

智能天线在无线通信中的应用分析

崔炎

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

TN92 B

摘要

为了在复杂的电磁传播环境中保证信号传输的可靠性,智能天线技术逐渐得到人们的广泛关注。智能天线的概念使得天线从传统的单一场路转换器件发展成具有一定信号处理功能,并和接收机后端处理紧密结合的天线系统。本文介绍并分析了传统自适应天线及时空二维信号处理技术在蜂窝系统中的应用,对用于时分多址系统的自适应波束形成器及用于码分多址系统的 2D RAKE 进行了仿真,并通过仿真说明了基于时空二维处理的智能天线系统在性能上的优越性。

关键词 蜂窝通信 智能天线 TDMA CDMA

1 引言

无线通信的一个突出的特点就是信号传播环境的复杂性,如何在复杂的信号传播环境中改善信号的接收性能是无线通信系统设计者所考虑的主要问题之一。传统的接收信号处理算法均在时域或频域中进行,而天线只作为单一的场路转换器件存在。但是随着系统性能要求的不断提高,如何利用新的信号处理维度对接收信号进行处理成为亟待解决的问题,为此传统的单一天线结构已不能满足系统的要求。从 20 世纪 90 年代起,工程技术人员在蜂窝通信的天线设计中引入了很多新的概念,其中,尤为重要的就是智能天线技术。智能天线技术的出现使得天线从传统的单一场路转换器件发展成具有一定信号处理功能,并和接收机后端处理紧密结合的天线系统。本文首先分析

资源的优势而成为目前宽带数据接入的主流技术。采用 IP 协议是由于基于 IP 的业务已经是人们的最大需求,而 ADSL 又特别

了传统自适应天线在 TDMA 系统中的应用。在此基础上,介绍了基于时空二维信号处理的智能天线在无线系统中的应用,并对 2D RAKE 接收机进行了仿真,对它的性能进行了分析。

2 无线通信系统的信号环境

无线通信系统设计所面临的最大问题就是信号传播环境的复杂性和由此引发的干扰的多样性。当前,为了提高系统频率资源的利用率,民用通信系统均采用蜂窝结构。在蜂窝系统中,对目标信号而言,主要存在如下几种干扰:(1)传输符号间的串扰(ISI);(2)信号的多径传播所带来的干扰(MPI);(3)多址接入所带来的用户间的互相干扰(MAI);(4)使用相同频率资源小区间的互相干扰。这四种干扰的存在成为限制系统性能的主要因素。其中传输符号间的串扰可以用时域均衡进行抑制,但对于

适合提供宽带 Internet 接入。两者的结合不仅符合目前电信市场需求,同时也与电信技术发展方向相一致。

Implementation of an ADSL Access System Based on IP Technology

Lin Dong, Qi Wenyu, Guo Hong

(University of Information Engineering, PLA, Zhengzhou 450002)

Abstract This paper introduces an ADSL system, which is based on the IP technology. The emphasis is on the key methods of realization and architecture of the whole system. At last, it gives the characters of the system.

Key words ADSL, IP, access

(收稿日期:2002-01-30)





其它3种干扰,仅仅依靠单独的时域或频域处理无法将其有效抑制。除了干扰的多样性外,无线通信系统设计的另外一个不利因素就是信道的时变特性,这使得为保持信号的最佳接收性能,我们必须动态地调整接收机的参数,实现自适应接收。无线传输的多径效应和信道的时变特性使得接收信号呈现随机抖动,这种现象称为小尺度衰落(small scale fading)或多径衰落(multipath fading)。此外信号的多径传播和用户的移动还会造成信号在时域和频域上的扩散(dispersive)。通常我们可以用最大延迟扩散(maximum delay)和信道的相干带宽(coherent bandwidth)对无线信号在时域上的扩散进行描述;用多普勒频移(doppler shift)和相干时间(coherent time)对无线信号在频域上的扩散进行描述。为了对无线系统的性能进行定量的分析,我们需要建立相应的信道模型。这个模型必须包含上面提到的衰落、扩散效应和信道的时变特性。此外这个模型还要综合考虑无线信号的传播损耗(distance loss)和阴影效应(shadowing effects)。如果我们要在系统中采用多个接收或发射天线,还需将信道模型扩展为矢量信道模型。一个满足上述要求的通用矢量信道模型可以表示如下:

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^K \rho_k(t) \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_{k,l}(t) e^{j\phi_{k,l}(t)} \delta(\tau - \tau_{k,l}(t)) \mathbf{a}_{k,l} \quad (1)$$

其中, k 为用户标识, K 为小区中的用户数目。 $\rho_k(t)$ 描述了无线信号的传播损耗和阴影效应,它服从对数正态分布(lognormal distribution),即 $10 \lg \rho_k \sim N(-e \cdot 10 \lg \gamma_k, \sigma^2)$ 。其中 e 为路径损耗因子,在蜂窝系统中一般取值为4, γ_k 为第 k 个用户与基站间的距离。 σ^2 根据具体环境的不同而不同,典型取值为6~12 dB。 $\alpha_{k,l}$ 描述了第 k 个用户的第 l 条传播路径的幅值增益。在用户与基站间不存在直接传播路径时, $\alpha_{k,l}$ 的一种典型的分布为Rayleigh分布。 $e^{j\phi_{k,l}}$ 描述了第 l 条路径相位偏移, $\phi_{k,l}$ 可认为在 $[0, 2\pi)$ 间均匀分布。 $\tau_{k,l}$ 描述了第 l 条路径的延迟, $\tau_{k,l}$ 可认为在 $[0, \tau_{\max}]$ 间均匀分布。 $\mathbf{a}_{k,l}$ 为天线阵对第 l 条路径传播信号的接收向量。在一些应用中,我们将 $\alpha_{k,l} \rho_k(t) e^{j\phi_{k,l}}$ 和 $\mathbf{a}_{k,l}$ 合并成一项,仍记为 $\alpha_{k,l}$,称为第 l 条路径的复合信道响应矢量。

3 自适应波束形成器及传统阵列信号处理技术在蜂窝系统中的应用

自适应波束形成器(又称自适应天线),是指能够根据空间信号环境的变化动态地改变自身的参数,从而达到最优接收性能的天线系统。这项技术的发展已经将近40年,早期的自适应天线主要用于雷达和声纳中对杂波信号和干扰信号进行抑制。

波束形成技术是一种空域处理,在较为简单的信号环境下,它能够有效地抑制窄带无线系统中的干扰。根据波束形成所使用的辅助信息,我们可以将波束形成器分为基于信号空间来向

(DOA)的自适应波束形成器(DOB),基于参考信号的自适应波束形成器(TRB)和基于信号结构的自适应波束形成器(SSBF)。一个 M 元波束形成器可以在 $M-1$ 个干扰方向上形成零点,或者获得 M 重分集增益。在不同的情况下,不同结构的波束形成器有其自身的优缺点。波束形成器的性能由信号传播、干扰环境及用户的移动速度决定。

基于信号空间来向的自适应波束形成器的典型应用环境是信号来向扩散较小的情况。这种方法通过直接在干扰方向上形成零陷的方法改善目标信号的接收。这种方法的基础是信源的DOA估计。一旦我们通过某种方法得到了信号空间来向的估计(或者可以等效的获得阵列接收向量的估计值),我们就可以利用一些最优波束形成准则进行波束综合。在一般情况下,可以通过下式计算阵列的接收权值

$$\mathbf{w}_k = \beta \mathbf{M}^{-1} \mathbf{a}_k^H \quad (2)$$

其中 \mathbf{a}_k 为目标信号的阵列接收向量, \mathbf{M} 为干扰及噪声协方差阵。我们把式(2)表示的波束综合技术称为最优波束形成技术,又称Capon波束形成。采用最优波束形成技术能够在阵列输出端得到最大的信干噪比。DOB最大的局限就是其有效性要受到阵元数目的限制,即信源数(包括干扰信号)要严格小于天线单元的数目,并且有限天线口径使得形成波束的宽度往往达不到分割信号的要求。

基于训练信号的自适应波束形成器是一种计算有效、性能良好的方法,而且这种波束形成器无需信源的空间来向和阵列空间信息,因而这种波束形成器的实际应用最为广泛。接收端参考信号的获取一般有两种方法,一种是在发送信号中插入一些事先已知的训练信号,或事先发送一些导引信号来获得参考信号。这种方法具有良好的鲁棒性,但它要以牺牲一定的频谱利用效率为代价。此外这种方法还需要进行载波同步,在存在较强共信道干扰的情况下,这往往是很难做到的。另外一种方法是以检测出来的字符重新构造信号作为参考信号,很显然,这种方法对最开始的信号检测依赖是很强的,因此采用该方法时,常常对开始的若干的字符进行可靠性较高的传输。

图1给出了基于参考信号的自适应波束形成器的组成框

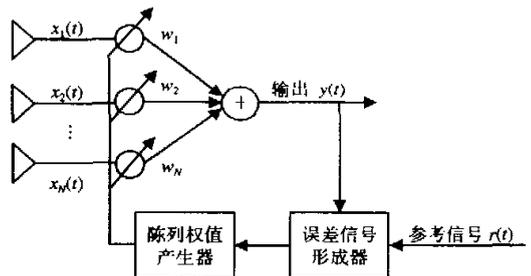


图1 TRB原理框图

图：如何由误差信号形成最优权是由 TRB 所采用的准则确定的。TRB 常用的准则有最小平方准则 (LS)、最小均方误差准则 (MMSE)。最小平方准则采取对整块数据进行一次处理的方法形成最优权值，它适用于采用突发结构 (burst) 进行传输的情况，在每个数据块中均插入了训练信号。很多实际通信系统如 IS-54、GSM 都是这种情况。基于参考信号的自适应波束形成器与基于信号空间来向的波束形成器有着显著的不同，TRB 并不是像 DOB 那样通过在干扰方向上形成零陷对干扰进行抑制，而是通过使阵列输出与参考信号的差异性达到最小来实现对干扰信号的抑制。在某些情况下，TRB 与 DOB 从综合出结果是类似的，但这并不能掩盖它们的基本差别。在对一个延迟群内的干扰进行抑制时，TRB 实际上是一种基于空间标识的处理方法。

基于信号结构的自适应波束形成器 (SSBF) 通过利用信号的时域或频域结构构建波束形成器。无线通信信号经无线信道传输后其自身的一些特有特征将会被破坏，此时的波束形成器则力图恢复信号所特有的特性。其中一个最为典型的应用是针对若干恒包络调制信号提出的恒模算法 (CMA)。SSBF 无需任何先验信息，因此是一种盲波束形成方法，这是它的最大优点。

总的来说，波束形成技术是一种纯空域处理技术，它仅利用空域自由度对干扰进行抑制，因此其有效性要受到天线单元数的限制，在较为复杂的无线信号环境下，它的实际应用十分有限。从这个角度考虑，将波束形成器单独使用以改善蜂窝系的性能是不合适的。

4 智能天线在码分多址系统中的应用

传统的通信信号处理在时域或频域中进行，但是可以证明当接收端的采样速率为传输字符速率时，单独时域处理无法同时消除 ISI 和 CCI。尽管从理论上讲，采用时域过采样技术可以同时消除这两种干扰，但是在存在 CCI 的情况下，效果并不理想。然而，当接收端以传输字符速率为采样速率时，只要阵元数足够多，从理论上讲可以同时消除掉 ISI 和 CCI 的。但在实际的系统中，不论从成本的角度，还是从实际实现的角度，我们都不可能采用过多的阵元，因此单独依靠空域处理抑制通信干扰也是不现实的。综合看来，空时联合处理成为了一种必然趋势，它综合使用空域自由度和时域自由度对 CCI 和 ISI 进行抑制。可以讲，现代智能天线技术已经与传统的自适应天线有所不同，它是构建在信号的空时二维联合处理之上的。空时二维信号处理即可采用一般意义的最优准则如 ST-MLSE、ST-MMSE 或 ZF 等，也可以基于信号的空时结构特性，如 CM、FA、信号的非高斯性和循环平稳特性等。现有的空时处理方法均采用分集加均衡的结构，充分利用空时取样提供的信号空间特征和时域延迟上的差异获得理想的矢量处理增益，其目标是能够进行盲信道估计和

均衡，抗远近效应、多径多址及重叠干扰，同时还要求方法具有良好的收敛特性和稳态精度。

当前，CDMA 由于其独特的干扰抑制特性及在系统容量方面的独特优势，逐步成为了下一代无线通信系统的主流多址技术。智能天线在码分多址系统中的应用成为了研究热点。下面我们通用的空时二维处理结构模型说明应用于码分多址系统中的智能天线的原理。

在码分多址系统中，分配给不同用户向扩散码字间的正交性使得其本身具有固有的抗干扰特性，但是在多用户异步系统中，扩散码字间的不同步会使码字间的正交性变差，带来多址接入干扰 (MAI)。此外信号的多径干扰也是设计者必须考虑的问题。但与此同时，扩谱信号的应用也使得信号的分集接收成为可能。早在 1958 年，R. Price 和 P. E. Green 就提出了宽带信号的 RAKE 接收技术。RAKE 接收技术基于这样一个事实，即当传送信号的带宽 $W \gg \Delta f$ 时 (其中 Δf 为信道的相干带宽)，信道响应可以表示为

$$c(\tau; \tau) = \sum_{n=1}^L c_n(\tau) \delta(\tau - n/W) \quad (3)$$

即信道可以用有限阶的延迟抽头结构表示。此时对于接收端而言，信道在时域上的分辨率为 $1/W$ 。RAKE 接收机首先通过匹配滤波器对信道参数集进行估计，即估计出式 (3) 中的系数集 $\{c_n\}$ ，之后根据 MRC 准则对不同延迟时刻的多径分量进行相干叠加，得到待判决的统计量。RAKE 接收是时域上的分集接收，它综合了信号的多径传播分量，因此性能优于对信号多径采用单纯抑制的方法。但 RAKE 接收有两个内在的局限：一是它是一种面向单用户的方法。它以多径噪声分量的不相关性为假设前提，但在实际多用户情况下，这个条件是不满足的；另外一个局限就是这种方法要受限于信道的分辨率。对于一个扩谱信号，信道的极限分辨率为 $1/W$ ，落在 $1/W$ 内的多径信号间是不能彼此区分的。然而实际的情况是，一个时域可分辨多径分量实际上是由多个多径信号组成的，尽管这些多径信号在时域上是不可分辨的，它们的空域特征却是有差别的，即它们的到达方向是不同的。因此我们考虑应用多个接收单元同时进行接收，在传统 RAKE 接收的基础上增加空域自由度，进一步增加信号的处理增益。

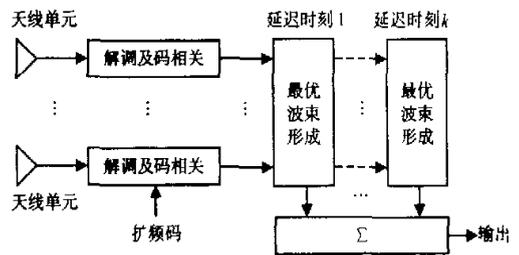


图 2 利用最优波束形成的 2D RAKE 接收机

图 2 给出了一种采用多接收通道的 RAKE 接收机。不难看出,这种结构采用了空时处理的方法,其中在不同延迟时刻都采用一个波束形成器进行接收。对应各延迟的波束形成器的输出合并后作为后端解调和检测的输入。其中最优波束形成的解可以表示为

$$W = M^{-1} a_{kl}^* \quad (4)$$

其中, a_{kl} 为用户 k 的第 l 条路径的复合信道响应矢量, M 阵为第 l 条路径的噪声协方差阵, $*$ 为共轭转置。由于对应每个延迟的最优波束形成器都能给出一个信号传播分量的最小均方无偏估计, 因此图 2 结构理论上能够完全准确地收集到信号的各个多径分量, 从而获得最大的矢量处理增益。

图 3 给出了一种应用了空时二维滤波器的 CDMA 接收结构。该结构首先通过一个 $M \times K$ 维空时二维滤波器 (其中 M 为天线单元数, $K = \lceil \frac{\tau_{\max}}{T_c} \rceil$ 为信道的最大延迟数, T_c 为一个 chip 长度) 形成各用户扩谱信号的估计值, 之后分别用对应不同用户的扩展码对这些估计值进行解扩, 得到各用户信息序列的估值。这种结构相对图 2 给出的结构而言, 是一种更为普遍的模式。

图 3 结构中 $M \times K$ 维空时二维滤波器的解可以根据不同的最优准则得到。Liu 和 M. D. Zoltowski 给出了一种依据空时最小均方误差准则 (ST-MMSE) 的空时二维滤波器的盲估计方法,

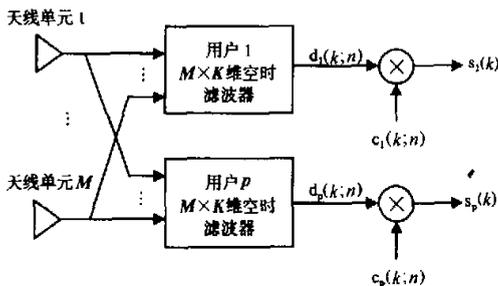


图 3 采用空时二维滤波器的 2D RAKE

由于采用的是 ST-MMSE, 因此在多用户情况下, 这种结构能获得信号的最佳估计。而且, 由于对信道采用的是盲估计方法, 无需训练信号的辅助, 因此该方法的通信资源利用率也是很好的。不难看出, 实际上图 3 所示结构和图 2 所示结构是一种等价结构。

图 4 给出了在典型城市环境中 (频率选择性衰落信道), 采用图 3 所示空时联合处理结构以及传统一维 RAKE 接收的 SIR 随用户数目变化时的变化情况。在仿真中, 信道模型采用前面给出的模型, 并假设信道的最大延迟数为 5; 系统工作在理想功率控制的情况下, 扩频增益为 30, 采用 BPSK 调制; 接收天线为 6 单元均匀线阵, 阵元间距为 1/2 波长。曲线为 50 次随机实验得到结果的平均值。从图 3 中不难看出, 图 2 结构的性能要明显优于传统的 RAKE 接收。可见, 应用空时二维处理技术, 的确能够得到明显的性能改善。

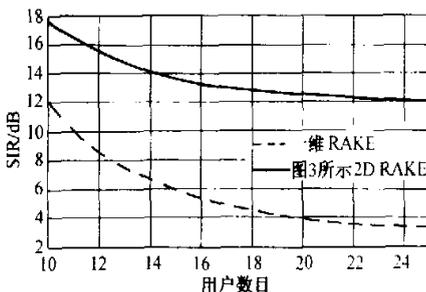


图 4 2D RAKE 和一维 RAKE 的性能比较

参考文献

- 1 崔炎, 吕善伟. 用阵列抑制 TDMA 无线通信系统中的共信道干扰. 已投电子学报
- 2 Rappaport T S. Wireless communications: principles and practice. Prentice-Hall, Inc. 1996: 500-515
- 3 Porat B, Friedlander B. Direction finding algorithms based on higher-order statistics. IEEE Trans SP, 1991, 39(9): 2016-2024

Smart Antenna for Wireless Communication

Cui Yan

(Department of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract To ensure the reliability of communication in adverse environments, smart antenna has received intense attention. Smart antenna has changed the role of antenna from the simple circuit-field interconvector to a complicate system that has integrated function of signal processing. This paper introduces and analyzes the applications of conventional adaptive arrays and spatial-temporal processing in wireless communication. We analyze the performance of adaptive beamformer in TDMA system and 2D RAKE used in CDMA through simulation. Through simulation, we demonstrate the superiority of smart antenna which is based on spatial-temporal processing.

Key words cellular radio system, smart antenna, TDMA, CDMA

(收稿日期: 2002-01-24)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>