

学术论文

智能天线系统中信道空分复用问题的研究

冯正和, 张志军

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

摘要: 本文阐述了智能天线 (smart antenna) 空分复用系统中的重要概念——信道方向图的概念。提出了一种高效的搜索算法, 用于解决信道复用中的组合寻优问题。最后以本文的搜索算法为基础进行仿真, 得到了关于智能天线系统中有关信道复用的若干有用结论。

关键词: 智能天线; 空分复用

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-436X(2000)08-0008-06

Study on spatial reuse of channel in smart antenna system

FENG Zheng-he, ZHANG Zhi-jun

(State Key Lab. on Microwave and Digital Communications,

Dept. of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The concept of beam pattern of spatial channel is described in the paper. It is very important for smart antenna, especially in SDMA (Spatial Division Multiple Access) system. An efficient search algorithm is proposed to solve combined dynamic channel assignment problem. It is a composite optimization problem in spatial reuse of channel. Based on the search algorithm, some valuable conclusions are drawn out.

Key words: smart antennas; spatial reuse

1 前言

智能天线 (smart antenna) 的概念是在 80 年代末提出的, 人们希望通过引入智能天线来克服共信道、多径衰落等日益严重的干扰问题, 并提高通信系统的容量、扩大基站覆盖面积。

对智能天线^[1-4]可以有不同的理解。基本的理解类似于自适应天线, 它可以通过改变参数来适应外界的电磁环境, 增加所要方向上的信号或者减少另一方向的干扰以提高信干比; 或最有效地发射功率, 增加覆盖面积。但智能天线和自适应天线有着本质的区别: 前者可以独立地对信道方向图进行调整, 而后者只能对功率方向图进行调整。智能天线的最大魅力在于, 它可以利用信号方向的不同, 将不同的信号区分开, 从而对传统信道 (FDMA, TDMA) 空分复用, 成倍地增加系统容量。

本文首先研究智能天线的信道空分复用的实现方法。然后讨论空分复用的信道分配方法并提出了一种高效的快速算法去解决信道复用中的组合寻优问题。最后以本文的搜索算法为基础进行仿真, 对空分复用系统的容量及其性能进行了讨论。得到了关于智能天线系统中有关信道复用的若干结论。

2 信道方向图与空分信道的实现

图 1(a) 和图 2 分别是自适应天线及智能天线的原理框图。图中省略了它们的控制加权部分。由图 1(a) 可见, 自适应天线中不同用户的信号先通过多工器合成为一路信号, 然后将该路信号分为 D 路 (D 为天线单元数), 这些分别以系数 w_1, w_2, \dots, w_D 进行加权, 然后送到各天线单元上。各天线单元上的合成信号波形相同, 只是幅度和相位有所不同。它的方向图是功率合成方向图, 如图 1(b) 所示。如果在 A 点可以收到某个用户的信号, 那么也可以同时收到所有其他用户的信号。而位于另一个波束方向 B 点处收到的用户信号数与 A 点处相同。因此它是无法进行空间信道复用的。它可以产生的波束数少于天线单元的数目。这个数目与用户数无关, 它只改善了信干比。此外, 自适应天线可通过产生零点来抑制干扰信号, 同样, 它可以产生的零点数也少于天线单元数。

智能天线和自适应天线最大不同之处在于信号加权与多路信号叠加的顺序。智能天线首先将每一个用户信号分为 D 路 (D 为阵列单元数), 然后对各个不同用户信号进行分别加权, 产生 $M \times D$ 路信号 (M 为用户数), 最后将相应的 M 路信号合为一合一路送到各个天线单元。由于各天线单元信号都是由 M 路信号以不同加权系数组合而成, 因此信号的波形是不同的, 构成了 M 个信道方向图。

用叠加原理可以说明信道方向图的概念。

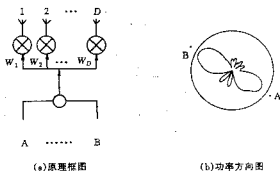


图 1 自适应天线

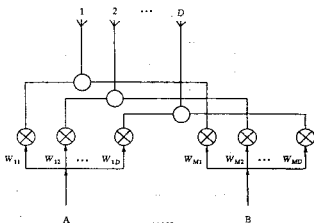


图 2 智能天线原理框图

见图 3(a) ~ 3(c)。对每个传统信道, 当只有 A 点信号存在时, 通过选取 $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1D}$, 可以得到如图 3(a) 所示的信道方向图。当只有 B 点信号存在时, 通过选取 $w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2D}$, 可以得到如图 3(b) 所示的信道方向图。当两个信号同时存在时, 由场的叠加原理可知, 智能天线的功率方向图为两个信道方向图的叠加图 3(c)。图 3(c) 的功率方向图从外表看与自适应天线方向图图 1(a) 相似, 但是图 3c 中 A 点处接收到的信号主要为 A 点信号, B 点处接收到的信号主要为 B 点信号, 从而保证两个用户信号共用一个传统信道实现空分复用。

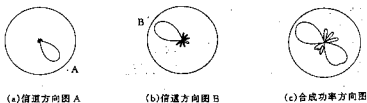


图3 智能天线的信道方向图及其功率方向图

智能天线系统中,各信道波束是互不相关的,能够独立地调整各信道波束去分别跟踪信号。所能产生的信道波束数与天线单元阵列数目无关,每个用户信号,对应一套(D 个)加权器。由于智能天线所拥有的加权器远多于自适应天线,因而可以满足增加系统容量、抑制干扰等要求。智能天线的最大魅力在于对传统信道进行空分复用,从而成倍地增加系统容量。

3 空分信道的信道分配及其快速算法

智能天线系统的信道分配主要考虑信干比。在每个传统信道中可以容纳的最大用户数 k 称为空分复用次数。它取决于波束宽度及旁瓣电平。

选取哪些信号复用同一传统信道,实质上是组合寻优的问题。对于一个具有 N 个传统信道的通信系统,最大容量为 $k \times N$ 。如果随意地将每 k 个用户分为一组,共用同一传统信道,有可能会因为相互之间的共信道干扰而无法通信。为此,有必要制定一个准则来进行信道分配。本文选取的准则是使空间角度相近的用户、与基台之间的距离相差悬殊的用户使用不同的传统信道。本文讨论上行信道,下行信道则可用同样方法分析。

定义在基台处第 l 个用户的信干比 SIR_l 为

$$SIR_l = \frac{P_l}{\sum_{i=1, i \neq l}^k P_i f_i(\theta_l - \theta_i) + N_0} \quad (1)$$

式中 $P_l, P_i (i = 1, \dots, k; i \neq l)$ 分别为用户 l 和除 l 外用户的 $EIRP$ (有效全向辐射功率)在基台处接收的功率, $f_i(\theta)$ 为用户 l 的归一化信道方向图, θ_l, θ_i 为方向角, N_0 为接收机等效噪声功率。

对于组合寻优问题,最精确的方法是遍历法。以一个复用系数为 2 的 N 信道系统为例,遍历算法需要找出所有不重复的分组,并计算每个分组中的信干比,最后从 $(2N-1) \times (2N-3) \times \dots \times 1$ 种分组中找出最佳的分组方案。这样的算法,即使对于信道数仅为 8 的小系统,也需计算 2027025 次才能选出最佳的信道复用方案,显然在实用中是不现实的。

本文提出了一个简化算法,它将组合寻优问题转化为一维搜索问题。在绝大多数情况下,该方法可以得到与遍历法完全相同的结果;在极少数情况下,该算法得到的最低的分组信干比略低于遍历法得到的结果;但本文算法的计算量远远低于遍历法。

本文用信道方向图的包络 $f_{ab}(\theta)$ (图 4 中实线)代替信道方向图(图 4 中虚线)。

对于任意第 l', l'' 两个信号,基台接收功率分别为 $P_{l'}, P_{l''}$ dB,方位角度分别为 $\theta_{l'}, \theta_{l''}$ 。如果将它们分为一组,则互为干扰信号。设第 l' 个信道波束的主瓣对准第 l'' 个信号,如图 4 所示,所以第 l' 个信号相对于第 l'' 个信号的信干比 $SIR_{l'-l''}$ 为

$$SIR_{l'-l''} = P_{l'} - P_{l''} - f_{ab}(\theta_{l'} - \theta_{l''}) \text{ dB} \quad (2)$$

同理,第 l'' 个信号相对于第 l' 个信号的信干比 $SIR_{l''-l'}$ 为

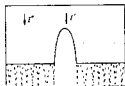


图 4 信道方向图
及其包络

$$SIR_{r-r'} = P_r - P_{r'} - f_{\text{dB}}(\theta_r - \theta_{r'}) \quad \text{dB} \quad (3)$$

定义 SIR_{r-r} 和 $SIR_{r-r'}$ 中的一个为分组信干比 $SIR_{rr'}$:

$$SIR_{rr'} = \min(SIR_{r-r}, SIR_{r-r'}) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, $SIR_{rr'}$ 中不仅包含了两用户信号的角度间隔信息,而且包含了它们的功率差别信息。当两信号功率一定时,如果两信号的夹角过小,则它们都将位于方向图主瓣范围内,此时分组信干比下降。当两信号夹角一定时,它们的功率差别越大,分组信干比越低。由此可见,如果按照 $SIR_{rr'}$ 由大到小的顺序进行挑选,可以同时保证分组信号之间的夹角大于半主瓣宽度和分组信号间功率差别最小,即保证信干比最大。

若小区内共有 M 个信号(假设信道复用数为 2,则 M 必须满足 $M \leq 2 \times N$,其中 N 为小区内总信道数),那么小区内共有 $M - N$ 个信道将被复用。由式(3)可以计算出任意两个用户信号的分组信干比。将计算出的分组信干比按矩阵排列,可以得到分组信干比矩阵 $[SIR]_{M \times M}$:

$$[SIR]_{M \times M} = \begin{bmatrix} SIR_{11} & SIR_{12} & \cdots & SIR_{1M} \\ SIR_{21} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [SIR]_{M1} & \cdots & \cdots & SIR_{MM} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$[SIR]_{M \times M}$ 矩阵为对称矩阵,上三角阵中的 $M \times (M - 1) / 2$ 个单元包含了所有的分组信干比。将全部单元从大到小进行顺序,可构成一个降序的一维序列:

$$\begin{array}{ccccccc} & & SIR_{i_1, j_1} & SIR_{i_2, j_2} & SIR_{i_3, j_3} & \cdots & SIR_{i_{M-(M-1)/2}, j_{M-(M-1)/2}} \\ \max & & 1 & 2 & 3 & & M \cdot (M-1) / 2 & \min \\ & \uparrow & & & & & \uparrow & \\ & K_{\text{start}} & & & & & K_{\text{stop}} & \end{array} \quad (6)$$

其中下标 i_m, j_m 代表第 m 单元在矩阵 $[SIR]_{M \times M}$ 中的位置。式(6)所示的过程,将组合寻优问题转化为一维搜索问题。第一次搜索从序列最左边的单元 SIR_{i_1, j_1} ($K_{\text{start}} = 1$) 开始。首先选取单元 SIR_{i_1, j_1} , 搜索至序列中某一单元的两个下标和 i_1, j_1 都不相同时,将该单元选出;继续搜索,到已选出的分组数目等于所需复用信道数 $M - N$ 止。由于序列是经过排序的,所以最后一个单元 K 的信干比最小,刷新 $K_{\text{stop}} = K$ 。

第二次搜索过程从第二个单元($K_{\text{start}} = 2$)开始,如果搜索过程在到达 K_{stop} 单元之前完成搜索,则得到的最小的信干比大于第一次搜索的结果,应该用得到的组合取代第一次的结果,并刷新 K_{stop} 。若搜索过程在到达 K_{stop} 单元时仍未完成,则本次搜索无效,中断搜索,因为本次结果必然比上一次的差。第三次搜索过程从第三个单元开始,到 K_{stop} 单元结束。

整个搜索过程在完成第 $K_{\text{stop}} - M + N + 1$ 次搜索后结束。

由上可见,本文算法将组合寻优转化为一维搜索问题。每一次搜索过程都是在 K_{start} 单元到 K_{stop} 单元之间进行, K_{start} 单元的序号随着搜索次数的增加而增加, K_{stop} 单元的序号则随着更好的复用分组的出现而刷新减小。当全部搜索完成后, M 个信号中除去 $2 \times (M - N)$ 个复用信道的用户外,余下的 $2N - M$ 个用户各自使用单独的信道。

整个搜索过程可以保证空间角度相近的用户及与基台之间的距离相差悬殊的用户使用不同的信道。

4 系统性能及其容量分析

本节将以几组仿真结果来讨论智能天线的性能。计算所用的小区为内径 200m, 外径 2000m

的环形区域,基台位于环形区域的圆心,各用户随机地分布于环形区域内。

系统的性能可用系统所有复用信道的分组中分组信干比最低的一个来表征。图5分别列出了8元阵及16元阵在不同的旁瓣电平及不同的信道数时,系统的最低信干比的统计结果。每张图都是4000组信号分布仿真的结果。横坐标是系统最低信干比,纵坐标是它的概率 p 。

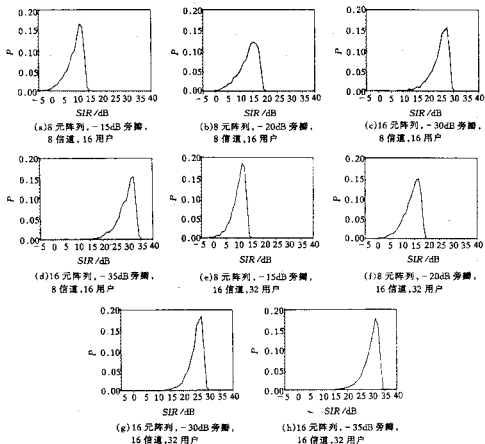


图5 智能天线系统性能与阵列单元数、旁瓣电平、信道数的相关统计结果

第二节中曾经提到,对一个8信道系统,遍历法需要计算2027025种组合,而利用本文的算法,对于图5所示的4种8信道系统,其搜索次数分别为56,54,57,56次。

观察图5(a)和(b)、(c)和(d)、(e)和(f)、(g)和(h),可以发现信道数相同的情况下,信道方向图的旁瓣电平决定系统性能。当旁瓣电平降低时,虽然信道方向图主瓣将会变宽,但整个智能天线系统性能将得到改善。这个结论亦可由式(4)定性推出,系统最低信干比与信道方向图旁瓣电平成反比,信道方向图的旁瓣越低,系统的最低信干比越高。

图6是一个8元阵列、8信道系统、-15dB旁瓣信道方向图,在用户数分别为12、14、16时系统最低信干比的统计结果。可以看出,当信道数一定时,随着用户数减少,系统的性能增加。同时,所需搜索的复用信道亦减少,搜索算法的速度将加快。

图7是分别采用图5中的4种信道方向图,当用户数改变时,系统最低信干比期望值的变化曲线。从中可以看出:当系统每个信道都被复用时,系统性能最低,随着用户数目的减少,系统性能迅速改善,然后趋于平缓,最低信干比的数值也逐渐逼近信道方向图的旁瓣电平值。从另一个角度来看:当保持信道数不变,增加天线单元数时,其信干比大大提高。这说明系统还有

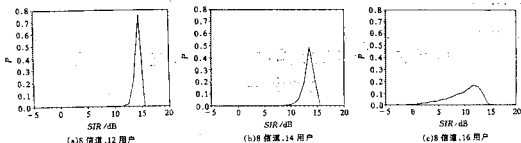


图6 8单元、-15dB旁瓣信道方向图,不同用户数的统计结果

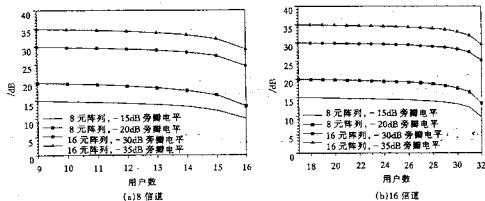


图7 最低信干比期望值与用户数关系图

余量,即天线单元数增加一倍,用户数可以增加不止一倍。

5 结论

本文对智能天线的信道方向图和信道动态分配问题进行了讨论,并据此对智能天线系统的性能进行了讨论。智能天线系统的容量是一个软容量。由第4节的讨论可以得出有关信道复用的3个结论:

1) 信道方向图的旁瓣电平值决定了系统信干比性能。旁瓣电平值越低,系统最低信干比越高;

2) 在接近饱和时,系统性能随着小区内用户数的减少而迅速改善;

3) 系统容量随着天线单元数的增加而迅速增加。

参考文献:

- [1] IRWIN S. Smart antennas may revamp wireless communications[J]. R&D Magazine, August, 1996:31-33.
- [2] GEORGE V T, MARK A B, SIMON C S. Performance enhancement of DS-SSMA PCS cellular networks with smart antennas [A]. Proceedings of the 1995 IEEE Global Telecommunications Conference [C]. 1995:213-217.
- [3] AYMAN F N, AROGYASWAMI P. Performance enhancement and tradeoffs of smart antennas in CDMA cellular networks [A]. Proceedings of the 1995 IEEE 45th Vehicular Technology [C]. 1995:40-44.
- [4] BIGLER L, LIN H P, JENG S S, et al. Experimental direction of arrival and spatial signature measurements at 900 MHz for smart antenna systems [A]. IEEE Vehicular Technology Conference [C]. 1995:55-58.