterative receiver design in rayleigh fading using factor graph [A]. IEEE VTC' 03 spring, 22– 25, April, 2003 [C]. IEEE, 2003.
- [19] Richard Demo Souza, Javier Garcia-Frias, Alexander M. Haimovich. An iterative receiver for joint data detection and decoding for space time coded data over unknown quasi-static ISI channels [A]. 2003 Conference on Information Sciences and Systems, 12– 14, March, 2003 [C]. USA.
- [20] Jie Wu, Ivan Stojmenovic. Ad hoc networks [J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 29– 31.
- [21] Bangnan Xu, Sven Hischke. The role of Ad hoc networking in future wireless communications [A]. IEEE ICCT' 03, 9– 11, April 2003 [C]. IEEE, 2003.
- [22] Prasant Mohapatra, Chao Gui, Jian Li. Group communications in mobile Ad hoc networks [J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 52– 59.
- [23] Liang-Liang Xie, P R Kumar. A Network Information Theory for Wireless Communication: Scaling laws and optimal operation [J]. IEEE Trans on Info. Theory, 2004, 50(5): 748– 767.
- [24] Jangeun Jun, Mihail L Sichitiu. The nominal capacity of wireless mesh networks [J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2003, 10(5): 8– 14.
- [25] 朱近康. 对 3G 和后 3G 发展的思考 [J]. 移动通信, 2003, 7(16): 42– 45.
- [26] 朱近康. 无线信道的应用模型和估计 [J]. 中兴通讯技术(增刊), 2003 年 10 月: 33– 35.
- [27] 朱近康. 个人通信的研究发展和面临的挑战 [J]. 电信科学, 2001, 17(2): 18– 20.
- [28] 朱近康. 移动通信发展的启示和应对之道 [R]. 2004 年全国无线移动通信学术会议, 2004. 8– 31.

作者简介:



朱近康 男, 中国科学技术大学教授、博士生导师, 曾任国家 863 计划通信主题专家组成员、通信主题个人通信专家组组长, 中国科学技术大学信息科学技术学院常务副院长等, 主要从事无线移动通信, CDMA 与扩频通信, 通信信号处理, 无线通信网的研究, 出版有四本专著, 发表 120 多篇论文, 申请和授权发明专利 18 项. E-mail: jkzhu@ustc.edu.cn.