

阵列天线在无线移动通信系统中的应用

付云起^① 袁乃昌^②

【摘要】本文讨论了阵列天线的基本技术指标及在无线移动通信系统中的应用，分析了应用阵列天线时可以获得的系统各方面的性能改善。

关键词 阵列天线 无线通信 移动通信

中图分类号 :TN82 ,TN92

文献标识码 :A

一、引言

无线移动通信发展迅猛，涵盖众多技术领域。近年来又提出了将阵列天线技术应用于移动通信系统，以克服信道带宽不足，满足日益增长的对通信容量的需求。国内外的研究已经显示，当阵列天线应用于移动通信系统，将会提高信道容量和频谱利用率，扩大信号覆盖范围，控制波束形状，实现多波束跟踪以及孔径畸变的电子补偿等；同时，还能够降低多径衰落、共信道串扰、误比特率(BER)和系统复杂度。自适应天线及相关的控制算法对大容量、高效率、高性能的通信系统的发展至关重要。尤其近年来逐渐升温的智能天线技术，就是基于自适应阵列技术和智能信号处理技术的新型的天线体制。

二、天线相关技术简述

天线的种类可分为全向天线、定向天线、相控阵天线、自适应天线以及最优化天线。全向天线在所有的辐射方向上都具有相等的增益；定向天线在某些方向增益高，而在某些方向增益低；相控阵天线由多个简单的天线单元按照一定的结构排成阵列，并且控制每个单元上信号的相位，合成输出信号可以按设计的方向获得最大增益；当单元的相位和增益的调整是在阵列输出前动态调整时，则被称为自适应阵列。最优化天线则是指通过调整阵列天线单元

的增益和相位，使阵列在某种意义上获得最佳性能，比如通过消除不需要的干扰信号来获得最大的输出信噪比(SNR)，不失真地接收需要的信号。下面仅对阵列天线比较重要的技术进行简要阐述。

1. 波束扫描和波束转换

阵列天线基于空间角度的响应被称为辐射方向图，其最大响应的方向即为波束指向。比如一个线阵，当各个单元的信号不经过任何幅度和相位调制时，其波束指向是垂直于阵列各单元连接而成的直线的方向。阵列天线的方向图在波束指向两侧凋落到很低的值，这个位置通常被称为零点，尽管其信号反应值不是真正的零值。两个零点中间的波束即为主波束，而主波束两个半功率点之间的宽度就是波瓣宽度。天线的口径越大，波瓣宽度就越窄。对于给定的阵列天线，波束可以通过机械控制或电子控制来指向不同的方向，也可以控制天线的零点指向，以便提高接收信号强度，减小干扰噪声的影响。当信号是窄带时，可以在信号合成之前用相位延迟线改变其相位分布，这可以通过在天线单元信号放大传输部件中加入不同长度的同轴电缆实现，而且这种组合可以有很多种，使信号指向不同的方向，这样就要求进行不同组合之间的切换，也就是实现波束转换。波束转换要求具有比较小的反应时间。

2. 传统波束合成

通过调制各个天线单元信号的相位来实现波束

① 付云起 国防科技大学 博士研究生

② 袁乃昌 国防科技大学 教授，博士生导师

指向 ,而其幅度则保持不变 ,这同时决定了阵列天线在最大指向的增益 ,而且方向图的形状也是固定的 ,也就是说 边瓣相对于主瓣的位置以及大小都保持不变。在某种意义上讲 ,阵列天线的方向图在主波束指向不同方向时 ,是以一个整体偏移一个角度 ,但是它的内在结构没有变化。当然可以通过同时调制幅度和相位使波束达到需要的形状。在这种情况下 ,用于调制每个单元信号的相位和幅度可以认为是一个简单的复变量 ,用它对信号进行复加权。如果只有一个单元 ,这种调制是没有意义的 ,当存在两个单元时 就可以改变一个单元的权重使天线在某个位置达到预期值 ,比如可以将主波束指向和零点放在任意的角度上。可以推断出 ,一个有 L 个单元的阵列天线 ,将能确定 $L - 1$ 个位置 ,一个主波束方向和 $L - 2$ 个零点方向。

3. 零波束合成

可通过加权来控制阵列天线的方向图是很重要的性质。可以用来消除与期望信号具有相同频率且具有特定方向性的信号源的影响 ,当然前提条件是其不能与期望信号在相同的方向。当这些干扰源的方向是已知的情况下 ,就可以在这些方向上放置波束零点 ,使信号不能被接收或强度很微弱 ,不会形成接收信号的噪声。这种原理被称为零波束合成。同时零点还可以在某些控制下进行扫描 ,提高阵列天线的灵活性 ,这也被称为零点扫描。

4. 多样性合成

这里只强调阵列天线能提供的空间多样性。多样性合成是基于不同位置到达的信号具有不同衰落率的事实 ,用来克服无线信道中的衰落问题。具有多样性合成器的系统 ,用放在不同位置的天线(一般距离几个波长)接收信号 ,并以某种方法将其合成。可选择的合成方法有很多 ,比如 等幅合成器调整信号的相位 ,最大比率合成器选取和 SNR 相适应的加权系数。通常增加天线数目可以更有效的降低信道衰落 ,在实际中 ,10 – 20 个天线就可以得到满意的效果。多样性合成不同于阵列天线处理和波束合成 ,它是将信号在基带或在中频(IF)进行合成 ,在不影响天线方向图的情况下提高信号强度。而波束合成技术则是在射频(RF)对天线单元赋以不同的相位来改变整个阵列天线的方向图。

三、阵列天线在 无线通信系统中的应用

阵列天线可以实现单个天线所无法实现的复杂功能 ,具有更大的灵活性、更高的信号容量 ,能显著提高系统的性能。阵列天线可以应用于无线通信系统的多个领域。

1. 基站移动通信系统

系统的每个小区中都包含一个基站 ,并为小区中的移动终端服务。它向每个移动终端发送信号 ,并接收来自于终端的信号 ,并对它们的信号强度进行监视 ,当终端越过小区边界时进行切换。同时提供小区内终端之间以及与网络其余部分的联络。阵列天线可以用在基站和移动终端的很多方面。

(1) 在基站的应用

阵列天线应用于基站 ,使其具有多天线性能和空间多样性。

- 多波束合成。阵列天线应用于基站最简单也最直接的形式就是形成多波束状态 ,覆盖整个的小区。可以采用三分制(波束宽度 120 度)或六分制 (波束宽度 60 度)这样每个波束又被看成是一个亚小区 ,频率的分配还按照通常的模式。移动终端在脱离当前波束覆盖区时被切换到另外的波束覆盖区 就如同小区切换方式。

- 自适应波束合成。具有独立多波束自适应合成的阵列天线用于基站 ,能快速确定移动终端的位置 ,而波束能自动调整合成并覆盖终端或终端组。每个波束认为是一个共信道小区 ,使用相同的信号频率和编码规则。与多波束的情况不同的是 ,波束的形状并非固定 ,当终端移动时 ,不同的波束覆盖不同的终端组 ,当终端成组移动或在受限路径(比如高速公路)上移动时 ,这种技术尤其有效。

- 零点形成。无线通信中一个严重的问题就是共信道串扰 ,像将波束指向移动终端一样 ,可以将零点指向其它终端 ,来解决这个问题。它在两个方面起到作用 :在发射模式 ,很少的能量由基站传给这些共信道终端 ,减小基站对终端的串扰 ;在接收模式 ,可以减小这些终端对基站的串扰。

- 最优化合成。阵列天线工作在发射模式 ,消除不希望的共信道干扰 ,是一个重要的应用。信号的处理方式使得不希望的干扰受到抑制 ,而期望的

信号则得到加强。干扰信号的方向对信号处理模型不是很关键,但是期望信号的一些特征必须明确,以防止被误消。

· 动态小区形成。自适应波束形成的概念可以扩展到动态小区形状控制。代替固定的小区形状,阵列天线可以依信道使用情况划分小区。这种类型的基站要求具有良好的定位和跟踪能力,从而调整系统参数以适应通信容量的要求。很多DOA估计技术都假设点源存在,对于陆基移动系统这不完全正确,因为复杂的电磁散射造成信号源的蔓延,最终信号的到达融合进了多径效应,就好象在终端附近有很多不同强度的信号源。已有的实验结果显示,在870 MHz,从1 km的距离观察,估计角度蔓延为3度,相当于终端周围有半径为50米的散射区。这会给定位、跟踪以及信号获取增加难度,合适的波束形状将以增益损失为代价。小区形状和大小可以根据很多因素自适应调整,比如通信状况、依据接收要求动态调整的发射功率等,这种技术称为智能技术。

(2) 共信道信号的盲估计

从不同的终端到达的信号是沿着不同的路径,并且在不同的时刻到达各个天线单元。具有多传感器的基站可以利用这个特性,实现对接收的多终端叠加信号进行独立测量。与所采用的调制技术的特性相结合,就可以分离出从各个终端来的信号。利用基站阵列天线上各个单元测量得到的信号,就可以同步分离出各个信号。这个过程就是共信道信号的盲估计,它不需要方向因数和其他一些与终端相关的参量,如参考信号和训练序列等。

(3) 在移动终端使用阵列天线

通常有手持和车载两种终端,根据负载能力具有不同的装置要求,对于车载终端,装备有阵列天线和相关设备是可能的,但是对手持终端就很困难。根据天线的互易定理,装备在移动终端上的阵列天线其技术性能和应用方式与装备在基站上是基本相同的,只是要考虑到一些实际环境和终端成本、形状和体积等多方面的限制。如果在技术上取得突破,能得到适合于终端的阵列天线模型,移动通信系统的性能必然会成量级的提高。

2. 户内移动通信系统

在基站通信系统中,移动终端之间的通信是通过基站完成的。而在陆基移动通信系统和户内移动通信系统中,由于移动终端的类型和工作环境的区

别,将产生很大差距。对户内移动通信系统,移动终端为手持装置并以步速移动,而对于陆基系统,移动终端大多为车辆等。它们具有不同的调落率,户内系统要低得多,这意味着采用自适应技术可以实现最优化波束合成。两种系统的延迟扩散问题也是不同的,在陆基系统中,信号的延迟通常是由于山脉、建筑物等较大物体的反射,而在户内系统中,则存在大量的不规则的散射,这使得脉冲响应成为脉冲串,自适应阵列天线技术可以用来解决这些问题。

3. 卫星移动通信系统

系统中的终端(大多为车辆等)将直接与卫星通信,而没有基站系统中类似的中继站。阵列天线可以用在卫星和移动终端上。

(1) 卫星上的阵列天线

在卫星上可以加载阵列天线并提供多方面的通信。比如可以利用频率来确定通信小区,这与基站通信系统的主要区别,在于它是用波束来划分小区。阵列天线提供波束合成功能。

· 固定波束

最简单的情况就是波束的形状和大小都是固定的,可以用来覆盖感兴趣的区域,允许一般的越区切换。波束在覆盖不同区域的低轨多卫星系统中移动。已提出了用于移动通信的多波束相控阵天线,频率复用设备以及变波束功率分配策略等技术方案。在以前,相控阵被用作馈电网络控制波束覆盖不同区域。典型的系统可以包括一个大的高增益反射面天线,馈电单元放置于反射面的焦平面上,采用特定的几何结构以产生有限数目的固定形状侦测波束。波束由馈电单元的不同组合来实现,波束的扫描通过控制信号在到达馈电单元之前的相位来完成,信号在发射和接收模式中采用不同的电路线路。系统能产生多个具有独立功率控制和频率使用的侦测波束。

· 动态波束

采用固定波束的系统不需要系统通信量的信息,而波束随终端的位置动态变化形状和大小的系统则需要。对下行链路传输,可以通过控制波束的形状和覆盖区域把能量有效地传输到终端,同时减少在终端产生的共信道干扰;另一方面由于传输具有确定方向,也可以降低卫星系统能量的要求。要让系统具备这样的功能,需要先进的波束形成网络和独立的波束扫描能力。单片微波毫米波集成电路

(MMIC)技术的发展允许将功率放大器、移相器和低噪声放大器直接连接到天线单元,只占用卫星很小的空间就可以实现多波束功能。可以在卫星上集成大量的受数字化硬件独立控制的有源天线单元,与数字信号处理技术一起,提供大量任意形状的独立波束,并且可以扫描到任意位置。集成有高功率和低噪声放大器的有源天线已经被用在像 GLOBALSTAR 和 IRIDIUM 等系统中。具有大量天线单元的面板装配到卫星上,用来产生许多固定波束,形成共信道小区,每个小区支持一定数量的通信信道。系统允许正常的切换,不需要终端的位置信息来调整波束,每个波束为一组终端服务。

· 分离波束

指的是为每个终端分配独立的波束。卫星就是终端和基站之间的延迟中继站,但是卫星和基站、卫星和终端之间的通信采用不同的频率。很明显,每个终端都被跟踪并且波束指向它,而同一频率上的零点指向其它终端,在很近的范围内终端分配有不同的工作频率,但工作原理和 CDMA、TDMA 是一样的。值得注意的是,这里的方向定位和波束形成的算法工作在与基站移动通信中不同的环境,由于传输距离远,由终端到达的信号可以看作是点源,而多径衰落等问题也显得不是很突出。

(2) 移动终端上的阵列天线

阵列天线可以安装在移动终端上,直接和卫星进行通信,同时可以集成控制电路,使波束指向卫星。由于卫星和终端的相对方向经常发生改变,所以要求终端能跟踪卫星并且调整波束方向使其指向卫星。除此之外,陆基天线应该考虑到形状、大小等外观因素。目前在这方面已有了很多研究。多个天线被安装在终端上,波束的指向由移相器控制。

4. 卫星到卫星通信

卫星间通信在移动通信中将扮演重要的角色,尤其是利用低轨卫星的系统。卫星的位置快速变化,导致了他们之间相对方向的变化。阵列天线在这种情况下能起到重要的作用,可以使波束一直指向所需要的卫星,而在其他卫星的方向则配置零点。阵列天线可以跟踪卫星,也可以消除其他卫星的传输引起的干扰。

5. 用于发射模式的阵列天线

阵列天线在发射模式和接收模式中的地位是一

样的,前面所提到的应用包括这两个方面。在概念上,形成覆盖不同区域的波束,独立的波束指向不同的终端组,将零点配置在共信道的终端方向,动态小区形成等这些技术都可以用于这两个方面。但是完成系统所要求的信号处理和硬件技术却有很大的差别,比较多的研究集中在接收模式上。在接收模式搜集的信息可以用于发射模式,在接收模式估计出阵列天线最优化的权重,其复数共轭值用在发射模式,二者采用不同的时间隙。最优化的权重在上行和下行链路的时间间隔内可能发生变化,造成系统性能的严重降低。在信道干扰方向配置零点,可以采用波束空间合成技术。

四、应用阵列天线可获得的性能改善

阵列天线可以在很多方面改善移动通信系统的性能,能够降低共信道干扰和多径衰落,提供更好的服务质量。

1. 减少时延扩散和多径衰落

由于多径传输,从不同方向传输的信号由于传播距离的差别而受到不同的延迟,造成时延扩散。能够将波束以及零点定向到某个特定方向的系统可以从两个方面消除时延扩散:在发射模式,将能量集中对准期望的方向,可以减少多径反射,减少时延扩散;另外在接收模式,阵列天线通过多样性合成提供对多径衰落的补偿,在进行补偿后增加属于不同群组的信号,消除不同方向的时延信号。

2. 减少共信道干扰

阵列天线具有空间滤波的功能,在接收模式和发射模式都可以用来减少共信道干扰。在发射模式,形成定向波束,使发射能量集中在很小的区域内,接收模式也是一样的。这同时意味着在其他方向的干扰会很小。当波束数量增加时,共信道干扰会降低。在发射模式中,可以形成在其它接收器方向具有零点的特殊波束,进一步降低共信道干扰。这是有意降低向共信道接收器发射的能量,而且要知道他们的位置。在接收模式中降低共信道干扰是阵列天线一个主要的应用,他不需要共信道干扰的信息,当然如果可以获得的话,天线的方向图就可以在这些方向设置零点。一般的,自适应阵列需要预期信号的有关信息,比如方向、参考信号或与此信号相关的信号。在信号的方向精确已知的情况下,消

除干扰可以求解条件波束优化问题,否则可以利用参考信号,在CDMA中由码同步产生。

3. 频谱效率和容量的改善

频谱效率指的是分配了一定频谱的系统能处理的通信业务量,在性能不受损的情况下,移动通信系统中用户的增加使频谱效率提高。信道容量指的是一个给定带宽的信道所能支持的最大数据率,信道容量提高,可以增加确定数据率的用户,意味着更高的频谱效率。TDMA和CDMA比标准的FDMA有高的信道容量,允许将不同的时间片和编码分配给不同的用户,容量可提高5到10倍。如果采用多天线并将其信号合成,可更进一步提高容量,因为对共信道干扰和多径衰落的抑制可以提高服务质量,增加用户数量,所以,阵列天线的使用可以在保持服务质量的前提下增加用户数量;另外,阵列天线可以通过形成多波束来获得额外的信道,而不需要分配额外的频谱,这就从根本上增加了频谱效率。

4. 误比特率改善

利用阵列天线可以减少共信道干扰和多径衰落效应,从而使得通信质量在多方面得到改善,降低给定信噪比情况下的误比特率和误符号率,或者降低给定BER情况下对SNR的要求。通常当系统的SNR提高时,其BER会相应降低,在BER不可降低的环境下,也就是在单天线系统中SNR的提高不会使BER降低,利用自适应阵列能够获得比较大的改善。系统的用户数量增加时,会导致BER的增加,但可以采用阵列天线将其速率控制在最低点。

5. 提高传输效率

电扫描天线具有方向性,也就是在波束指向的方向上具有很高的增益,这可以扩展基站的覆盖范围,使小区面积增加,或者降低移动终端需要发射的功率,实验表明可以降低250mW到10W。这样的话,终端的电池能持续较长时间,或者能够使用容量较小的电池,可以获得更小的尺寸和重量。在发射模式采用阵列天线也很有优势,每个天线要发射的功率和单天线系统相比要小很多,这使得构成系统的元器件的要求可以降低,最终实现低的成本。

6. 动态信道分配

在移动通信中,信道通常是被固定的分配的,取决于终端的位置和小区中的可用信道量,当终端越过边界时,则被分配给一个新的信道,一个小区的信道数基本是固定的。利用阵列天线可以实现小区边

界的改变,从而根据通信量的变化要求分配每个小区中信道的数量。

7. 降低切换率

当小区中终端的数量超过它的容量时,就通过小区分裂来构造新的小区,每个小区都有自己的基站,同时分配有新的工作频率。这种方式的结果会导致切换率的提高,使用阵列天线可以使其降低。与小区分裂不同的是,容量的增加是通过多个天线产生多个独立波束来实现的,每个波束在终端位置改变时都进行调整,跟踪一组或单个终端,只要工作在相同频率的波束不交叉,就不需要进行切换。

8. 降低串话

当阵列传输多信道信号至几个接收器时,一些未知的传输环境可能会引起串话。基于终端反馈信息的自适应发射器能消除这个问题。定时的发送探测信号,反馈信息被用来确定传输环境,并同时融合在波束形成的过程中。

9. 经济成本的降低

如果在广播卫星上使用阵列天线,就可以利用它的低重量、低功率要求、天线设计的灵活性和坚固性、方向图的易控制性以及能使用更多固态元器件等诸多特性得到具有高性价比的系统,同时能够提供大的天线口径和通过信号处理进行误差补偿的机制。

10. 成本、复杂度和网络结构

根据前面的讨论,采用自适应阵列来改善性能的移动通信系统,需要对动态变化环境中的大量的时变参数进行估计和优化设计。尽管对于所考虑的系统以及阵列在系统中的工作模式决定了特定的系统参数,但是很明显实现这样一个系统总是需要很复杂的网络和系统结构。比如像动态切换,动态信道分配,动态波束形成,动态零点形成,期望终端的信息获取等这些性能都需要复杂的控制系统,这就对系统参数更新的时间提出了要求。系统要能够对快速移动的终端位置进行快速更新,而响应时间受到DOA估计和跟踪方案的限制,同时也要受到波束形成算法的收敛度的影响。并行计算可以得到时间上的优势,但是会增加成本。系统的成本不仅包括实现系统的硬件,还包括制作天线,以及和天线一起的移相器、放大器等相关电路,而且大多数元件都比较昂贵。

(2001-05-08 收到)

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，一直致力于专注于微波、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>