DOI:

采用分布式Alamouti编码的虚拟全双工

中继通信方案

邵彦彰，王磊，薛奕蕾

(西安交通大学电子与信息学部，710049，西安)

摘要：针对单输入单输出系统无法获得发射分集的缺陷以及全双工中继（FDR）通信中存在自干扰（SI）降低系统性能的问题，提出了一种采用分布式Alamouti编码的虚拟全双工（VFD）中继传输方案（DA-VFD）。该方案先将3个时隙划分为一组并在第1、2个时隙内传输发送符号以及发送符号的复共轭至中继节点和目的节点，再在第3个时隙将前两个时隙的接收符号联合解调，由于联合解调时的公式具有Alamouti的形式，因此目的节点可以获得二阶发射分集，抵抗信道衰落对系统误码性能造成的不利影响；同时，由于2个半双工节点在地理位置上隔离，其中一个节点发送的信号不会被另一个节点接收到，避免了全双工通信中SI带来的系统性能下降以及对SI消除带来的硬件需求；最后通过2个半双工中继之间的相互配合，达到近似于全双工（FD）通信的频谱效率。仿真结果表明，DA-VFD方案的误码性能不受残余自干扰（RSI）的影响，并比Alamouti FD方案具有更好的误码性能：在消除质量参数为0.5的情况下，频谱效率为1.33 b/(s·Hz)时，可以获得约2dB的性能增益；频谱效率为2.67 b/(s·Hz)时，可以获得约6dB的性能增益。

关键词**：**协作通信；分布式Alamouti编码；虚拟全双工通信；发射分集

中图分类号**：**TN929.5 文献标志码：A 文章编号：0253-987X(2020)12-0000-00

**Distributed Alamouti-Based Protocol for Virtual Full-Duplex Relaying Networks**

SHAO Yanzhang, WANG Lei, XUE Yilei

(Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China)

**Abstract**: A distributed Alamouti-based protocol is proposed for virtual full-duplex (VFD) relaying networks which is called DA-VFD, to solve the problem that single-input single-output (SISO) system cannot achieve the transmit diversity, as well as the performance degradation which is caused by the self-interference (SI) in full-duplex (FD) system. In order to obtain the second order transmit diversity against the channel fading, which leads to drawbacks of the BER performance, DA-VFD combines three time slots as a group for transmission: the source thansmits symbols and the complex conjugate of symbols in the first and the second time slots to relay and destination, and destination demodulates the symbols together in the third time slot; meanwhile, with the isolation of two half duplex (HD) relays, the system avoids the drawbacks of the self-interference which is caused by the relay working in FD mode, and the hardware requirement of SI cancellation is also avoided by using virtual full-duplex (VFD) relaying technology; in addition, owing to the cooperative network with two half-duplex relays, the spectral efficiency of DA-VFD is approximately equal to that in full-duplex relaying (FDR) scheme. Simulation results indicate that the BER performance of DA-VFD is not affected by RSI and outperforms the existing Alamouti FD: when the spectral efficiency is 1.33 b/(s·Hz) and the quality of SI cancellation is 0.5, DA-VFD obtains about 2dB BER gains than Alamouti FD; when the spectral efficiency is 2.67 b/(s·Hz) and the quality of SI cancellation is 0.5, DA-VFD obtains about 6dB BER gains than Alamouti FD.

**Keywords:** cooperative network; distributed Alamouti coding; virtual full-duplex transmission; transmit diversity

在全双工中继（FDR）系统[1-2] 中，由于中继节点工作在全双工（FD）模式，能够同时同频接收和发送信号，因此理论上能够获得的频谱效率是传统半双工中继系统的2倍。此外，中继的引入还能够显著提升系统的稳定性和吞吐量。因此，全双工中继通信作为5G通信[3]中很有发展潜力的一种通信技术而被广泛研究。但正是因为“同时同频”的收发特性，中继节点将会受到严重的自干扰（SI）影响，造成系统性能的大幅下降，如果不对FDR系统中的SI进行抑制，其性能甚至低于半双工中继系统。因此，SI消除效果的好坏直接决定了FDR的系统性能，这也是制约全双工传输技术发展的瓶颈所在。同时，在信号每一次的传输过程中，由于信道估计误差、信号时延等造成的SI消除质量不稳定也影响着全双工系统的性能。

目前对于FDR通信的研究主要集中在SI消除方面。通过相应的消除技术[4-6]，可以联合空域、模拟域以及数字域的消除方法对中继节点的SI进行抑制或消除，使系统获得优于传统半双工中继系统的性能。但由于系统中普遍存在的同步误差、延时、信道估计误差以及硬件性能制约等客观因素，完全消除SI是不现实的，因此残余自干扰（RSI）将不可避免地存在于系统的基带信号中，成为制约FDR系统性能的主要因素之一。此外，目前大多数SI消除均建立在大规模MIMO天线以及复杂的数字域滤波算法之上，且需要通过增加障碍物遮挡、涂屏蔽层等物理方法人为增加收发天线的隔离度。这就为全双工通信的实现带来了额外的电路设计复杂难度以及高额的硬件成本。然而，现实中并非所有通信场景都适合采用MIMO技术。同时，考虑到成本因素，某些场景（比如协作通信）对配置设备的价格成本有着严格的控制要求。因此，在全双工技术发展成熟之前，亟需一种能够同时继承全双工通信高频谱效率以及稳定性的替代方案。

虚拟全双工技术（VFD）的提出正是为了解决上述问题。通过2个工作在半双工模式的中继节点与源节点相互配合，VFD能够实现类似全双工通信“同时同频”的传输方式，且同时具有中继传输高可靠性、系统信号覆盖范围广的优势。其中，VFD通过采用2个或多个工作在半双工模式的单天线中继分别用于接收和发送信号，使得它的接收天线与发射天线在地理位置上相互独立，从而避免了FDR系统中的最大的瓶颈——SI。此外，VFD只需利用已经发展成熟的半双工中继技术即可实现全双工通信，一方面降低了全双工通信中SI的消除成本，另一方面避免了SI消除质量不稳定导致的系统性能不稳定。

为了使VFD中继系统获得更加接近于FDR系统的频谱效率，同时进一步提升系统的某些性能指标，研究者们提出了一系列的VFD中继传输方案。文献[7]中提出了一种采用差分二进制相移键控调制的VFD中继传输方案，该方案通过在目的节点采用差分传输抵消中继间的相互干扰，同时避免了信道估计误差带来的影响。仿真结果表明该方案能够实现近似于全双工传输的频谱效率，但是系统无法获得分集增益。文献[8]从能量收集角度出发，在利用干扰信号获取能量的同时，通过在中继节点增加预编码矩阵，对中继间的相互干扰加以控制，提高了系统的性能和传输效率。为了获得更高的分集与复用增益，文献[9]提出了一种中继节点采用多天线技术（MIMO）的协作通信方案。实验结果表明，MIMO技术的引入显著提升了系统的传输速率与可靠性。类似地，文献[10]也提出了一种采用MIMO半双工中继的VFD方案，该方案中的源节点与目的节点更进一步地也被设计为MIMO节点，从而获得了比方案[9]更高的传输速率与稳定性。但是该方案的缺点也显而易见，即MIMO技术的引入大幅度增加了系统的复杂度，同时也带来了发射功率增加、天线同步困难以及信道误差增加等一系列问题。针对这一问题，文献[11]中给出了较好的解决方案。通过中继选择技术，该方案在同一时间只激活多个中继节点中的一个进行信号传输，其余未激活的中继用于接收，大大降低了系统的发射功率，简化了中继相关的传输链路。同时，空间调制[12-13]（SM）还能够通过天线索引携带额外的信息量，保证了系统的传输速率。此外，为了充分利用多中继系统的分集增益，文献[14]中提出了一种基于天线选择技术的VFD中继方案，使系统在低传输速率情况下能够获得接近满分集的增益。文献[15]在天线选择的基础上，提出了一种基于非正交多址（NOMA）的VFD框架，通过提出的一种自适应中继选择算法，实现了更低的系统中断概率。类似地，文献[16]中提出了一种采用放大转发协议的虚拟全双工协作NOMA传输方案，获得了较好的系统性能和更高的传输速率。文献[17]研究了一种采用译码转发协议的虚拟全双工协作NOMA传输方案，仿真结果显示所提方案的性能相较传统VFD NOMA方案获得很大提升。此外，文献[18]还研究了采用译码转发协议的虚拟全双工中继在多跳情况下的传输方案，并推导出了系统的可达速率。文献[19]的研究中提出了一种采用缓冲辅助的多中继虚拟全双工传输方案，通过缓冲区的应用优化了系统的中断概率以及延时。以上研究证明了虚拟全双工是一个很有发展前景的研究方向。从上述文献中可以看到，为了使单天线节点获得分集增益，文献[11，14-15]的系统中均采用了多个中继进行协作通信的模式，且系统性能取决于中继节点的数量，这就带来了硬件成本的大幅增加。

针对上述问题，文献[20-21]给出了较好的解决方案，通过与一个FD中继节点进行配合，源节点能够通过相应的编码机制，分别通过3个时隙的协作传输在目的节点构造出近似于2发1收的Alamouti发射方案[22-24]的接收形式，从而使系统获得发射分集。通过3个时隙传输2个符号的协作传输方式，2篇文献的系统频谱效率均为2/3 b/(s·Hz)，低于满速率传输时的系统频谱效率（1 b/(s·Hz)），但仍高于半双工系统传输频谱效率（1/2 b/(s·Hz)）。但是由于FD中继涉及到SI消除带来的不确定性，导致以上2种方案获得的误码性能均不稳定。

在此背景下，为了解决文献[20-21]中提出的FDR方案无法获得稳定的误码性能、同时为了解决VFD通信中单天线节点无法获得发射分集，以及多中继节点协作通信获得分集依赖中继数量而导致的硬件成本高的问题，本文提出了一种采用分布式Alamouti编码的虚拟全双工中继通信方案（Distributed Alamouti Virtual Full-duplex Relaying Networks），简称为DA-VFD方案。在DA-VFD方案中，一个采用单天线的源节点通过采用相应的分布式Alamouti编码，与2个同样配置单根发射天线且工作在半双工模式的中继节点进行配合，能够实现近似于全双工通信的频谱效率。同时，相较于FDR系统，所提出的DA-VFD方案能够获得更加稳定的误码性能。

1 VFD传输模型

考虑一个如图1所示的协作通信模型，在2个单天线中继和的协助下，采用单天线的源节点与采用单天线的目的节点进行单向通信。考虑到中继之间存在物理隔离，在本文中我们假设2个中继之间不存在相互干扰[11][25]。此时模型中一共包含5条传输信道，分别是源-中继传输链路到的信道、到的信道，以及中继转发链路到的信道、到的信道以及直传链路到的信道。假设模型中的信道均服从准静态瑞利衰落，即在相邻的协作时隙内信道状态信息保持不变。更进一步，我们沿用文献[20][21]中的假设，模型中的信道状态信息在一个协作时间段内（包含3个协作时隙）保持不变。同时，所有信道中的元素均服从于均值为0方差为1的独立复高斯分布。

图1 虚拟全双工中继通信模型

在模型中，中继和均采用译码转发协议进行转发，即：中继首先对接收到的源信号进行解码，随后依据设定的编码规则对解调出的比特重新编码，再将处理后的信号转发给目的节点D。由于对信号的解调和编码等信号处理操作需要时间，因此中继在第个时隙接收到的信号将在第个时隙转发。注意到2个中继均工作在半双工模式，因此在同一时刻每个中继只能进行信号接收与发射中的一项操作。

2 DA-VFD传输方案

DA-VFD方案包含2种工作模式，分别是协作工作模式和SISO工作模式。当中继节点能够正确解调来自源节点的广播信号时，整个系统将工作在协作模式；相反，当中继节点不能正确解调源节点信号时，系统将工作在SISO模式。

2.1 DA-VFD工作模式判定

通过香农公式，能够得到系统中源-中继2条链路的可达速率和。当2条源-中继链路的可达速率同时大于或等于系统的传输速率时，意味着2个中继节点均能正确解调来自源节点的传输信号，此时系统将工作在协作模式。当源至中继信道的可达速率不能满足系统的传输速率时，该链路将会发生中断，此时系统将切换至SISO模式，仅利用直传链路到对源节点信号进行最大似然解调。

2.2 协作工作模式

在协作模式下，源节点将与2个中继节点进行配合，通过分布式Alamouti编码在3个协作时隙内与目的节点构造类似于2发1收的Alamouti传输方案的等效接收形式。最后，目的节点通过采用相应的信号处理，获得发射分集增益。

以通信开始的前3个时隙为例。在通信开始时，源节点首先广播第一个符号，我们将其记为第一个通信时隙。此时，中继节点、以及目的节点均能收到来自源节点的广播信号。此时各节点的接收信号可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | () |

式中：为每根发射天线平均发射功率的信噪比。；、以及分别表示中继节点、以及目的节点在第一个时刻接收信号中的加性高斯白噪声。

在接收到源节点的第一个发射信号后，目的节点将保留第一个时刻的接收信号，此时不做任何处理。中继节点将对源节点信号进行最大似然解调，得到源节点第一个时刻的传输符号，并对解调得到的符号取共轭，得到的用于下一时隙发送。中继节点对于此时的接收信号不做任何处理。

在通信开始后的第二个时隙，源节点广播第二个符号，同时转发。此时，中继节点只有能够接收到源节点的广播信号。同时，目的节点的接收信号中包含了2部分信号，分别是源节点在第二个时隙的广播信号以及中继节点的转发信号。则在一个协作时间段内的第二个时隙中继以及目的节点的接收信号可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  (2) |

其中以及分别表示中继节点以及目的节点在第二个时隙接收信号中的加性高斯白噪声。

在接收到源节点第二个时隙的广播信号后，中继节点将对接收信号进行最大似然解调，并对解调出的符号取共轭的相反数，得到的符号用于下一时隙发射。此时，目的节点将保留第二个时隙的接收信号，不做任何处理。

当通信进行到一个协作时间段内的第三个时隙时，源节点将不发射信号，此时通信系统中只有转发符号。因此在一个协作时间段的最后一个时隙，目的节点只接收到来自中继的转发信号，如下所示

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

其中表示目的节点在第三个协作时隙接收信号中的加性高斯白噪声。

当DA-VFD工作在协作模式时，将依次按照上述3个时隙的传输过程循环进行。

2.3 协作模式下的信号处理

在协作模式下，目的节点将联合3个时隙的接收信号进行解调。首先，目的节点将对3个时隙的接收信号进行信号处理，以获得类似于2发1收Alamouti传输方案信号的接收形式。

通过前文的介绍，目的节点在3个协作时隙的接收信号分别表示为、和。假设目的节点能够完美估计出与之相关的无线信道、以及。此时，目的节点分别将前2个时隙的接收信号乘以，将第三个时隙的接收信号乘以，并将处理后的第一个与第三个时隙的信号相加记作，将对第二个时隙处理后的信号记作，此时可以得到

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

整理后可以得到

|  |
| --- |
|  |



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

通过对取共轭，同时记、，可以得到公式（5）的等效MIMO模型表达式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

其中表示DA-VFD在MIMO模型下的等效接收矩阵，表示等效发射向量，表示等效MIMO信道矩阵，表示等效高斯噪声向量。

可见，此时目的节点通过对协作模式3个时隙的接收信号进行处理，构造出了类似2发1收的Alamouti发射方案的等效MIMO接收形式，通过相应的解调方式就能够获得发射分集。

2.4解调

采用Alamouti编码的发射方案支持目的节点采用线性解调，因此DA-VFD方案能够利用其解码复杂度低的优势实现快速译码。通过采用线性最大似然（ML）译码，调制阶数为的DA-VFD系统，其目的节点处的译码复杂度将从降低为。

2.4.1线性ML译码

通过将公式（6）的等效信道矩阵取共轭转置并与公式（6）相乘，我们可以得到下式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (7) |

根据上式，目的节点对接收信号进行处理后，可以采用最大似然准则分别对符号和符号进行独立解调。线性ML译码器可以设计如下

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

其中是调制阶数为的星座集合；（）作为遍历符号对该集合中的所有可能符号进行遍历，并对分别使得和的欧式距离最小的符号做出判决。

通过上述方案，3个时隙内传输的所有符号都可以被依次解调。在协作模式下目的节点实现了通过3个时隙解调2个符号的传输速率，因此DA-VFD方案在协作模式的传输速率为2/3 b/(s·Hz)。可见，虽然协作模式下的系统传输速率未达到满传输速率，但仍高于半双工传输系统下1/2 b/(s·Hz)的传输速率。

3 性能分析

本节对提出的DA-VFD方案的点对点性能进行分析。首先，分析了DA-VFD方案的系统中断概率。其次，通过得到的系统点对点中断概率表达式，进一步对DA-VFD方案的分集复用折衷性能（DMT）进行分析。

3.1 中断概率

无线通信系统中，当系统的某一传输链路的可达速率不能达到系统的传输速率时，该链路就会发生中断。因此，当系统传输速率为*m* b/(s·Hz)时，DA-VFD方案的中断概率可以通过各链路的中断概率加权进行表示

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

其中表示整个DA-VFD系统的中断概率；表示系统工作在协作模式的中断概率；表示2条源-中继链路同时不发生中断的概率，可以通过公式（10）进行计算，且和分别表示和链路的中断概率；表示直传链路的中断概率。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (10) |

从公式（9）中可以看出，整个DA-VFD系统的中断发生在源-中继链路未发生中断，但协作模式发生中断时；或者源-中继链路发生中断，且直传链路发生中断时。

根据公式（6），我们可以通过香农公式和等效MIMO模型，得到DA-VFD方案工作在协作模式的信道容量(bpcu)为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (11) |

此时，可以进一步得到协作模式下的中断概率表达式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (12) |

同理，可以得到2条源-中继链路的中断概率表达式以及直传链路中断概率表达式分别如下

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (13) |
|  |  | (14) |
|  |  | (15) |

其中，由于2个中继节点仅工作在DA-VFD传输方案的协作通信模式下，因此中继节点仅在3个时隙中的2个时隙传输符号。因此，为达到大小为*m*的系统传输速率，中继节点在2个时隙的实际传输速率必须达到3*m* /2。

3.2 分集复用折衷

MIMO系统能够同时获得分集增益与复用增益，但是二者存在着定量的折衷关系。例如，在MIMO系统接收、发射天线数确定的情况下，要想获得最高的分集增益，应该让所有发射天线发射相同的符号，此时系统能够获得最高的空间自由度；相反，如果想要系统达到最高的传输速率，则应该让所有发射天线发射不同的符号。因此，研究MIMO系统中分集与复用的折衷关系，能够更全面的评价系统性能。

通过定义，文献[26]在研究中给出了MIMO系统的分集与复用的关系，即当分集增益与复用增益满足（16）时

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (16) |

MIMO系统能够同时获得大小为的分集增益与大小为的复用增益。通过定义

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (17) |

可以得到，其中表示当时的近似相等，并进一步得到。类似地，可以得到关于各链路的相应表达式：，，，。

通过上述关系表达式，可以继续借助文献[10]中的基础理论对DA-VFD系统的分集与复用折衷关系进行推导。通过公式（12）可以得到系统工作在协作模式下关于分集增益与复用增益的中断概率表达式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (18) |

此时可以得到DA-VFD在协作模式下的分集增益与复用增益的折衷关系：，其中表示取与0中最大的数。

通过公式（13），可以得到源-中继链路的分集与复用的折衷关系如下

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (19) |

注意链路的分集与复用折衷关系与链路相同，因此不做重复推导。通过结合公式（10）与公式（13），可以得到DA-VFD在协作模式下的源-中继链路的分集与复用的折衷关系：。

最后，通过公式（15），可以推导出直传链路的分集复用的折衷关系

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (20) |

其中。

结合之前推导的各链路的分集与复用的关系，最终可以得到DA-VFD系统的分集与复用的折衷关系如下

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (21) |

4 仿真结果

本节将DA-VFD方案与现有的同样采用分布式Alamouti编码的全双工中继传输方案[20]（简称为Alamouti FD）进行比较，给出了采用不同调制阶数以及不同信道条件下2种传输方案的误码性能的Monte Carlo仿真结果，随后给出了2种系统的分集与复用的折衷关系的数值仿真结果，并对仿真结果进行分析。在仿真过程中，如未特殊说明，所有信道中的元素均服从均值为0、方差1的瑞利分布。假设2个方案中的源节点与中继节点采用等功率发射，即。注意到本方案利用2个半双工中继模拟了一个全双工中继，但是同一时间只有一个中继被激活用于发射，因此在上述假设下进行性能比较是公平的。

图2给出了采用4QAM调制，在频谱效率为4/3 b/(s·Hz)时，DA-VFD方案与Alamouti FD方案在不同SI消除质量下的BER仿真曲线。由于全双工方案SI消除质量的不确定性，因此DA-VFD方案的误码曲线将与不同SI消除质量下的Alamouti FD方案的误码曲线进行比较。在Alamouti FD方案中，SI信道被建模为均值为0，方差为的瑞利信道，其中，SNR为系统的接收信噪比。因此，可以通过控制参数的大小控制SI信道的方差，进一步控制系统中残余自干扰（RSI）的大小，研究不同SI消除质量下系统的性能表现。其中，参数用于衡量SI消除的质量好坏，具体地：从1到0依次表示SI消除质量由好到坏。图中表示非常好的SI消除，此时SI的影响可以忽略；相反，表示SI消除质量很差，此时SI将对系统性能产生较大影响。因此，由于SI消除效果的不确定性，在不同SI消除质量下Alamouti FD方案的误码性能也不同。可以看到，在信噪比区间0到20dB时，DA-VFD方案的误码性能整体优于对比方案。这是由于低信噪比时，Alamouti FD方案中存在的RSI对系统性能的影响较大，而DA-VFD方案不会受到SI影响。随着SNR的增加，高SI消除质量下对比方案获得的分集增益高于DA-VFD方案，因此在20dB时DA-VFD的BER曲线被Alamouti FD方案和的2条曲线超过，但仍优于和时对比方案的误码性能。



图2 采用4QAM调制时DA-VFD的BER性能和Alamouti FD的BER性能比较

图3中给出了采用16QAM调制，在频谱效率为8/3 b/(s·Hz)时，DA-VFD方案与Alamouti FD方案在不同SI消除质量下的BER仿真曲线。可以看到，随着系统调制阶数的增加，Alamouti FD方案在不同SI消除质量下的误码性能均出现不同程度的恶化，尤其是和时的2条BER曲线几乎重合。通过比较可以发现，当采用16QAM调制时，DA-VFD方案的优势更加明显：在35dB之前，DA-VFD方案的误码性能整体优于不同SI消除质量下的对比方案的误码性能。这是因为随着系统调制阶数的提高，RSI对Alamouti FD误码性能的影响也更加明显。得益于不会受到SI影响，DA-VFD的优势在高调制阶数时更为明显。在35dB后，DA-VFD方案的误码性能仍优于SI消除质量区间内的Alamouti FD方案的误码性能。



图3 采用16QAM调制时DA-VFD的BER性能和Alamouti FD的BER性能比较

图2和图3中DA-VFD与Alamouti FD方案的比较结果，均说明了全双工中继传输方案中SI消除质量的不确定性对Alamouti FD方案的影响很大，尤其在系统调制阶数较高时，影响更为明显。而所提出的DA-VFD方案有效地避免了FD传输时RSI对系统性能带来的不利影响，因此获得了更加稳定的BER性能。

图4中给出了在特殊信道条件下采用16QAM调制，当频谱效率为8/3 b/(s·Hz)时，DA-VFD方案与Alamouti FD方案在不同SI消除质量下的BER仿真曲线。与之前的信道假设不同，图4中的2条源-中继信道、中的元素分别服从均值为0方差为1.5的瑞利分布；2条中继转发信道、中的元素分别服从均值为0方差为2.5的瑞利分布。虽然以上假设并不具有实际意义，但却是研究中继协作通信系统性能的一种常用研究方法[11][18]。从图4中可以看到，相比图3，此时DA-VFD方案的误码性能优势进一步扩大，在40dB时的BER相较和时的2条BER提高了一个数量级。通过公式（8）可以看到，DA-VFD方案能够获得的接收分集增益大小为：，其中， 。依据文中假设所有信道相互独立，因此DA-VFD方案在协作模式下目的节点获得的接收分集增益大小为：。相较对比方案的接收分集增益：，当无线信道方差大于1时，DA-VFD方案获得的接收分集增益相较Alamouti FD方案获得的接收分集提高了倍。由于的概率随信道方差的增加而增加，从而DA-VFD能够在信道方差大于1时，获得比对比方案更好的系统误码性能。因此，DA-VFD方案在信道状态较好的通信场景中能够获得比Alamouti FD方案更好的系统误码性能。还可以发现，DA-VFD方案的误码性能依赖于与中继相关的信道质量。



图4 特殊信道条件下采用16QAM调制时DA-VFD的BER性能和Alamouti FD的BER性能比较



图5 DA-VFD的分集与复用性能和Alamouti FD的分集与复用性能比较

图5给出了在高信噪比下（）DA-VFD方案与Alamouti FD方案在不同SI消除质量下的系统分集与复用折衷关系的比较。从图中可以看出，在大多数情况下，DA-VFD的方案的分集与复用的折衷性能均优于Alamouti FD方案，且当复用增益时，达到了Alamouti FD方案在最优SI消除效果即时的分集与复用折衷性能。但是当Alamouti FD方案的SI消除质量在至，且当系统复用增益较低时，DA-VFD方案获得的分集增益仍不及Alamouti FD方案，进一步验证了图2至图3中二者的BER仿真结果。这是因为DA-VFD获得的分集增益来自于系统工作在协作模式获得的发射分集增益。由公式（10）可知， DA-VFD系统工作在协作模式的概率即为2条源-中继链路同时不发生中断的概率，显然要低于相同信道条件下对比方案（仅有一条源-中继链路不发生中断）工作在协作模式的概率。但同时，Alamouti FD方案的分集增益还受到系统SI消除质量影响。因此，造成了DA-VFD在较低时获得的分集增益低于SI消除质量较好时Alamouti FD获得的分集增益。通过与SISO系统的分集与复用增益比较可以发现，当DA-VFD方案的复用增益时，系统的分集增益将低于SISO传输方案的分集增益。

5 结论

本文提出了一种采用分布式Alamouti编码的虚拟全双工通信方案，简称DA-VFD方案，该方案通过2个半双工中继之间的配合实现了一个全双工中继的功能。通过采用分布式Alamouti编码，系统能够在协作模式下获得发射分集，提高了系统抵抗信道衰落的能力。同时，通过2个半双工中继模拟一个全双工中继，避免了全双工中继中最大的问题——SI对系统性能造成的恶化，节省了系统为了消除SI产生的额外硬件成本，同时也避免了因为SI消除质量的不确定性带来的系统性能的不稳定。通过仿真比较可以看到，相比全双工中继传输方案，DA-VFD方案的误码性能不受RSI的影响。此外，当Alamouti FD方案在SI消除质量不佳时，DA-VFD获得了更好且更加稳定的误码性能。最后，通过对2种方案的系统分集与复用折衷性能的分析，进一步验证了以上结论。

参考文献：

[1] ZHANG Z, CHAI X, LONG K, et al. Full duplex techniques for 5g networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection[J]. IEEE Commun. Mag, 2015, 53(5): 128–137.

[2] 王夕予,陈亚军,肖敏,等.5G非正交多址系统中使用全双工基站干扰的安全传输方案[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(08): 129-134.

　 WANG Xiyu, CHEN Yajun, XIAO Min, et al. A secure transmission scheme using full-duplex base station jamming in 5G non-orthogonal multiple access systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(8): 129-134.

[3] ANDREWS J G, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.

[4] RIIHONEN T, WERNER S, AND WICHMAN R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays[J]. IEEE Trans. Signal Process, 2011, 59(12): 5983–5993.

[5] 许江涛,唐炳俊,翟羽健,伍民顺.应用于同频带全双工中的宽带自干扰射频抵消技术[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(09): 71-75+108.

XU Jiangtao, TANG Bingjun, ZHAI Yujian, et al. Wide bandwidth selfinterference radio frequency cancelling technique for single channel full duplex[J]. Journal of Xi’an Jiaotong University, 2018, 52(09): 071-75.

[6] 唐成凯,廉保旺,张玲玲.卫星通信系统双向中继转发自干扰消除算法[J].西安交通大学学报, 2015, 49(02): 74-79.

TANG Chengkai, LIAN Baowang, ZHANG Lingling. An algorithm to eliminate self-interference of bidirectional relaying for satellite communication systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(02): 74-79.

[7] FAN J, LI L, ZHANG H, et al. Denoise-and-forward two-path successive relaying with dbpsk modulation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(1): 42-45.

[8] ORIKUMHI I, LEOW C Y AND DING Z. Wireless information and power transfer in MIMO virtual full-duplex relaying system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11001-11010.

[9] HOU J, NARAYANAN S, MA Y, et al. Multi-antenna assisted virtual full-duplex relaying with reliability-aware iterative decoding[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, 2018: 1-6.

[10] ORIKUMHI I, LEOW C Y AND LI Y. Reliable virtual full-duplex relaying in the presence of inter relay interference[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9098-9109.

[11] SHEHNI A, FLANAGAN M F. Virtual full-duplex distributed spatial modulation with SER-optimal and suboptimal detection[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, 2018: 1-6.

[12] DI RENZO M, HAAS H, GRANT P M. Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: a survey[J]. IEEE Commun Mag., 2011, 49(12): 182–191.

[13] DI RENZO, M HAAS H, A. GHRAYEB, et al. Spatial modulation for generalized mimo: challenges, opportunities, and implementation. proc. IEEE, 2014, 102(1): 56–103.

[14] LI Q, YU M, PANDHARIPANDE A, et al. Performance of virtual full-duplex relaying on cooperative multi-path relay channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3628-3642.

[15] KIM Y, YAMAZAKI K AND JUNG B C. Virtual full-duplex cooperative NOMA: relay selection and interference cancellation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(12): 5882-5893.

[16] LIAU Q Y, LEOW C Y AND DING Z, Amplify-and-forward virtual full-duplex relaying-based cooperative NOMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(3): 464-467.

[17] LIAU Q Y AND LEOW C Y. Cooperative NOMA system with virtual full duplex user relaying[J]. IEEE Access, 2019, 10(7): 2502-2511.

[18] HONG S, HUI D, MARIĆ I, et al. On the achievable rates of virtual full-duplex relay channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2019, 65(1): 354-367.

[19] MANOJ B R, MALLIK R K, BHATNAGAR M R, et al. Virtual full-duplex relaying in multi-hop df cooperative networks using half-duplex relays with buffers[J]. IET Communications, 2019, 13(5): 489-495.

[20] KRIKIDIS I AND SURAWEERA H A. Full-duplex cooperative diversity with alamouti space-time code[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(5): 519-522.

[21] SAMAVAT M, FATCMCH G HOSSEINI, TALEBI ALAMOUTI S. Coding scheme for cooperative relay networks with full-duplex relaying[C]// Iran Workshop on Communication and Information Theory, 2013: 1–4.

[22] ALAMOUTI S. A Simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun. , 1998, 16(8): 1451–1458.

[23] 种稚萌,朱世华,吕刚明.分布式Alamouti空时码的信道容量分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(08): 969-973.

　 Zhong Zhimeng, Zhu Shihua, Lv Gangming. Channel capacity analysis of distributed alamouti space time code[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(08): 969-973.

[24] 曹鑫,王磊,邵彦彰.采用Alamouti码构造的正交空间调制及低复杂度解码算法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(06): 69-76.

　 CAO Xin, WANG Lei, SHAO Yanzhang. A decoding algorithm with quadrature spatial modulation and low-complexity using alamouti code[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(06): 69-76.

[25] ZHONG F, XIA X, LI H, et al. Distributed linear convolutional space-time coding for two-hop full-duplex relay 2x2x2 cooperative communication networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 2857-2868.

[26] ZHENG LIZHONG ,TSE D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1073–1096.

（编辑 刘杨）