

第三代移动通信智能天线的研究现状 及发展趋势分析^{*}

庄铭杰^{1,2} 林比宏^{1,3}

(1. 厦门大学物理系, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学信息学院, 福建 厦门 361021; 3. 泉州师范学院物理系 福建 泉州 362000)

摘要: 本文首先简单地介绍移动通信发展以及第三代移动通信(3G)的技术特征和实现目标, 并阐述了如何用多址来解决通信资源紧缺的问题。随后重点讲述智能天线的定义、优点、组成、工作原理、信道模型以及要解决的关键技术问题和发展现状。最后, 提出了智能空分多址的概念, 并对智能天线未来的发展进行了分析和预测。

关键词: 第三代移动通信; 智能天线; 信道模型; 自适应天线阵; 算法; 综述

中图分类号: TN929.5; TN828.6 **文献标识码:** A

Research and Development Tendency of Smart Antennas in the Third Generation Mobile Communication

ZHUANG Ming-jie^{1,2}, LIN Bi-hong^{1,3}

(1. Physics Department, Xiamen University, Xiamen 361021, China; 2. Information School, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. Physics Department, Quanzhou Teachers College, Quanzhou 362000, China)

Abstract: In this paper the development of mobile communication is firstly introduced. The technical features and aim of the 3rd generation mobile communication are given. How to solve the lack of communication sources with multi-access is also described. Then the definition, construction, operation principle, channel models, key technology, developing situation of smart antenna are presented. Finally, the concept of smart spatial-multi-access (SSDMA), analysis and predication about future development of smart antenna is provided.

Key words: 3G communication; Smart antenna (SA); Channel model; Adaptive antenna array; Algorithm; Summarization

一、引言

自从1948年出现第一台移动电话以来, 移动通信已经历了20世纪60年代初贝尔实验室提出的蜂窝结构、80年代初以模拟技术为技术特征的第一代移动通信的发展和90年代初以数字技术为主要特征的第二代移动通信的发展。近年来, 随着全球通信业务剧增以及个人通信等新概念的出现和IMT2000标准化工作的进行, 新一代移动通信系统

(即第三代移动通信系统, 简称3G)的技术和系统开发已成了移动通信最热门的话题。3G的目标是有极大的系统容量, 有极好的通信质量, 有极高的频带利用率。要在复杂移动通信环境和有限频带资源下实现这个目标, 它必须克服多径衰落、时延扩展和多址干扰这3个因素的限制。

频率资源对于通信的作用至关重要。为了解决个人移动用户数量急剧增加、通信容量不足以及通信质量下降等问题, 已采用了很多有效方法来提高

* 收稿日期: 2002-03-19

通信资源。若从多址的角度出发,传统方法有频、时域2方面,出现了FDMA和TDMA2种体制。为了进一步提高频谱复用率,又提出了码域的CDMA,由于它利用伪码的相关特性,使多个用户可以同时在一个信道上实现通信而不相互干扰,因此能成倍地提高系统容量。但CDMA存在着远近效应、码间干扰和多址干扰情况,并占用较宽的频谱。为了进一步提高用户服务容量,90年代初又提出了从空域来提高频谱利用率的设想,即空分多址(SDMA),它使位于不同空域的用户分配同一时隙、信道和码址,利用电波信号的空间隔离来消除用户之间的干扰。智能天线(SA)就是基于这种设想的新式天线,它依托软件无线电技术,从自适应天线阵列发展而来的。

智能天线是一种阵列天线,它通过调节各阵元信号的加权幅度和相位来改变阵列的方向图形状,即自适应地控制波束幅度、指向和零点位置,使波束总是指向期望方向,而零点指向干扰方向,实现波束随着用户走,从而提高天线的增益和信干噪比,节省发射功率,延长电池寿命和降低用户手机体积。广义地说,SA是一种天线和传播环境、用户和基站的最佳空间匹配的通信。目前,SA是一种还没有被人们充分开发的新技术,世界上许多著名的大学和同学都竞相致力于智能天线的研究与开发,包括我国、北美和欧洲在内的提供给ITU的GRIT标准建议中,几乎都附有一条:如果有可能,本建议将采用SA技术。可见,虽然目前的SA技术尚未达到实用化阶段,但它在即将到来的3G移动通信以及未来的移动通信体制中占有重要地位,人们普遍对它的期望很高,并看好它的发展前景。

本文将介绍智能天线的组成、工作原理、信道模型、实现的关键技术问题、发展过程、使用和研究现状以及未来研究与发展方向。

二、智能天线

1. 智能天线的组成和工作原理

图1是N元自适应阵的组成框图,它由3部分构成:天线阵列、信号合成通道和自适应处理器。天线阵列是由按某种规律排列的单元天线构成的,常用形式有直线阵列、圆阵列和平面阵列。信号合成通道(或方向图数字波束形成网络DBF)则将来自每个单元天线的空间感应信号加权相加,其中的权系数为复数,也就是说,每路信号的幅度与相位均可改

变。自适应处理器(或控制单元)是智能天线的核心,该单元的功能是根据一定算法和优化准则主动地去适应周围电磁环境的变化。阵列信号处理的主要内容有3部分组成:产生对准用户的高增益波束的波束形成技术;干扰信号方向零陷的波束的零点技术;研究带宽内空间信号达波方向(DOA)的空间谱估计技术。本文仅讨论直线阵形成波束的方法来说明智能天线的工作原理。

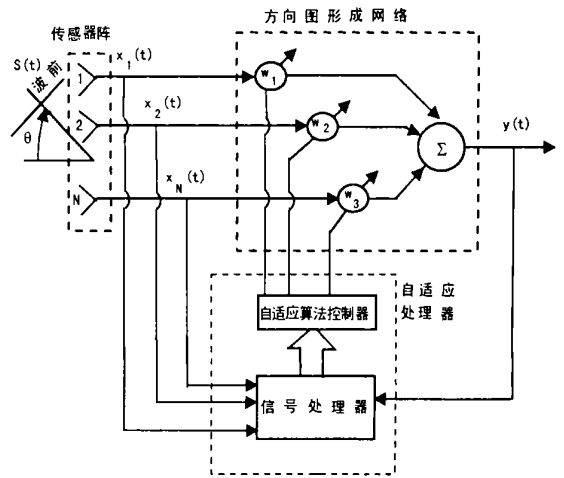


图1 自适应智能天线阵工作原理图

2. 工作原理

令N个天线单元,序号见图1,M个用户,天线元间距为d,第m个用户信号 $S_m(t)$ 之入射角与线阵法线夹角为 θ_m ,以1号阵元为时间参考,则到达相邻两天线元的差 $\Delta\tau_m = d \sin\theta_m / c$,若m用户工作频率为 ω_m ,即引起相位差为

$$\Delta\alpha_m = \omega_m \Delta\tau_m = 2\pi d \sin\theta_m / \lambda_m \quad (1)$$

显然, $S_m(t)$ 到第n号天线的响应信号为

$$x_{nm}(t) = A_{nm} S_m(t + n\Delta\tau_m) \quad (2)$$

若 $S_m(t)$ 之解析式为

$$S_m(t) = a_m(t) e^{j[\omega_m t + \varphi_m(t)]} \quad (3)$$

且 $a_m(t)$ 、 $\varphi_m(t)$ 对 $\Delta\tau_m$ 的变化极其缓慢,即(2)式变为

$$x_{nm}(t) \approx C_{nm}(t) S_{nm}(t) \quad (4)$$

式中 $C_{nm} = A_{nm} e^{j\omega_m n\Delta\tau_m}$ 。现用复加权系数 W_{nm} 对N个天线单元的输出 $x_{nm}(t)$ 进行加权处理并求和得天线阵对用户m的响应为

$$y_m(t) = \sum_{n=1}^N W_{nm} x_{nm}(t) \approx S_m(t) \left[\sum_{n=1}^N W_{nm} C_{nm} \right]$$

(5)

若 $W_{nm} = (C_{nm})^{-1}$, 则加权后的输出信号为

$$y_m(t) = NS_m(t) \quad (6)$$

上式说明:在理想加权情况下,合成信号 $y_m(t)$ 为入射信号的 N 倍,可见此时天线阵起到空间分集接收的作用。 W_{nm} 可进一步写成

$$W_{nm} = (A_{nm})^{-1} e^{-jn\Delta\varphi_m} \quad (7)$$

若天线阵一致性很好, A_{nm} 与 ω_m 无关,且令 $A_{nm} = 1$, 即

$$W_{nm} = e^{-jn\Delta\varphi_m} \quad (8)$$

最后可求得对应于第 m 个用户复加权系数时,任意入射方向 θ 的来波天线阵的归一化方向图函数为

$$F_m(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_{nm} e^{jn\Delta\varphi_m} \right| \quad (9)$$

$$= \left| \frac{\sin \left[\frac{N\pi d}{\lambda_m} (\sin \theta - \sin \theta_m) \right]}{N \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda_m} (\sin \theta - \sin \theta_m) \right]} \right|^2$$

由式(9)可知:连续相位滞后(或导前)加权可控制主瓣指向,若幅度和相位同时加权,还可获得方向图零点指向干扰方向。由于幅度和相位加权是相互影响的,且自适应阵列是一个空间域的滤波器,因此只要按照一定准则就很容易求得一种复加权来产生具有零陷的方向图^[3]。

3. 智能天线的信道模型^[4]

信道模型是移动通信中一个至关重要的问题,现已有若干经典模型分别涵盖了不同频段、带宽、环境(城市、郊区、室内外)和系统结构(宏小区、微小区)。由于这些经典模型缺乏对信号的空间特征的充分描述,特别是没有包含 DOA 信息,而 SA 的空间信道模型对此应有所反映,下面介绍 2 种这方面模型。

(1) 多径条件下的窄带信号模型

它是建立在广义平稳不相关散射之上的最简单的一种空间信道模型。在同一时间、同一频道内有 M 个用户信号,则 N 个阵元输出的信号可表示为

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T = \sum_{m=1}^M X_m(t) \quad (10)$$

$$= \sum_{m=1}^M a_m(t) S_m(t) = AS(t)$$

式中 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$;

$x_n(t)$ 表示第 n 个阵元的输出;

$X_m(t) = a_m S_m(t)$ 表示阵列输出中用户 m 的

$N \times 1$ 信号矢量。

如果用户 m 的信号经过 L_m 条离散路径,则 a_m

$$= \sum_{l=1}^{L_m} \alpha_{ml}(t) a(\theta_{ml}),$$

其中 $\alpha_{ml}(t)$ 代表第 l 条路径的衰减数值, θ_{ml} 表示第 l 条路径的 DOA, $a(\theta_{ml})$ 表示阵列对 θ_{ml} 的方向响应矢量 ($N \times 1$), 它是阵列几何结构、阵元间隔、 θ_{ml} 以及 λ_m 的函数。称 a_m 为用户 m 的阵列响应矢量,它反映了该用户信号的空间特征。 $A = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$ 称为阵列响应矩阵 ($N \times M$), 反映了 M 个用户信号的空间特征。

(2) 冲激响应模型

它是利用信号与系统的知识,建立在射线传播过程基础上的一种较为全面地反应信道传输的物理模型,它可以更充分地描述信号的空时二维特征。对于用户 m 的信号传播,设有 L_m 个散射体,第 l 个散射体具有 Q_l 个反射点,则空时多径信道的冲激响应为^[7]

$$h(t, t_0) = \sum_{l=1}^{L_m} E_l(\theta_l(t)) \sum_{q=1}^{Q_l} \alpha_{lq} e^{-j(2\pi f_{lq} t_0 + \Phi_{lq})} \delta(t - \tau_{lq}) E_r(\theta_{lq}) \quad (11)$$

式中 t_0 代表观察时刻;

$E_l(\theta_l(t))$ 代表发射天线方向图;

$\theta_l(t)$ 代表发射机至第 l 个散射体的发射角;

α_{lq} 与 Φ_{lq} 分别是反射分量的幅度和相位;

τ_{lq} 为路径时延;

f_{lq} 代表多普勒频移;

$E_r(\theta_{lq})$ 代表接收天线方向图;

\hat{q}_l 是反射分量的入射角。

一般地,将用户 m 到第 n 个接收阵元的组合信道由冲激响应 $h_{nm}(t)$ 表征, $n=1, 2, \dots, N, m=1, 2, \dots, M$, 以 $h_{nm}(t)$ 为 (n, m) 元素便构成冲激响应矩阵 $H(t)$, 它全面地反映了 M 个用户信道的空时二维特征。

三、智能天线的发展历程、关键技术以及研究现状

1. 智能天线的发展

智能天线是源自于军事上所采用的阵列天线,按波束形成方式的不同可划分为模拟波束成形和数字波束成形(DBF)。由于 DSP 技术的发展,如今智能天线在中频以下利用软件无线电技术可方便地、

高精度地实现 DBF。自 1959 年由 Van Atta 提出自适应天线阵列的概念以来已经历了 40 余年发展,大体上可分为 4 个阶段:前 10 年集中在自适应波束的控制;第二个 10 年主要集中在自适应零陷控制上;第三个 10 年则主要集中在空间谱估计上;近 10 年来则主要集中在结合移动通信的智能天线实现技术上,这也是本文主要论述和研究的阶段。

2 智能天线实现的关键技术

智能天线在移动通信中应用分为移动台和基站,本部分仅讨论基站智能天线实现的技术,其中智能化发射技术(或下行链路技术)和接收技术(即上行链路技术)是 2 项关键技术。

(1) 上行链路(移动台至基站)

上行接收技术研究较早,实现容易,它用于移动通信中是为了改善上行信道的质量和容量。有 2 种方法可以实现:基于 DBF 网络的方法和基于符号序列估计的方法。前者基本思想为:利用 DBF 网络,且各 DBF 单元产生特定的加权矢量(可采用独立的算法),用户 m 的加权矢量保证从 M 个信号中分离出相应的信号,而抑制其他 $M-1$ 个信号。实现 DBF 的算法有很多。在以 CDMA 系统为应用对象的 3G 中,空域处理技术和空-时域处理技术是最常用和有效方法^[4];而基于符号序列估计的基本思想为:用信号估计的方法同时分离多个同信道信号,借鉴高分辨阵列处理的思想和技术,它没有具体波束概念,而利用一定估计准则估计空间信道(A 或 $H(t)$)和符号序列,或直接估计各用户的符号序列,这类方法主要利用数字调制信号的有限符号集性质和周期平稳性,而准则一般采用最大似然估计。

(2) 下行链路(基站至移动台)^[6]

要实现基站智能天线下行发送要比基站上行接收困难许多,因此,目前对智能化发射的研究还不及智能化接收。智能天线的下行链路仍采用 DBF 技术,对 N 个单元、 M 个用户的系统,在某信道上发射 M 个信号需要构造 $N \times M$ 的最佳发射加权矩阵 W_t ,对 TDD 系统,当发射和接收的时间间隔不太长时,可以认为上行链路的加权矩阵系数互易,即 $W_t = W_r$;但对于 FDD 系统,上下行信道频率相差 90 MHz,此时无法用上行链加权系数矩阵 W_r 来构造 W_t ,这构成了智能天线实现的一个技术难点。通常,对 FDD 系统下行链路的解决方案有 2 种:反馈方法、“反向”发射(即基于 DOA 方法)和构造优化发射准

则。

3. 智能天线的研究现状

智能天线的研究现状本文从 2 方面进行说明,即理论算法上的研究和工程上实现的状况。

(1) 智能天线的理论研究^[9]

对于一个完整智能天线系统要进行理论探索包含 5 方面内容:DOA 的多用户检测、波束变换的优化准则、数字波束形成 DBF、上行链路以及下行链路。这 5 个方面不是相互独立的,而是相互联系的。预测用户来波方向 DOA 通常有 2 种算法类型,即非盲自适应算法和盲自适应算法。其中非盲算法是居于专门发送导频信道信号或导频符号序列信号来实现的自适应算法,这方面的典型算法有:基于梯度的最小均方(LMS)误差算法、差分最陡下降(DSD)算法以及加速梯度(AG)算法;递归最小二乘(RLS)算法;矩阵直接求逆(DMI)等算法,以及这些算法的改进算法。而对于盲算法,由于没有参考信号,因此必须使用 DOA 的时空特征进行多用户检测并分离出各方向的用户来波,经典算法有恒模算法(CMA)和空间谱估计,此外,还有有限符号集、循环平稳以及判决反馈和模糊神经网络等算法,所有这些算法哪些(或哪个)较优、适合于哪些场合以及是否还有更优的算法都仍在进一步的探索之中。

波束方向图调整的智能控制是按准则来进行的,准则选择得是否合理将决定天线阵暂态响应的速度和实现电路的复杂度,它是智能天线阵列处理的核心。常用准则有:最小均方误差准则(MMSE)、最大信干噪比准则(MSIR)、最大似然准则(ML)以及噪声方差最小准则(MV)。所有这些准则的结果都可统一为维纳解,向 MSIR 准则结果靠拢,称为控制阵,在此控制律加权下的阵列方向性、阵列处理增益等结果适用于所有准则^[11]。

智能天线的最终目的就是产生实时多用户多波束的天线方向图,有关多用户检测算法、波束切换准则和上下链路技术研究,都是围绕着波束成形这个中心来进行的,可见波束成形是 SA 的能否实现的关键。从理论上讲,仅考虑某一方面要求可以最优地实现 DBF(包括上下行链路),但在实际应用中显然存在 2 种原因阻碍智能天线的实用化:一是基站智能天线必须实时地产生与整个小区用户数相同的窄波束(多径时仅考虑主径);二是要求 SA 产生窄波束和切换再生窄波束的速度要快于快衰落和高速移动用户。现有实现 DBF 各种算法和 DSP 速度都

无法满足这种要求。鉴于这种现实,目前工程技术实现不得不将SA技术转向所谓准动态次最优的预多波束工作方式的SA^[19],它是指在接收或发送端预先设置了一组N个不同入射角方向的窄波束,再根据接收或发送所判断出期望信号的DOA,按照一定的信号误差准则,在预置的N个波束中选取一个最合适的波束,并及时切换到该波束上接收或发送期望信号。用预多波束实现SA的好处是:天线响应速度快,能对各种环境下的用户进行实时跟踪;仅关注目标用户的主径DOA,采用的天线结构及其算法简单;波束方向图对频率不敏感、鲁棒性好,尤其能解决下行链路波束产生的问题。按Bigler^[9]等人的DOA实测值以及Kennedy^[9]论文中的CAPITAL测向系统的角度精度来看,均能满足预多波束SA的实现。

(2)智能天线研究进展

到目前为止,真正能做到上面讨论的自适应智能天线的系统还没有,大部分仍处于试验阶段或是一些能实现简单功能的“智能天线”。欧盟在SA上第一阶段 $f=1.89\text{GHz}$,采用TDD方式通信体制,使用算法是MUSIC、NIMS和RLS3种。研究和试验结果表明:平面、圆环天线阵适合于室内通信,而直线天线阵更适合于一般市区环境。它们正在进行的第二阶段SA研究方向为:最优波束成形算法、系统协议研究和系统性能评估、多用户检测与自适应天线的结合、时空信道特性估计和微蜂窝状化与现场试验。美国的Array Comm公司已能生产简单的基于TDD的SA,并应用于无线本地环路(WLL),该产品在日本已进行现场试验,结果表明这种SA能提高系统通信容量。加拿大一些大学则进行直线阵CMA算法的SA研究。日本也进行了CMA算法、最大比值合并算法(MRC)的研究和实验。由于3G技术走在领先地位的美、日、欧的这些实验仅是SA研究的开始,离未来要求的SA还有相当距离。我国在这方面的重视、跟踪和研究应该说是与世界同步的,在未来3G协议中,我国拥有自己的TD-SCDMA协议,采用TDD方式工作,并将SA列为其中不可缺少部分。而我国部分高校和研究所在DOA提取、波束成形优化算法、上下链路波束成形、信道模型以及波束切换等展开理论研究和实验仿真,有些还属于世界水平。更可喜的是,我国信威公司和美国AC公司已联合生产出具有SA锥型的八元圆阵的SDMA型天线。

四、对智能天线未来发展的看法和分析

综合上面的讨论,SA现在也仅能进行一定的理论探索和处于试验阶段,还无法生产并投入使用,生产出的产品也仅是简单的SDMA天线。从未来发展角度看,自适应智能天线是SA发展的方向。但从实际应用角度看,预多波束实现SA应是未来自适应SA实现之前研究最为热门的课题。从目前发表的文章看,有关预多波束天线的内容较少,而它们大都沿用自适应SA的路,即用现成的、预置好的波束来代替实时DBF,而且波束生成(实际是波束匹配挑选)也是跟着用户走的。但是预多波束无法象SA中实时产生的DBF那样对干扰信号进行零陷,而只能事先尽量构造好低旁瓣的窄波束,这种预多波束的宽度都是一样的,因此属于等扇分区的SDMA。在现有算法复杂和DSP速度不过高的情况下,采用预多波束SA的传统思路存在着一定的缺点和时间浪费:每个用户使用一个没有零陷功能的波束,由于用户一般在不停地运动,波束要不停地跟着切换,这对速度紧缺的SA实现是一种浪费;尽管预多波束省掉了自适应DBF的生成,但一个没有零陷的波束仅为一个用户服务,波束的利用效率低。针对预多波束实现SA的缺点,本文提出智能空分多址(SSDMA)的概念来解决这个问题,它是一种波束宽度($2\theta_{3\text{dB}}$)可变的预多波束SDMA。其基本思想为:基于已知各用户DOA主径以及用户的其他信息(如识别码、位置、速度等),在保证通信服务质量和容量要求的前提下,按照可实现的算法准则对基站区内用户进行不等扇区的智能空分,准则就是一些性能,如:呼损率、越区中断率、切换速度、用户移动速度、同信道干扰、多径干扰、多址干扰、抗快衰落情况、码间干扰等进行最佳组合的算法。优化算法的基本思想是使得用户较多的地带可以利用窄波束进行空分,而用户较少的地带却用宽波束进行空分。这样做至少有3方面好处:首先,按用户分布并结合优化准则来进行智能空分,每次需要同时更换和生成的波束数远远小于用户多径数总和,解决了自适应SA和准最优预多波束SA必须同时更换和生成与达波数(它是各用户数多径数的总和)几乎相同的波束而速度又跟不上的矛盾;其次,能基本解决地面快速移动用户的问题,因为快速移动体往往是用户稀少地方,这些地带采用宽波束,进而它也能解决下行链路与上行链路不对称的矛盾;第三,由于用户少的地带

的信号多径数一般小于人口密集地带的多径数,因此,智能空分对用户多用窄波束和用户少用宽波束的这种自适应调节能基本解决快衰落的问题。可见,智能空分形成的波束跟着空分扇区走,每次需要同时生成的波束数很少。

引入智能空分形成波束的概念后,第三代移动通信基站的天线波束的生成就有4种可能的实现方案,根据算法速度可实现的顺序来看(它也是未来智能天线逐渐过渡和发展的趋势),即有:智能空分的预多波束SA、准最优预多波束SA、智能空分的SA和自适应SA。

参 考 文 献

[1] 罗伯特·A·蒙津,托马斯·W·朱勒著,沈铁汉,梁福生,石镇译. 自适应阵导论[M]. 北京:国防工业出版社,1988.

[2] 杨小牛,楼方义,徐建良著. 软件无线电原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2001.

[3] 刘德树,罗景青,张剑云编著. 空间谱估计及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001.

[4] 葛利嘉,路鸣. 蜂窝通信的空分多址的概念、算法和性能[J]. 通信学报,1999(8).

[5] 吴伟陵编著. 移动通信中的关键技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2000.

[6] 吴利民,薛峰,吴宁生著. 软件无线电技术及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2000.

[7] Ming Lu, Titus Lo, Lita J.A.. Physical Spatio-temporal Model of Multi-path Propagation Channels[A]. In: Proc IEEE VTC'97[C], 1997.

[8] J.Kennedy, MC Sullivan. Direction Finding and Smart Antennas Using Software Radio Architectures[J]. IEEE Communication Magazine, 1995, (5): 62~68.

[9] Bigler A, et al. Expenimental direction of arrival and spatial signature measurements at 900 MHz for smart antenna systems [J]. In: proc IEEE VTC'95[C], 1995: 55~58.

[10] 耿宏,赵建平. CDMA 移动通信系统预多波束工作方式[J]. 电讯技术,2000,40(2).

作者简介

庄铭杰(1964-),男,福建惠安人,现为厦门大学物理系博士研究生,集美大学信息学院副教授,主要研究方向为GPS、移动通信、信号处理;

林比宏(1960-),男,福建南安人,现为厦门大学物理系博士研究生,泉州师范学院副教授,主要研究方向为凝聚态物理、信号处理。