

未来数字移动通信中的分集技术展望

文/庄铭杰 郭东辉 吴伯信 厦门大学

【摘要】本文首先介绍了分集技术的分类和空间分集中常用的合并技术；在此基础上专门讨论了发射分集技术，并介绍了基于分集的空时格形编码和空时分组编码；最后对基于分集的空时码在未来移动通信中的应用和发展进行了展望。



1 引言

与目前的标准 9.6kbps 的数据传输率相比，下一代(即第三代)的无线通信系统将提供更好(有线通信)的话音质量、更快的数据传输率，其中 ISDN 可达 64k ~ 126kbps，微小区通信可达 128kbps，室内通信更达 2Mbps，Beyond 3G 更高达 100Mbps。在无线时变多径衰落信道中和带宽资源有限的情况下，要降低误码率提高传输质量是一件困难的事情，如在 AWGN 中，使用典型的调制和编码方案，误码率从 10^{-2} 降低到 10^{-3} 仅需要增加信噪比(SNR: Signal to Noise Ratio) 1 ~ 2dB。而在多径衰落信道下，得到相同的误码改善需要增加 10dB 的 SNR。尽管我们可以通过增加发送功率和额外带宽来获得 SNR 改善，但这违背了未来移动通信发展的要求。而且功率控制仅在克服多径慢衰落时较为有效，而在快衰落时，由于功率控制的速度有限，效果不明显；另一方面，功率控制可能增加对相邻小区的干扰，而使系统总干扰增加。因此，如何在不增加功率和不牺牲带宽的情况下，同时减少多径衰落对基站和移动台的影响就显得非常重要。唯一方法是采用抗衰落技术，它包括分集技术、自适应均衡、跳频、扩频交织及纠错编码技术等，其中主要的、且行之有效的分集技术。

常见分集技术包括时间分集、频率分集和天线(空间)分集等。由于空间分集可以不用牺牲信号频率带宽，在保证数据速率的同时获得极大的分集增益，因而是减小多径衰落的有效方法，颇受关注，是未来移动通信的关键技术之一。为了提高无线频谱的利用率，一种结合发射分集、调制和编码的空时码，它将多发送天线的空间分集、信道编码和

交织的时间分集以及接收端的信号处理结合在一起，能得到足够的分集增益和编码增益，以及提高带宽效率。随着人们对无线信道中的信息传输速率的要求越来越高，无线信道中的带宽限制成了提高信息传输速率的瓶颈，这就迫使系统设计者考虑在接收端和发射端使用多天线来获取空间分集。利用多发送天线和多接收天线(MIMO或MEA)的空间分集是解决这一问题最有效的方法。

2 分集技术

2.1 分集的分类

分集技术是利用自然界无线传播环境中独立的多径信号来实现，由于它们同时出现深衰落的可能性很小，故可以在多个信号中选择两个或更多的信号进行合并，这样可以提高接收端的瞬时信噪比和平均信噪比，一般可提高 20dB 到 30dB。分集有两重含义：一是分散技术，即如何得到多个携带同一信息的、统计独立的衰落信号。分散的方法有空间、极化、角度、频率和时间等。二是合并技术，即如何把收到的多个统计独立的衰落信号进行适当的合并，从而降低衰落的影响，改善系统性能。分集广义上分为宏分集和微分集。宏分集一般用于合并两个或多个长时限对数正态信号，是基站级的分集；而微分集是用于合并两个或多个短时限瑞利信号，它是同一基站上的接收信号分集，本文系指微分集。具体的分集有：

(1) 空间(天线)分集。它是利用多副距离足够大的接收天线来接收和合并多路不相关性的信号，是本文要讨论的内容；

(2) 频率(路径)分集。它是将待发送的信息分别调制到不同的载波频率上发送,只要载波频率大于信道相干带宽,则接收端接收到信号的衰落就相互独立;

(3) 时间分集。利用时间间隔大于相干时间的两个样点互不相关的原理,用大于相干时间的间隔重复发送信号,在接收端独立地分集这多路信号。时间分集的性能基本由移动台的运动速度决定,若移动台是静止的,时间分集就失效了,因为相干时间是和移动台的运动速度成反比的;

(4) 极化分集。利用不同电波极化的不相关性和它们呈现的不相关衰落特性产生多路分集信号的技术,它可认为是空间分集的特例;

(5) 角度分集。利用不同方向到达的信号的不相关性产生多路分集信号的技术。

2.2 合并技术和它们的性能比较

在分集中,接收端取得多个不相关信号后要进行合并处理,合并又有分解调前或后之分,常见的线性合并技术有:

(1) 选择合并(SC)。它选择瞬时SNR最高的支路信号;

(2) 等增益合并(EGC)。它是把各支路信号进行同相后再选加,各路加权权重相等,其性能只比最大比合并稍差一些,但比选择合并要好很多,是一种次最优的合并方案;

(3) 最大比合并(MRC)。它对多路信号进行同相加权合并,权重是由各支路信号所对应的信号功率与噪声功率的比值所决定的,最大比合并的输出SNR等于各路SNR之和。所以,即使当各路信号都很差使得没有一路信号可以被单独解调出时,最大比算法仍有可能合成出一个达到SNR要求的可被解调的信号,它是最佳的抗衰落线性分集合并技术;

(4) 反馈或扫描分集。与选择合并相似,但它不是总采用信号最好的支路,而是以一个固定顺序扫描多个支路直到发现某一支路的信号超过了预置的阈值,选中这路信号并送至接收机,一旦这路信号降低至阈值之下,扫描过程将重新开始。与选择合并相比,它的抗衰落统计特性稍差一些,但这种方法的优点是非常易于实现,仅需一个接收机。

在这四种合并技术中,最大比合并技术是较优的一种方法,图1是前三种常用合并技术的合并增益的比较;图2是L=6,BPSK调制下的各种合并技术误比特率大小随SNR的变化曲线,并给出AWGN信道和无分集的误比特率。由图1知:空间分集的支路数L越多,分集效果越好,但分集的复杂性也随之增加,且分集增益的增加随L的增大变得缓慢。

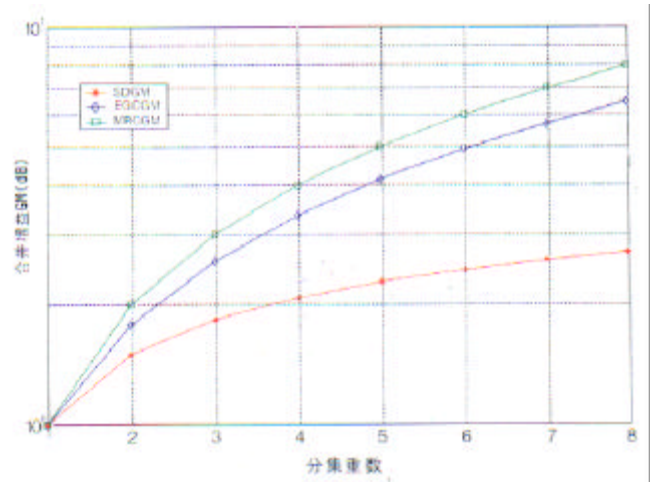


图1 三种常用合并技术的合并增益的比较

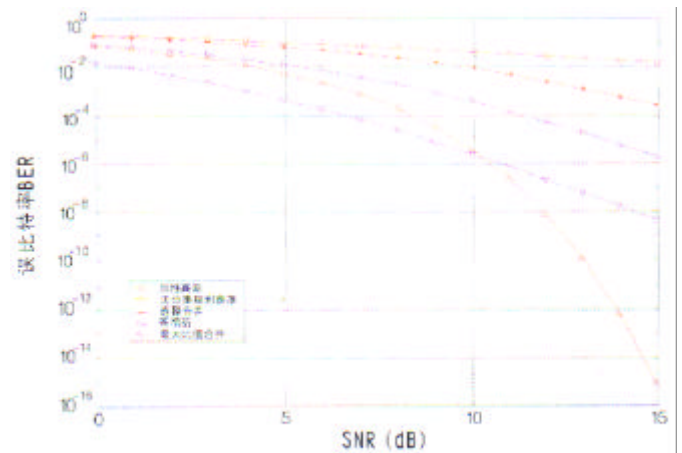


图2 BPSK调制下各种合并技术误码特性比较曲线

2.3 数字分集合并技术

近年来,随着DSP技术的发展和成熟,国内外关于数字移动通信分集的研究也十分活跃,提出了一些新的方法,其中主要有最小均方误差(MMSE)分集合并、最大似然(ML)估计分集合并等。这类研究的主要目的是发展新的合并方法,使得接收端尽可能多地获得分集所提供的增益,而不需要较复杂的增益调节或同相调整。

3 发射分集

发射分集近十年来才开始研究,它是由接收分集技术发展起来的,在一副以上的天线上发射信号,在信道中发射信号被设计成独立的衰落信号,在接收端对各路径信号进行合并,减弱信号的衰落效应。由于基站的复杂度较移动台端限制少,且天线有足够空间,通常在基站端采用多副天线进行发射分集以提高下行链路的性能,在接收端(即用户)仍采

用一副接收天线。相对于接收分集，发射分集的成本是运营商和用户均能接受的；而且发射分集能够实现与一副天线发射而同数副接收天线分集几乎一样的效益。如图3所示：

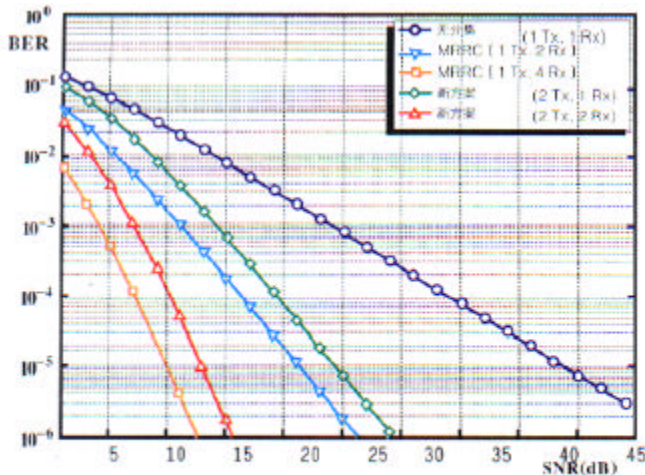


图3 瑞利衰落相干BPSK的MRC和两发射分集的BER的性能比较

发射分集有：反馈过程的发射分集、前向或有训练序列的发射分集和盲发射分集三类。第一类使用从接收端到发射端的隐含或明显的反馈序列来配置发射机。如时分双工系统，天线既作为发射使用又作为接收使用，因此反馈过程是隐含的。第二类在发射端使用线性过程将信息通过天线发射出去，在接收端利用一个最优的接收机来恢复信号，前向序列用来估计信道，在接收端对信道进行补偿。第三类既不需要前向序列也不需要后向序列，它利用多发天线和信道编码的连接来产生分集。同前两类发射分集相比，第三类的带宽利用率降低，这是因为使用了信道编码的缘故。若按接收机到发射机是否需要反馈电路，发送分集技术可分为开环和闭环两种类型，前者发射机不需要任何信道的知识，实现方式有：空时发送分集(STTD)、正交发送分集(OTD)、时间切换发送分集(TSTD)、延迟发送分集(DTD)以及分层的空时处理和空时栅格编码；闭环发送分集方式有选择发送分集(STD)。

4 基于空时编码的分集技术

在发射分集和接收分集基础上，空时编码综合考虑分集、编码和调制，它的最大特点是将编码技术和天线阵技术结合在一起，实现了空分多址，提高了系统的抗衰落性能，且能通过发射分集和接收分集提供高速率、高质量的数据传输。与不使用空时编码的编码系统相比，空时编码可以在

不牺牲带宽的情况下获得较高的编码增益，进而提高了抗干扰和抗噪声的能力，特别是在无线通信系统的下行(基站到移动端)传输中，空时编码将移动端的设计负担转移到了基站，减轻了移动端的负担。有三种典型空时编码，它可分为两大类：一类是没有分集的分层空时码；另一类是基于分集的空时分组码和空时格形码。

4.1 空时格形码 (STTC)

空时编码中的空时格形码(STTC)是由 Tarokh 等人提出的。如图4所示：

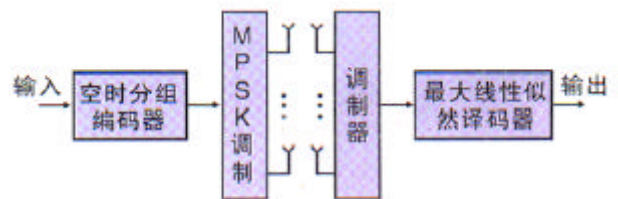


图4 STTC 工作框图

它将经过编码后的数据分成n个数据流，然后通过n个天线同时发射出去。在接收端，可以用单一天线，也可用多个天线进行接收，每一个接收天线接收到的是n个发送信号与干扰噪声线性的叠加，在接收端，采用Viterbi译码算法和信道估计技术结合以获得分集增益和编码增益，正确地识别出发送信号。STTC是将发射分集、信道编码及调制有机地结合起来，以获得高数据传输速率及低误码率性能的一种时间、空间联合编码方法。在准静态瑞利衰落信道下，文献[3]中设计出能在频带利用率、分集增益、调制方式、编码网格图复杂度之间达到最佳折衷的STTC，这种最佳折衷主要指的是在频带受限系统中给定的分集增益下可达到最大的频带利用率。若系统对频带利用率要求不高，即功率受限系统，文献[3]利用多重格形编码技术提出了低码率多维STTC。但是，多重网格编码技术仅适用于无记忆信道（即通过理想交织形成独立衰落）。由于准静态瑞利衰落信道不满足信道无记忆的条件，多重格形编码的技术就不仅不能提高系统性能，反而增加了码结构的复杂度。

4.2 空时分组码 (STBC)

为了克服格形码译码复杂的缺点，文献[2]中Alamouti提出了空时分组码的结构，有效地克服了格形码译码过于复杂的缺点，Tarokh在Alamouti研究的基础上，应用正交设计理论，提出了一般的正交空时码。空时分组码译码也象分层空时码那样采用联合检测算法译码，但它利用正交性，

采用最大似然译码算法实现,故空时分组码具有很低的译码复杂度,而且还可能得到最大的发射分集增益,图5是它的工作框图。其缺点是不能提供任何实质性的编码增益,但由于它在性能和硬件实现的复杂度之间做了折衷,所以形成了一个有实用性的方案。

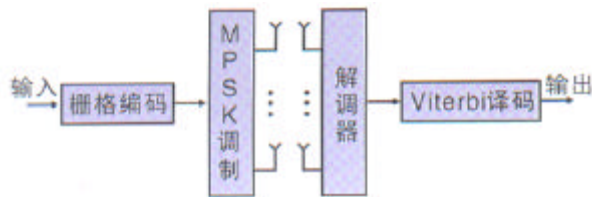


图5 STBC工作框图

4.3 空时格形编码和空时分组编码比较

由于空时格形码考虑了前后输入的关联,所以空时格形编码能在频带利用率、分集增益、调制方式与编码网格图复杂度之间达到最佳的折衷。它除了可以获得分集增益外还可以获得一定的编码增益,因此,它比空时分组码应该具有更好的性能。但是,对于发射天线数固定的空时格形码而言,其译码复杂度与发射数据速率成指数关系。而根据正交设计理论的空时分组码虽然不能获得编码增益,却具有很低的译码复杂度,利用简单的最大似然译码算法即可,无论增加发送天线数还是增加数据传输率都不会对译码复杂度造成太大的影响,还可能得到最大的发射分集增益。因此,空时分组编码已经被正式列入在WCDMA提案中。

5 分集在未来移动通信中的应用展望

随着因特网和多媒体的结合,未来无线通信对提供高速可靠的数据业务的要求越来越高,而在无线多径衰落信道中提高传输质量和降低误码率却变得越来越困难,如何解决这个问题是目前国内外的许多学者正致力于研究的热点。下面就分集技术如何在未来移动通信中发挥作用以及它与其他抗衰落技术的结合可能性进行分析和展望。

(1) 多发射天线和多接收天线系统(MIMO)

MIMO系统是一种发送分集和接收分集的混合,再加上它与空间分集、时间分集和编码技术组成的空时码相结合,这使它成为近来和将来一段时间内研究的热点。文献[1]表明:在发射端和接收端使用多天线技术可以获得相当高的信道容量和系统性能,文中推导出多输入多输出MIMO系统瑞利信道的近似容量在信道传输特性已知的情况下与 $\min(m, n)$ 成正比,其中 m, n 分别为发射端和接收端的天线数目。在相同的发射功率和传输带宽下,该系统的信道容量比单

输入单输出(SISO)系统的容量提高了40多倍。发射分集技术虽已被纳入3GPP国际标准中,但对它的研究尤其是时空发射分集的研究方兴未艾。这方面在MIMO中存在两方面令人感兴趣的问题,一是功率分配问题,即如何在发射分集中最优地分配各天线的发射功率(假设发射总功率一定),使得MIMO系统的传输质量得到最好改善,即信号传输误码率下降,恶化变好以及信号间的相互干扰减小;二是天线子集选择问题,因为多天线需要多射频(RF)电路,RF是非常昂贵的,故寻找具有MIMO天线优点且低价、低复杂的最优天线子集选择技术是具有诱惑力的。

(2) 基于分集的空时码结合OFDM

由于目前空时编码主要是针对准平坦瑞利衰落信道的,而实际高速数据传输的信道通常呈现频率选择性。因此,可以采用适用于高速数据传输的OFDM系统,这样可使符号持续的时间大大增加,并在子载波上呈现非频率选择性的衰落,取得良好的抗衰落性能。基于分集的空时码应用于OFDM的系统中。通过理论和仿真都可以证明它在频率选择性信道中能够达到空时编码在准平滑衰落信道下相同的性能。

(3) 空时码的译码看法改进以及与其他技术的结合

由于格形码比空时分组有更好的性能,但其编译码的复杂度要高一些。对于空时分组码来说,空时格形码本身不但提供了分集增益,而且还提供了编码增益,因此,研究简单的空时格形码译码算法一直是国内外学者的研究目标;另外,研究空时格形码和空时分组码在不同衰落信道下的性能和复杂度的比较也是一个必须要面对的问题。空时编码结合其他技术:与智能天线技术等结合的空时处理技术,它一直是国际上研究的热点;与Turbo码级联空时码的方案;与信道均衡、多用户检测等的结合使用。相信分集技术将在下一代高速无线数据通信中得到更广泛应用。

主要参考文献

- [1] G J Foschini, M J Gans. On Limits of Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multiple Antennas. Wireless Personal Commun, Vol 6, No 3, Mar 1998
- [2] S A Alamouti. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication. IEEE JSAC, 1998
- [3] V Tarokh, N Seshadri, A R Calderbank. Space-time Codes for High Data Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction. IEEE Trans On IT, Vol 44, No 22, Mar 1998