

OFDM 系统中最优导频序列的设计方案

任腾飞 李艳萍* 郝喜国

(太原理工大学信息工程学院,太原 030024)

摘要 在正交频分复用(OFDM)系统中,接收信号易受频率选择性衰落信道的影响产生失真,准确的信道估计变得必不可少。考虑到无线信道的内在稀疏性、压缩感知技术挖掘信道稀疏特征的有效性,研究了基于压缩感知技术的 OFDM 稀疏信道估计。针对导频位置影响信道估计性能的问题,提出了一种反馈型的导频优化算法,该算法基于离散傅里叶变换(DFT)子矩阵中各个列之间互干性最小的原则,同时结合信道状态信息的反馈机制,实现了对导频序列的联合优化。仿真结果表明,与当前的随机优化算法、传统最小二乘信道估计相比,该优化方法有效降低干扰和噪声对信道估计的影响,从而改善了信道估计的性能。

关键词 OFDM 稀疏信道估计 压缩感知 反馈 导频设计

中图分类号 TN929.5; **文献标志码** A

由于正交频分复用(OFDM)技术具有增加频谱效率、抗频率选择性衰落的特点,因而被广泛应用到宽带通信系统中。然而,受频率选择性衰落信道的影响,OFDM 系统的接收信号经常出现失真问题,为准确地恢复发送端的信息,需要在接收端进行信道估计,因而信道估计的准确度将直接影响 OFDM 系统的性能。当前的信道估计方法主要分为基于导频的估计^[1,2]、半盲信道估计^[3]和盲信道估计^[4]。综合考虑信道估计的准确度和复杂度,本文采用导频辅助的信道估计方法。在高速的宽带通信中,无线信道呈现稀疏特性,即大部分能量集中在很少的抽头上,而很小的一部分能量分散在大多数信道抽头上^[3],充分利用信道的内在稀疏性,就能用较少的导频符号取得理想的信道估计效果^[5]。传统的信道估计方法由于未能充分利用信道的稀疏性,使得信道估计性能并不理想,所以当前的信道估计大多基于压缩感知技术。压缩感知理论针对信号稀疏的情况,能以远低于奈奎斯特采样速率的方式采样,并高精度地恢复出原始信号,将压缩感知理论应用到信道估计中,不仅能获取较高的信道估计性能,而且减少了导频符号的使用,进一步提高系统的传输效率。

当前基于导频的稀疏信道估计主要有两个分支,一个分支是利用贪婪算法取得较高的信道估计准确度,如正交匹配追踪(orthogonal matching pur-

suit, OMP);另一分支则通过搜索最优的导频序列,进而准确估计信道。利用穷举方法可以从所有的导频模式中搜索出最优的导频序列,但将极大增加计算的复杂度。对此,Candes 和 Tao 提出了有限等距特性(restricted isometry property, RIP)准则^[6],并指出无噪条件下,当观测矩阵满足 RIP 准则时,就能以很高的概率重建稀疏信道。然而,实际中检验 RIP 准则有很大的难度,因而研究者提出了基于交叉熵(cross-entropy optimization, CEO)和基于相干性(coherence)两种优化导频模式的算法。文献[5]提出了一种交叉熵优化的算法,在减少计算复杂度的同时最大限度地提高稀疏信道估计的准确度,该算法比传统等距方案和随机搜索方法更为有效;文献[7]提出了一种改进的优化导频放置的离散随机逼近方法,该方法具有很好的收敛性和有效性;文献[8]提出了一种以最小化观测矩阵的互相关为目标,对导频序列进行逐位置优化的方法。本文在文献[8]的基础上,结合信道状态信息的有效反馈,提出了一种基于相干性的快速优化导频算法。

1 基于压缩感知技术的 OFDM 模型

考虑一个 N 个子载波的 OFDM 系统,其中 N_p 个子载波选作导频,其他子载波传输数据,假设频域的发射信号和接收信号分别为 X 和 Y ,导频位置集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{N_p}\}$,其中 $1 \leq p_1 < p_2 < \dots < p_{N_p} \leq N$ 。系统采用不等间隔的梳状导频结构,对应导频位置 P 的发送符号和接收符号分别为 X_p 和 Y_p 。QPSK 调制数据先经过串并变换,插入优化导频,然后经过 N 点快速傅里叶反变换(inverse fast fourier

2015年6月12日收到 国家自然科学基金资助项目(61271249)资助
第一作者简介:任腾飞(1989—),男,硕士研究生。研究方向:信道估计。E-mail: rtflyut@126.com。

*通信作者简介:李艳萍(1963—),女,博士,教授。研究方向:无线通信技术。E-mail: liyanping@tyut.edu.cn。

transformation, IFFT), 加入循环前缀 (cyclic prefix, CP), 在进行串并变换后发射到多径衰落信道中。在接收端通过串并变换、去循环前缀和 FFT 变换, 接着进行稀疏信道估计, 之后判定误码率阈值条件, 选取符合条件的导频序列作为最优导频序列, 随后移除导频, 进行串并变换和 QPSK 解调。

OFDM 系统中的接收信号可表示为

$$Y = \text{diag}(X)H + W \quad (1)$$

式(1)中, H 为信道对应的频域响应, W 为频域的高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN)。

假设信道为频率选择性衰落信道, 且信道参数在一个 OFDM 符号中不变, OFDM 系统的循环前缀长度大于信道的总时延, 对应的多径信道模型为^[9]

$$\mathbf{h} = \sum_{l=1}^L h(l)\delta(\tau - \tau_l) \quad (2)$$

式(2)中, 信道矢量 $\mathbf{h}$ 的长度为 L , $h(l)$ 和 τ_l 分别为第 l 径的复增益与时延, 非零元素的个数为 k , 且满足 $k \leq L$ 。

OFDM 系统中对应导频位置 P 处的频率响应为:

$$Y_p = \text{diag}\{X_p\}F_{p \times L}\mathbf{h} + W_p \quad (3)$$

式(3)中, $\text{diag}\{X_p\} = \text{diag}\{X_{p_1}, X_{p_2}, \dots, X_{p_{N_p}}\}$, $\mathbf{h} = [h(1), h(2), \dots, h(L)]^T$, $Y_p = [Y_{p_1}, Y_{p_2}, \dots, Y_{p_{N_p}}]^T$,

$W_p = [W_{p_1}, W_{p_2}, \dots, W_{p_{N_p}}]^T$, $F_{p \times L}$ 为从标准 $N \times N$ 傅里叶变换矩阵中选择的子矩阵, 即 $F_{p \times L} =$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & \omega^{p_1 \cdot 1} & \dots & \omega^{p_1 \cdot (L-1)} \\ 1 & \omega^{p_2 \cdot 1} & \dots & \omega^{p_2 \cdot (L-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{p_{N_p} \cdot 1} & \dots & \omega^{p_{N_p} \cdot (L-1)} \end{bmatrix}_{N_p \times L}, \omega = e^{-j2\pi/N}。$$

假设 $\mathbf{A} = \text{diag}\{X_p\}F_{p \times L}$, 则式(3)变为

$$Y_p = \mathbf{A}\mathbf{h} + W_p \quad (4)$$

当矩阵 $\mathbf{A}$ 的行多于列时, 式(4)变为标准的 LS 求解问题, 对应的解为:

$$\hat{\mathbf{h}}_{LS} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H Y_p \quad (5)$$

当矩阵 $\mathbf{A}$ 的行小于列多时, 式(4)变为欠定方程的求解问题, 可转化为对最小范数优化问题的求解:

$$\hat{\mathbf{h}} = \arg \min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{h}\|_1; \quad \text{s. t.} \quad \|Y_p - \mathbf{A}\mathbf{h}\|_2 \leq \varepsilon \quad (6)$$

式(6)优化问题可通过压缩感知理论中的贪婪迭代算法和松弛凸优化等算法求解, 利用矩阵 $\mathbf{A}$ 满足 RIP 准则来估计信道参数 $\mathbf{h}$ 。考虑到检验 RIP 准则的困难性, 该文在下一部分提出了基于相干性准则设计导频序列的算法。

OFDM 系统模型框图如图 1 所示。

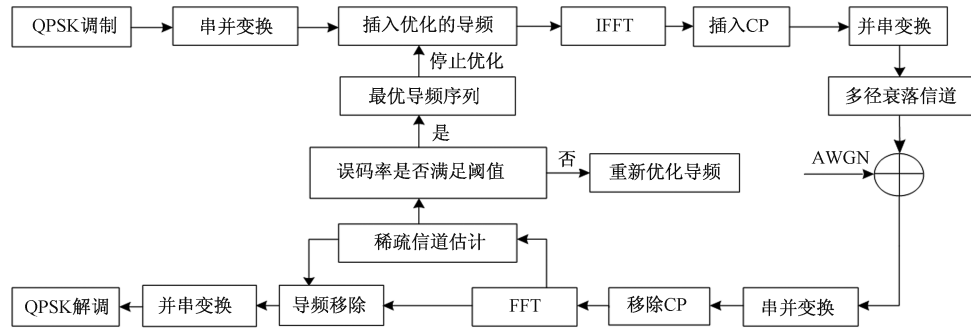


图 1 OFDM 系统模型

Fig. 1 OFDM system model

2 最优导频序列的设计

该文基于矩阵相干性的准则, 同时结合信道状态信息的反馈, 提出了一种设计最优导频序列的改进算法。

2.1 算法思想

矩阵 $\mathbf{A}$ 的互相干性为矩阵 $\mathbf{A}$ 的不同列之间互相关的最大绝对值

$$\mu(\mathbf{A}) = \max_{m \neq n} \frac{|\mathbf{A}^H(m)\mathbf{A}(n)|}{\|\mathbf{A}(m)\|_2 \cdot \|\mathbf{A}(n)\|_2} \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{A}(m)$ 和 $\mathbf{A}(n)$ 分别为 $\mathbf{A}$ 的第 m 列和第 n 列。

对给定的任意导频模式: $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_{N_p}\}$, 其中 $1 \leq p_1 < p_2 < \dots < p_{N_p} \leq N$, 则由式(7)可得:

$$\mu(\mathbf{A}_p) = \max_{0 \leq l \leq L-1} \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_p} |\mathbf{x}(p_i)|^2 \omega^{p_i l} \right|}{\sum_{i=1}^{N_p} |\mathbf{x}(p_i)|^2} \quad (8)$$

式(8)中, $l = n - m$, $|\mathbf{x}(p_i)|^2$ 是第 i 个导频符号的能量, 为简便, 设 $|\mathbf{x}(p_i)|^2 = 1$, 则有

$$\mu(\mathbf{A}_p) = \max_{1 \leq l \leq L-1} \left| \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{w}^{p,l} \right| \quad (9)$$

令 $Q = \min_p \mu(\mathbf{A})$, 则最优的导频序列可表示为

$$P_{\text{opt}} = \arg \min_p \mu(\mathbf{A}) \quad (10)$$

2.2 算法实现步骤

设子载波集合 $N = \{1, \dots, N\}$, 从集合 N 中取出 N_p 个元素, 随机生成一种导频模式 $P_m = \{p_1, p_2, \dots, p_{N_p}\}$, 并假设外循环 $l = 1, 2, \dots, M$, 内循环 $m = 1, 2, \dots, N_p$, Ω 为一个长度为 $N_p \times N_p$ 的零向量, 保存内循环过程中的每一次导频优化结果; Ξ 为 M 行 N_p 列的全零矩阵, 保存内循环优化后的结果。如果随机生成的导频序列与上一次内循环优化的结果相同, 不进行内循环; 否则转入内循环。

内循环过程: 对 P_m 的每一个元素对应的位置 $m = 1, 2, \dots, N_p$, 固定除第 m 个元素外的其他 N_{p-1} 个元素, 设固定元素构成的集合 K_m , 则候选集 $I_m = N \setminus K_m$ 。从候选集中取出一个元素放在 P_m 的第 m 个元素位置上, 共有 $N - N_p + 1$ 种排列方式, 从所有的排列方式中找出目标函数 Q 最小的一种导频模式, 然后利用此导频模式对下一个位置进行优化, 重复以上过程, 直至遍历完所有位置, 得到一个序列 P_n 。对于 P_n 的每一个元素对应的位置 $n = 1, 2, \dots, N_p$, 固定 P_n 中除第 n 个元素之外的其余 $N_p - 1$ 个元素, 假定集合 K_n 为所固定的元素, 则候选集 $I_n = N \setminus K_n$, 每次从候选集 I_n 中选取一个元素放在 P_n 的第 n 个元素位置上, 从所有放法中选取目标函数 Q 值最小的一种放法, 作为第 n 个元素的优化导频序列, 并保存到 Ω 中。当对 P_n 的所有 N_p 个位置进行优化后, Ω 中保存了 N_p 种优化导频序列, 从 Ω 中选取目标函数 Q 值最小的导频序列作为内循环的结果输出。

外循环过程: 进行 M 次外循环, 将每次循环后的结果保存到 Ξ , 从 Ξ 中找出最小目标函数 Q 值对应的导频序列, 将此序列作为全局互相干性最小的序列 P_{opt} 。与此同时, 根据不同的载波数设定对应的误码率阈值, 在接收端进行信道估计, 进而判定生成的导频序列 P_{opt} 的误码率是否满足误码率条件, 将符合条件对应导频序列作为最优导频序列反馈到 QPSK 调制数据中, 否则重新优化。

3 仿真结果与分析

给定一 OFDM 系统, 采用 QPSK 调制方式, 信道为瑞利衰落信道, 信道长度 $L = 60$, 其中 5 个为非零抽头, 非零抽头的系数满足均值为 0, 方差为 1 的复高斯分布。仿真中, 循环前缀长度为 32 个采样

点, 导频采用全 1 导频, 设置导频符号和数据符号为相同的功率。在载波数为 128 时, 误码率阈值设定为 0.005; 在载波数变为 256 时, 误码率阈值设定为 0.006。记本文提出的算法为算法 1, 文献[8]提出的算法为算法 2。对算法 1、算法 2 和随机导频采用凸优化算法进行稀疏信道估计, 等间距导频采用最小二乘 (least squares, LS) 法估计信道。

本文利用蒙特卡罗方法, 在不同信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 下对算法 1、算法 2、随机导频和等间距导频进行 300 次重复试验。由于 BER 性能是衡量系统性能的重要指标之一, 因此本文对比研究了四种方法下信道估计的 BER 性能。

接收端中最优导频序列的反馈机制的引入, 会增加一定复杂度, 但所优化的导频序列在 OFDM 信号发送前就已离线生成, 因而算法 1 的复杂度仍然可以接受。图 2 和图 3 仿真分析了载波数为 128 时, 误码率 BER 在不同导频数下的性能; 图 3 和图 4 对比分析了导频数为 16 时, 误码率 BER 随载波数变化的性能; 图 4 和图 5 给出了载波数为 256 时, 误码率 BER 在导频数不同情况下的性能。

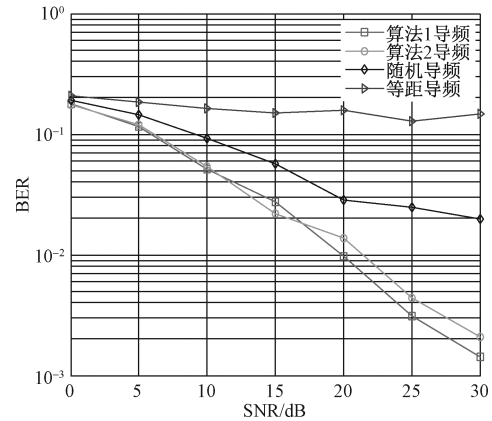


图 2 $(N, N_p) = (128, 8)$ 时, 四种方法的 BER 曲线

Fig. 2 BER of four methods for $(N, N_p) = (128, 8)$

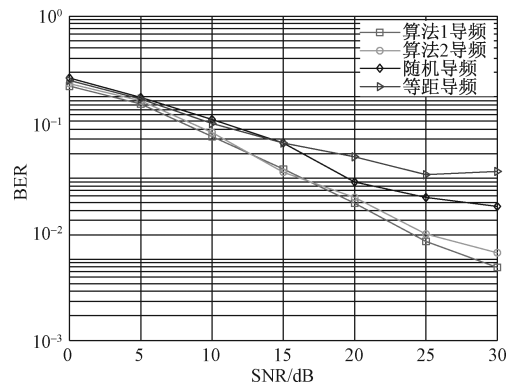


图 3 $(N, N_p) = (128, 16)$ 时, 四种方法的 BER 曲线

Fig. 3 BER of four methods for $(N, N_p) = (128, 16)$

比较图 2 和图 3 可以看出,算法 1 的性能明显优于随机方法和等距导频下的 LS 估计,且当信噪比 SNR 低于 15 dB 时,算法 1 和算法 2 的性能相近,当 SNR 高于 15 dB 时,算法 1 的性能优于算法 2。此外,当载波数一定时,使用较多的导频可以显著改善 BER 性能。图 2 所示,在 BER 性能相当时,算法 1 比算法 2 好近 2 dB,比随机方法将近好 6 dB。图 3 所示,在 BER 性能相当时,算法 1 比算法 2 好 1 dB,比随机方法好 2~6 dB。

从图 3 和图 4 可以看出,算法 1 的性能优于其他三种方法,且当导频数一定,载波数增加一倍时,四种方法的 BER 性能均下降,这是因为导频数未随着载波数相应增加,使得信道估计不够准确。

从图 4 和图 5 可以看出,算法 1 相对其他三种方法,BER 性能改善显著。还可以看出,当导频数为 16,误码率为 0.006 时,算法 1 比算法 2 节省约 2.5 dB;当导频数变为 32,误码率为 0.003 时,算法 1 比算法 2 节省约 2 dB。

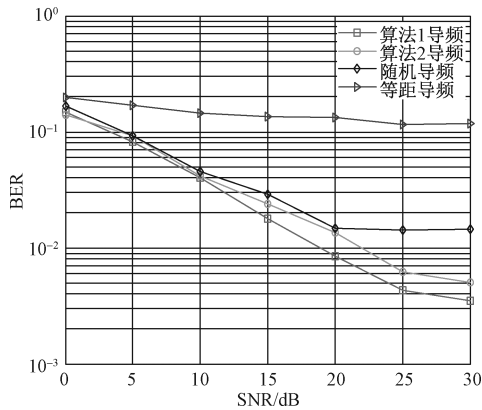


图 4 $(N, N_p) = (256, 16)$ 时,四种方法的 BER 曲线

Fig. 4 BER of four methods for $(N, N_p) = (256, 16)$

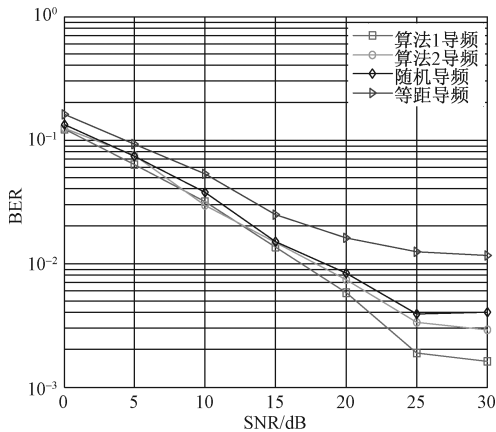


图 5 $(N, N_p) = (256, 32)$ 时,四种方法的 BER 曲线

Fig. 5 BER of four methods for $(N, N_p) = (256, 32)$

从以上仿真结果可以得出,随着信噪比增加,算法 1 的优越性进一步体现出来,其 BER 性能优于算法 2、随机方法和等距导频下的 LS 估计。

4 结束语

本文研究了基于压缩感知技术的 OFDM 稀疏信道估计,对影响信道估计性能的导频位置问题,提出了一种优化导频位置的改进算法,该算法结合了 DFT 子矩阵列之间相干性最小准则和基于信道状态信息的反馈机制,联合优化导频序列。仿真结果表明,本文所提出算法与当前的随机优化算法、随机方法和等距导频下的 LS 估计相比,可进一步改善信道估计的性能。

参考文献

- Barhumi I, Leus G, Moonen M. Optimal training design for MIMO OFDM systems in mobile wireless channels. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 2003;51(6):1615—1624
- Guo D, Shamai S, Verdú S. Mutual information and minimum mean-square error in Gaussian channels. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 2005;51(4):1261—1282
- Wan F, Zhu W P, Swamy M N S. Semiblind sparse channel estimation for MIMO-OFDM systems. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2011;60(6):2569—2582
- Shin C, Heath R W, Powers E J. Blind channel estimation for MIMO-OFDM systems. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2007;56(2):670—685
- Chen J C, Wen C K, Ting P. An efficient pilot design scheme for sparse channel estimation in OFDM systems. *Communications Letters, IEEE*, 2013;17(7):1352—1355
- Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? *Information Theory, IEEE Transactions on*, 2006;52(12):5406—5425
- Qi C H, Wu L N. Optimized pilot placement for sparse channel estimation in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters, IEEE Transactions on*, 2011;18(12):749—752
- 戚晨皓, 吴乐南, 朱鹏程. 认知无线电中的稀疏信道估计与导频优化. *电子与信息学报*, 2014;36(4):763—768
Qi C H, Wu L N, Zhu P C. Sparse channel estimation and pilot optimization for cognitive radio. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2014;36(4):763—768
- 龙 慧, 王 慧. 时变 OFDM 稀疏信道估计中最优导频选择. *科学技术与工程*, 2014;14(2):119—121
Long K, Wang H. Choice of optimized pilot for sparse channel estimation in OFDM systems over time-varying channels. *Science Technology and Engineering*, 2014;14(2):119—121

Optimized Pilot Design Schemes in OFDM Systems

REN Teng-fei, LI Yan-ping*, HAO Xi-guo

(College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

[Abstract] In orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems, the received signals are easily affected by the frequency selective fading channel, the accurate channel estimation is indispensable at receiver. Considering the inherent sparsity of the wireless channel and the effectiveness of the compressed sensing technology, this paper investigated the OFDM sparse channel estimation utilizing the compressed sensing technology. Aiming at the problem that the position of pilot sequence significantly affects the channel estimation performance, we propose a pilot optimization algorithm using the feedback mechanism, which is combining the criterion of minimizing the coherence between the columns of the Discrete Fourier Transform (DFT) sub-matrix and the feedback mechanism of the channel state information to jointly optimize the pilot sequence. Simulation results show that compared with the known stochastic optimization algorithms and the traditional least squares channel estimation, the proposed algorithm can effectively reduce the impact of the interference and noise on the channel estimation, which further improve the channel estimation performance.

[Key words] OFDM sparse channel estimation compressed sensing feedback pilot design

(上接第 147 页)

- 8 Xu Ziqiang, Shi Yu, Xu Congyu, *et al.* A novel dual mode substrate integrated waveguide filter with mixed source-load coupling (MSLC). *Progress In Electromagnetics Research*, 2013;13(6):595—600
- 9 Liu Bing, Hong Wei, Wang Yuanqing, *et al.* Half Mode substrate integrated waveguide (HMSIW) 3-dB coupler. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007;17(1):22—24
- 10 Hong W, Liu B, Wang Y Q, *et al.* Half mode substrate integrated waveguide; a new guided wave structure for microwave and millimeter wave application. *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, 2006;20(4):219—222
- 11 Lai Q, Fumeaus C, Hong W, *et al.* Characterization of the propagation properties of the half-mode substrate integrated waveguide. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2012;60(3):1625—1630

The Miniaturization Research of a Novel Multi-layered Eighth-mode Substrate Integrated Waveguide Filter

DUAN Xiao-xi, ZHU Yong-zhong, LI Ping, CHEN Jun

(Department of Information Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, P. R. China)

[Abstract] In order to solve the miniaturization of the substrate integrated waveguide filter, a novel multi-layered eighth-mode substrate integrated waveguide (EMSIW) filter is proposed in this paper. The filter is designed and simulated by Ansoft-HFSS. The simulation shows that it has a good property. The relative bandwidth is 23.6% and the dimensions are reduced almost 87.5%, which realize the miniaturization of the filter.

[Key words] multi-layer filter EMSIW