

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.05.015

无线通信技术

基于随机导频序列的信道估计算法

王军选,张倩倩

(西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710121)

摘要:针对大规模多输入多输出系统的各小区复用相同导频序列进行信道估计存在严重导频污染的问题,提出了一种改进的信道估计算法用以减轻导频污染。该方法用随机导频序列替代各小区复用的相同导频序列用于信道估计,由于随机导频具有独立不相关的特性,因而用于信道估计时具有使信道状态信息获取更加准确、导频污染很小的优点。对信道估计均方误差的性能进行了仿真,仿真结果表明,改进的算法可以较明显地减轻导频污染对信道估计的影响。

关键词:大规模多输入多输出;相同导频序列;导频污染;随机导频序列

中图分类号: TN929.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2017)05-0056-05

A Channel Estimation Algorithm based on Random Pilot Sequence

WANG Jun-xuan, ZHANG Qian-qian

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Due to the defects of the severe pilot pollution exist in the massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system when the same pilot sequences are reused by all cells for channel estimation, the paper proposes an enhanced algorithm for channel estimation to alleviate the pilot pollution. In this paper, previous same pilot sequences are replaced by the random pilot sequences for the channel estimation which has the advantages of more accurate uplink channel status information and lower pilot pollution due to the fact that the random pilot sequences are independent and unrelated. The simulation results of the mean square error of the channel estimation show that the proposed method can obviously mitigate the pilot pollution when comparing with the method with the same pilot sequences.

Key words: massive MIMO; same pilot sequence; pilot pollution; random pilot sequence

0 引言

大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)无线通信系统^[1]的基本特性是:基站配备几十甚至几百根天线,系统利用大规模天线阵列带来的阵列增益和干扰抑制增益使小区总的频谱效率和边缘用户的频谱效率得到极大地提升^[2-3]。但是在上行链路阶段,各小区使用非正交的或者相同的导频序列进行上行信道估计时会给系统带来严重的导频污染,制约了大规模 MIMO 的优越性能。

导频污染已成为大规模 MIMO 中研究的热点,很多文献给出了理论研究和减轻导频污染的方法。文献[4]提出将不同小区的导频发送时隙错开,以避免不同小区的导频相互干扰;文献[5]通过对接收信号特征值分解进行信道估计,但在任意数目的天线与环境下不一定能保证信道的正交特性;文献[6]利用数据的先验信息通过部分译码来校正传统的信道估计,通过数据协作的信道估计方法来消除导频污

染;文献[7]根据期望最大的扩展性(Space-Alternating Generalized Expectation-maximization, SAGE)算法的迭代过程迭代地进行信道估计,该方案减小了信道估计的复杂度并消除了导频污染。但是,文献[6]、[7]中没有给出数据检测算法的详细设计过程;文献[8]将蜂窝系统中的小区划分为两类一维的线性网络,同类小区采用相同导频,两类小区之间采用正交导频,有效地减轻了导频污染,但是该方法对同类小区间的导频污染抑制效果有限。

本文提出了在上行链路中用户向基站发送随机导频序列用于上行信道估计的方法。首先,基站利用接收到的导频信号通过最小二乘法(The Least Square Method, LS)估计相应的信道状态信息,并分析导频污染产生的原因,以及相比于采用相同导频序列时随机导频序列所具有的优势;其次,在下行链路中,基站根据上行获得的信道状态信息,应用最简的匹配滤波器(Matched Filter, MF)预编码算法^[9]做下行预编码;最后,终端通过最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)数据检测

收稿日期:2017-03-10

基金项目:国家“八六三”计划资助项目(2014AA01A703);国家自然科学基金资助项目(61501371)

作者简介:王军选(1970—),男,陕西户县人。教授,博士,主要研究方向为下一代无线通信技术。

通信作者:张倩倩,硕士。E-mail:380083928@qq.com

算法检测出期望的数据信息。仿真结果证明,本文使用随机导频序列相比于使用相同导频序列能有效减轻导频污染对大规模 MIMO 系统性能的降级。

1 系统模型

为了分析简单,本文考虑一个含有 L 个时间同步的小区,每一小区的基站端配置 M 根天线,且只含有单天线用户。为比较导频污染给上行信道估计以及下行数据检测所带来的影响,分别考虑 L 个小区复用相同导频序列以及各小区使用随机导频序列这两种情况。对于各小区使用正交导频序列的情况本文不予考虑。为不失一般性,我们假设小区 1 为目标小区,其他小区为干扰小区,系统的上行链路如图 1 所示。

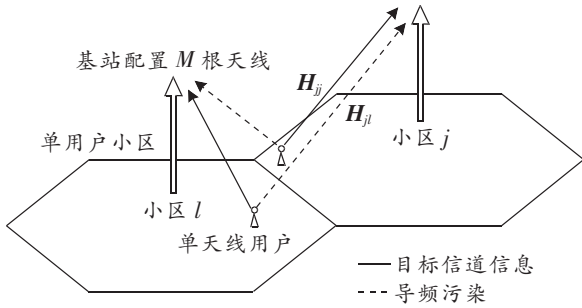


图 1 大规模 MIMO 系统的上行链路

1.1 各小区复用相同导频序列

在各小区复用相同导频序列的情况下进行上行信道估计,目标小区 1 的基站接收到的导频信号为

$$\mathbf{Y}_1 = \sqrt{p_r} \mathbf{H}_{11} \mathbf{X} + \sqrt{p_r} \sum_{l=2}^L \mathbf{H}_{l1} \mathbf{X} + \mathbf{N}_1 \quad (1)$$

式中, $\mathbf{H}_{11}$ 为目标小区 1 中用户到基站间的信道; $\mathbf{X}$ 为各小区复用的长度为 τ 的相同导频序列,满足 $\mathbf{X}\mathbf{X}^H = \tau$; 上行链路信道矩阵 $\mathbf{H}_{l1}$ 代表小区 l 中的用户到目标小区 1 的基站之间的信道,并满足 $\mathbf{H}_{l1} = \sqrt{\beta_{l1}} \mathbf{h}_{l1}$, 其中 β_{l1} 为小区 l 中的用户到目标小区 1 的基站之间的大尺度衰落系数,其在一定时间内是不变的;而 $\mathbf{h}_{l1}$ 为小区 l 中的用户到目标小区 1 的基站之间的快衰落信道矩阵,为快速变化的高斯矩阵,但认为其在相干时间内是不变化的,其矩阵中的元素服从独立同分布 (independent and identically distributed, i. i. d.) 的条件,并满足 $\text{CN}(0,1)$; p_r 为每个用户发射导频信号的平均功率; $\mathbf{N}_1$ 为高斯白噪声,满足 $\mathbf{N}_1 \in \text{CN}(0,1)$ 。

1.2 各小区使用随机导频序列

在各小区使用随机导频序列的情况下,系统为各小区的用户随机分配一个导频序列(任意两个导

频序列之间不需要满足正交的关系),且基站已知本小区用户所使用的导频序列。在上行信道估计的过程中,目标小区 1 的基站接收到的导频信号为

$$\mathbf{Y}_2 = \sqrt{p_r} \mathbf{H}_{11} \mathbf{X}_1 + \sqrt{p_r} \sum_{l=2}^L \mathbf{H}_{l1} \mathbf{X}_l + \mathbf{N}_2 \quad (2)$$

式中, $\mathbf{X}_l$ 代表小区 l 使用的长度为 τ 的导频训练序列,满足 $\mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H = \tau$; $\mathbf{N}_2$ 为高斯白噪声,并满足 $\mathbf{N}_2 \in \text{CN}(0,1)$ 。

2 上行信道估计

2.1 相同导频序列下的信道估计

信道估计过程中,目标小区 1 的基站根据已知的导频序列 $\mathbf{X}$ 对式(1)做 LS 信道估计,得到本小区的用户到基站之间的信道状态信息如下:

$$\hat{\mathbf{H}}_{11} = \frac{\mathbf{Y}_1 \mathbf{X}^H}{\sqrt{p_r} \tau} = \mathbf{H}_{11} + \sum_{l=2}^L \mathbf{H}_{l1} + \frac{\mathbf{N}_1 \mathbf{X}^H}{\sqrt{p_r} \tau} \quad (3)$$

式中,第 1 部分为期望的真实信道状态信息;第 2 部分为相邻小区复用相同的导频序列所引起的导频污染;第 3 部分为噪声所引起的干扰。

2.2 随机导频序列下的信道估计

同理,目标小区 1 的基站利用已知的导频序列 $\mathbf{X}_1$ 对式(2)做 LS 信道估计,得到本小区的用户到基站之间的信道状态信息如下:

$$\hat{\mathbf{H}}_{11} = \frac{\mathbf{Y} \mathbf{X}_1^H}{\sqrt{p_r} \tau} = \mathbf{H}_{11} + \sum_{l=2}^L \frac{\mathbf{X}_l \mathbf{X}_1^H}{\tau} \mathbf{H}_{l1} + \frac{\mathbf{N}_2 \mathbf{X}_1^H}{\sqrt{p_r} \tau} \quad (4)$$

式中,第 1 部分为期望获得的真实信道状态信息;第 2 部分为相邻小区使用随机导频序列所引起的导频污染,但相比式(3)中的第 2 项导频污染项,式(4)中的第 2 项所带来的导频污染减轻了,因为根据高斯分布的性质,式(4)中的因子 $\mathbf{X}_l \mathbf{X}_1^H / \tau \leq 1$,且随着导频序列长度 τ 的增加而减少,则导频污染的影响也随之降低,然而随着 τ 的增加,数据的传输速率也会受到影响;第 3 部分为噪声所引起的干扰。

通过对上面两种导频序列进行信道估计的分析可知,采用随机导频序列所带来的性能增益优于采用相同导频序列时的情况。

3 匹配滤波器预编码

我们考虑大规模 MIMO 系统工作在时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 模式下,由于信道互易性,可以将下行信道看作是上行信道的转置,小区 l 的基站到本小区用户的下行信道矩阵为 $\mathbf{H}_{ll}^T$,此时导频序列长度不受天线数目的制约。另外,本文采用经典的 MF 预编码算法,上行信道估计所获得的

信道状态信息可以直接用作预编码矩阵。在下行链路数据发送过程中,各小区的基站分别向目标用户发送长度为 κ 的数据 $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_L$, 并满足 $\mathbf{S}_l \mathbf{S}_l^H = \kappa$ 。

引理 设定 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in C^{M \times 1}$ 为独立不相关的两个随机矢量,且两矢量的元素都服从均值为 0、方差为 σ 的高斯分布,则根据高斯分布的相关性质可得:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{x}^H \mathbf{x}}{M} = \sigma \quad \text{及} \quad \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{x}^H \mathbf{y}}{M} = 0 \quad (5)$$

式中, M 为常量。

3.1 相同导频序列下的预编码

基站首先根据上行信道估计所得的信道状态信息对待发送的数据作下行 MF 预编码,然后再通过基站天线将预编码之后的数据发送出去。则目标小区 1 中的用户接收到的信号表示如下:

$$\mathbf{Y}_3 = \sqrt{p_f} \mathbf{H}_{11}^T (\mathbf{A}_{11})^* \mathbf{S}_1 + \sqrt{p_f} \sum_{l=2}^L \mathbf{H}_{l1}^T (\mathbf{A}_{ll})^* \mathbf{S}_l + N_3 \quad (6)$$

式中, p_f 为基站端的平均发射功率; $\mathbf{A}_{ll}$ 为小区 l 使用的下行预编码矩阵; $\mathbf{H}_{l1}^T$ 为小区 l 的基站到目标小区 1 的用户之间的下行链路信道矩阵; $\mathbf{S}_l$ 为小区 l 的基站向目标用户发送的数据; N_3 为加性高斯白噪声,满足 $N_3 \in CN(0, 1)$ 。

采用 MF 预编码算法,根据 MF 预编码的性质得出归一化的预编码矩阵为

$$\mathbf{A}_{11} = f(\hat{\mathbf{H}}_{11}^H) = \frac{(\hat{\mathbf{H}}_{11}^H)^H}{\|(\hat{\mathbf{H}}_{11}^H)^H\|} = \frac{\hat{\mathbf{H}}_{11}}{\|\hat{\mathbf{H}}_{11}\|}。$$

在基站大阵列天线中,由于不同用户到基站的信道以及噪声是相互独立的,因此当基站天线数目 M 趋于无穷大时,利用独立高斯随机变量的基本性质即以上引理可得: $\lim_{M \rightarrow \infty} \|\hat{\mathbf{H}}_{11}\| = \sqrt{\beta_{11} M}$, $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\mathbf{H}_{11}^T \mathbf{H}_{11}^*}{\beta_{11} M} = \delta_{11}$, $\lim_{M \rightarrow \infty} \mathbf{H}_{11}^T N_1^* = 0$ 。因此式(6)可以化简为

$$\mathbf{Y}_3 = \sqrt{p_f \beta_{11}} \mathbf{M} \mathbf{S}_1 + \sqrt{p_f M} \sum_{l=2}^L \frac{\beta_{l1}}{\sqrt{\beta_{ll}}} \mathbf{S}_l + N_3, \quad M \rightarrow \infty \quad (7)$$

式中,第 1 部分为目标用户期望的接收信号;第 2 部分为来自相邻小区基站的干扰信号;第 3 部分为噪声干扰。

3.2 随机导频序列下的预编码

类似于 3.1 节的分析,直接可得目标小区 1 中用户接收到的信号:

$$\mathbf{Y}_4 = \sqrt{p_f} \mathbf{H}_{11}^T (\mathbf{A}_{11})^* \mathbf{S}_1 +$$

$$\sqrt{p_f} \sum_{l=2}^L \mathbf{H}_{l1}^T (\mathbf{A}_{ll})^* \mathbf{S}_l + N_4 \quad (8)$$

同理,当 $M \rightarrow \infty$ 时,利用引理的结论对式(8)进行简化,得到目标小区 1 中用户的接收信号为

$$\mathbf{Y}_4 = \sqrt{p_f \beta_{11}} \mathbf{M} \mathbf{S}_1 + \sqrt{p_f M} \sum_{l=2}^L \frac{\beta_{l1}}{\sqrt{\beta_{ll}}} \frac{\mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H}{\tau} \mathbf{S}_l + N_4, \quad M \rightarrow \infty \quad (9)$$

式中,第 1 部分为目标用户期望的接收信号;第 2 部分干扰项的因子 $\mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H / \tau \leq 1$,且随着导频序列长度 τ 的增加而减小。相比于式(7)的干扰项,式(9)中的干扰项所带来的干扰误差更小,表明通过式(9)进行数据检测所得的误码率(Bit Error Rate, BER)将更低;第 3 部分为噪声干扰。同时发现,式(7)与式(9)最终对期望信号的检测主要与大尺度衰落系数有关,当干扰小区的大尺度衰落系数越小时,最后数据检测的 BER 也越低。

因此,相对于各小区使用相同导频序列的情况,当各小区采用随机导频序列时,各小区基站进行信道估计后的均方误差(Mean Square Error, MSE)以及下行 MF 预编码之后数据检测的 BER 都会降低,系统的性能得到了很大提升。

4 仿真结果

为验证本文所提方案的有效性,采用 MATLAB 仿真平台进行仿真验证。仿真过程中所使用的参数如表 1 所示。

表 1 大规模 MIMO 链路级仿真参数表

参 数	参数值
小区总数	3
小区基站天线数	60
目标小区:1.0	干扰小区:0
大尺度衰落系数	目标小区:0.8 干扰小区:0.2
	目标小区:0.6 干扰小区:0.2
导频符号长度	8,20
数据长度	10 000
系统信道	高斯信道
调制方式	QPSK 调制
用户发射功率/dB	0

注:QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)为四相相移键控。

图 2 所示为导频序列长度为 8 时,相同导频序列以及随机导频序列在目标小区与干扰小区的大尺度衰落系数分别为(1,0,0)、(0.8,0.1,0.1)和(0.6,0.2,0.2)这 3 种情况下基站进行 LS 信道估计的 MSE 性能曲线,其信噪比范围为 $-10 \sim 25$ dB。在没有导频污染时,采用两种导频序列进行信道估计

所获得的性能一样。在轻导频污染时,根据高斯分布的基本性质,因子 $\mathbf{X}\mathbf{X}^H/\tau \leq 1$,与采用相同的导频序列相比,采用随机导频序列进行信道估计的性能更好。同理,在重导频污染时,采用随机导频序列也可以获得更好的性能增益。图 2 验证了采用随机导频序列进行信道估计的性能优于采用相同导频序列进行信道估计的结论。

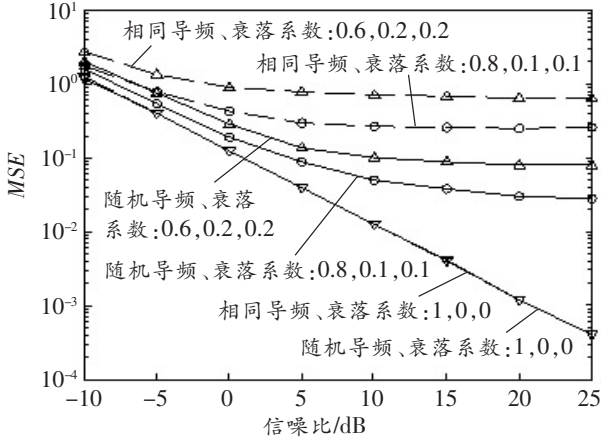


图 2 两种导频序列下的信道估计 MSE

图 3 所示为随机导频序列长度分别为 8 和 20, 大尺度衰落系数分别为 (1, 0, 0)、(0.8, 0.1, 0.1) 和 (0.6, 0.2, 0.2) 这 3 种情况下进行 LS 信道估计所得的 MSE 性能曲线, 其信噪比的范围为 -10 ~ 25 dB。从图中可以看出, 采用长导频序列时可以获得更好的性能曲线, 因为根据文中的引理, 两个独立不相关的高斯随机变量在数据长度越长时, 它们的乘积就越接近于 0, 因此在长导频序列下进行信道估计时的误差就越小, 也就可以获得更好的性能增益。其中, 系统的导频长度应该至少为 $K * L$, K 为用户数, L 为小区数。但是导频长度也不能无限长, 信道相干时间在很大程度上影响能够使用的导频长

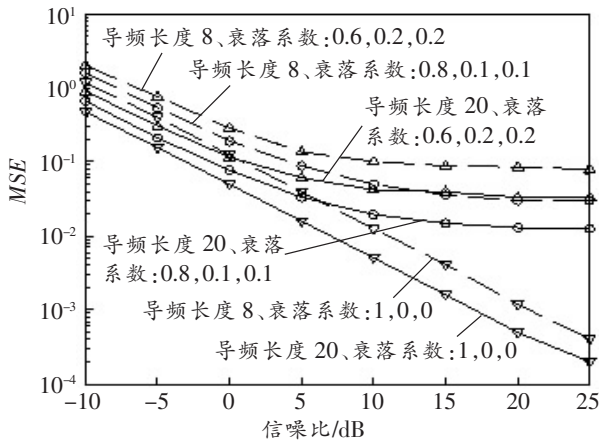


图 3 导频长度不同时的信道估计 MSE

度, 当小区用户高速移动时, 信道相关时间较短, 使用过长的导频将无法准确估计信道参数。

图 4 所示为导频序列长度为 20 时, 相同与随机导频序列在目标小区与干扰小区的大尺度衰落系数分别为 (0.8, 0.1, 0.1)、(0.6, 0.2, 0.2) 这两种情况下进行 LS 信道估计以及 MF 预编码后在终端检测数据所得的 BER 性能曲线, 其信噪比的范围为 -6 ~ 15 dB。从图中可以看出, 在轻导频污染以及重导频污染时, 采用随机导频序列所获得的 BER 性能都优于采用相同导频序列的情况, 原因是采用随机导频进行信道估计所获得的信道信息更接近于真实的信道信息, 用于 MF 预编码的预编码矩阵更准确, 因此最后通过 MMSE 数据检测算法检测到期望数据的 BER 也就更低。

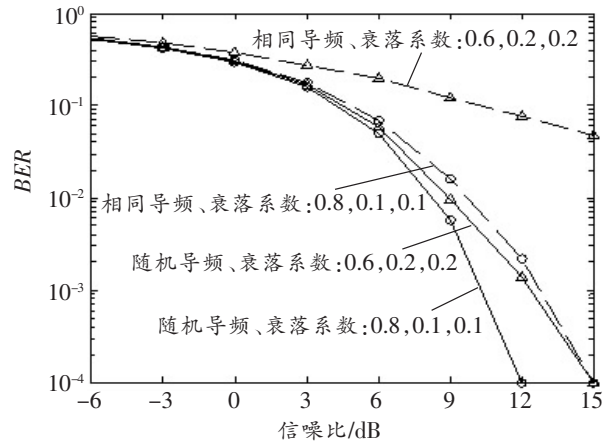


图 4 两种导频序列下的数据检测 BER

图 5 所示为导频序列长度分别为 8 和 20, 随机导频序列在目标小区与干扰小区的大尺度衰落系数分别为 (0.8, 0.1, 0.1)、(0.6, 0.2, 0.2) 这两种情况下进行 LS 信道估计以及 MF 预编码后在终端检测数据所得的 BER 性能曲线, 其信噪比的范围为

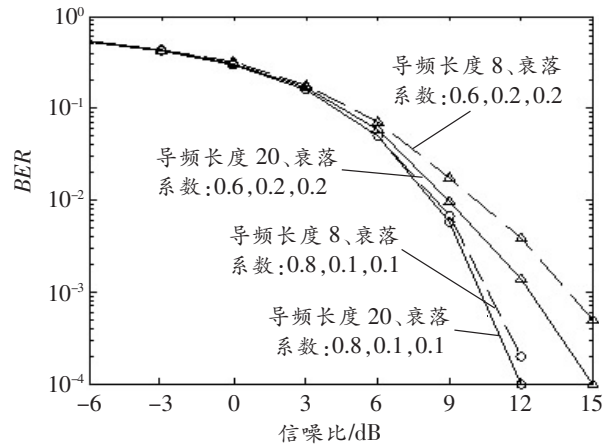


图 5 导频长度不同时的数据检测 BER

-6~15 dB。从图中可以看出,在轻导频污染与重导频污染的情况下,长的导频序列下所获得的 BER 性能曲线优于采用短的导频序列的情况,原因是长导频序列进行信道估计所获得的信道信息更接近于真实的信道信息,因此用于 MF 预编码的预编码矩阵更准确,最后终端进行数据检测所获得的 BER 也更低。

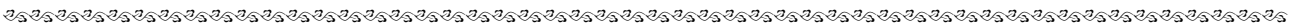
5 结束语

在大规模 MIMO 系统中,由于实际中正交导频的数量是有限的,不可能为每一用户都分配一个正交的导频序列,而采用相同的导频序列又会带来严重的导频污染,所以本文采用随机导频序列替代各小区复用的相同导频序列用于信道估计。仿真结果表明,采用随机导频进行信道估计的 MSE 以及采用 MF 预编码后的数据检测的性能增益都优于采用相同导频序列的情况;数据检测的 BER 随着干扰小区的大尺度衰落系数的减小而减小。

参考文献:

[1] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays [J]. Signal Processing Magazine IEEE, 2013,

30(1):40-60.
[2] Gesbert D, Kountouris M, Heath R W, et al. Shifting the MIMO Paradigm [J]. Signal Processing Magazine IEEE, 2007, 24(5):36-46.
[3] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems [J]. Communications IEEE Transactions on, 2011, 61(4):1436-1449.
[4] Appaiah K, Ashikhmin A, Marzetta T L. Pilot Contamination Reduction in Multi-user TDD Systems [C]//ICC 2010. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010:1-5.
[5] Ngo H Q, Larsson E G. EVD-based Channel Estimation in Multicell Multiuser MIMO Systems with Very Large Antenna Arrays [C] //IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kyoto, Japan: IEEE, 2012:3249-3252.
[6] Ma J, Ping L. Data-aided Channel Estimation in Large Antenna Systems [J]. Signal Processing IEEE Transactions on, 2014, 62(12):3111-3124.
[7] Xu P, Wang J Z, Wang J K. Analysis and Design of Channel Estimation in Multi-cell Multi-user MIMO OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 62(12): 610-620.
[8] 王海荣,王玉辉,黄永明,等. 大规模 MIMO 多小区 TDD 系统中的导频污染减轻方法 [J]. 通信学报, 2013,(02): 24-33.
[9] 王丹. 大规模 MIMO 系统预编码算法和导频污染问题研究 [D]. 南京:南京邮电大学, 2015.



(上接第 35 页)

表 4 400 Gbit/s WDM 系统所需设备的比较

相关设备	光纤类型	
	G. 652 光纤	ULL-LEAF
光终端复用器数量/个	44	44
中继站数量/个	91	52
复用段/再生段数量/段	113	74

5 结束语

大数据、云计算、互联网+和 5G 等宽带业务的发展,推动了单信道速率为 400 Gbit/s 的光纤传输系统向着“三超”方向发展。在“三超”传输系统中,通过采用高阶调制格式、多维复用、相干检测和数字信号处理技术等措施解决了光纤色散、偏振模色散对传输的限制,光纤的衰减和非线性成为 400 Gbit/s 光纤的研究重点。在合理设计光纤折射率分布结构的基础上,经过完善的制棒和拉丝工艺制造出 LL-LEAF 和 ULL-LEAF。通过对 LL-LEAF 和 ULL-LEAF 系统传输实验、网络现场传

输实验和系统设备成本比较可知,LL-LEAF 和 ULL-LEAF 是满足 400 Gbit/s 系统实现“三超”传输的最佳光纤。

参考文献:

[1] 张成良,李俊杰,马亦然,等. 光网络新技术解析与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2016 .
[2] 胡明. 新一代高速率、大容量、长距离传输光纤技术展望 [J]. 电信工程技术与标准化,2017,(3): 1-5.
[3] 贺作为,陈伟,张良,等. 高速传输系统用低损耗单模光纤的研究 [J]. 光通信研究,2015,(2): 35-38.
[4] 韦乐平,张成良. 光网络:系统、器件与联网技术 [M]. 北京:人民邮电出版社,2006 .
[5] 喻煌,李诗愈,刘志坚,等. 400 Gbit/s 高速大容量光通信系统单模光纤设计与制备 [J]. 光通信研究,2015,(2): 27-30.
[6] 陈伟,袁健,贺作为,等. 我国大容量通信用高端光纤技术的研究进展 [J]. 光通信研究, 2017,(1): 27-29.