

# 相位噪声对多天线 QAM 性能影响分析

王学斌, 李会勇, 安琦, 何子述  
(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 正交幅度调制系统(QAM)对载波的相位噪声非常敏感,多天线技术的使用可以提高通信系统的性能。对 QAM 系统在当今通信系统中的应用及相位噪声对 QAM 系统性能影响进行介绍,对多天线 QAM 系统受相位噪声影响进行了理论分析及仿真验证,并给出了闭式误差向量幅度(EVM)表达式。给出的理论公式及仿真结果对多天线 QAM 系统相位噪声指标的确定及系统性能分析具有参考意义。

**关键词:** 相位噪声;正交振幅调制;多天线;误码率

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2012)01-46-2

## Analysis on Effect of Carrier Phase Noise on Performance of Multi-antenna QAM Systems

WANG Xue-bin, LI Hui-yong, AN Qi, HE Zi-shu  
(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Multi-level quadrature amplitude modulation (QAM) is very sensitive to carrier phase noise. Multi-antenna technique can be used to retain the system's performance. In this paper, the extensive application of QAM and the effect caused by phase noise are introduced. The analysis and simulation results are provided to illustrate the effect of phase noise on multi-antenna QAM systems. Besides, a close-form expression of the error vector magnitude (EVM) is provided. The analysis and simulation results can be used in the determination of phase noise specifications of multi-antenna QAM systems and the optimization of system performance.

**Key words:** phase noise; QAM; multi-antenna; BER

### 0 引言

随着用户激增、多媒体通信等飞速发展,无线频谱资源逐渐紧张,由于具有较高的频谱利用率和良好的性能,多电平正交幅度调制(M-QAM)逐渐受到重视,目前在 3G 或 4G 无线通信系统、无线局域网(WLAN)、数字视频广播(DVB)等领域获得了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。近年来国内外学者研究了相位噪声对单发单收系统性能的影响,随着多电平正交幅度调制(M-QAM)的电平数  $M$  的增加,通信系统受相位噪声影响就越严重,甚至可能导致误码率基底现象,仅靠提高信噪比(SNR),系统误码率指标无法满足要求<sup>[3]</sup>。

多天线通信技术的使用,尤其是近年来发展的收发多天线通信系统,能大幅度提高无线通信系统的频谱效率、链路可靠性及干扰抑制等性能<sup>[3-5]</sup>。然而对于相位噪声对多天线 QAM 系统性能影响目前没有完善的资料,基于此原因,对相位噪声对多天

线高电平 QAM 系统性能影响进行了理论分析及仿真验证,并给出了闭式误差向量幅度(EVM)表达式。

### 1 相位噪声对 QAM 系统影响数学模型

图 1 为多天线 QAM 通信系统结构框图,发射端有  $M$  根天线,接收端  $N$  根天线。发射端各天线输出的射频信号相同,经过空间传播到达接收端,接收端各个通道的加性高斯白噪声独立同分布,接收端各个通道的相位噪声独立同分布,将各通道的输出求和(求均值)得到输出端信号。

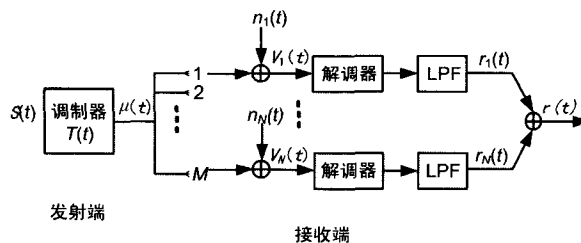


图 1 多天线 QAM 系统结构框图

对码元 QAM 调制后,即得第  $m$  根发射天线的

收稿日期:2011-10-21

作者简介:王学斌(1986—),男,硕士研究生。主要研究方向:自适应与阵列信号处理。

基带信号为:  $s_m(t) = [s_{mi}(t), s_{mq}(t)]^T, m = 1, 2, \dots, M$ 。

经过正交调制得到第  $m$  根发射端天线输出:

$$u_m(t) = T(t)s_m(t), \quad m = 1, 2, \dots, M。$$

上式中,  $T(t) = 2[\cos(\omega_0 t), \sin(\omega_0 t)]$ , 对于接收端  $N$  根天线来说, 第  $n$  根天线接收到的信号为:

$$v_n(t) = \sum_{m=1}^M u_m(t) + n_n(t), \quad n = 1, 2, \dots, N。$$

对接收端的  $v_n(t)$  进行 I, Q 正交解调, 再进行滤波, 考虑相位噪声  $\alpha_r \sim N(0, \alpha_{rms}^2)$  的影响, I, Q 正交解调函数为:

$$\begin{aligned} R_n(t) &= [\cos(\omega_0 t + \alpha_{r_n}), \sin(\omega_0 t + \alpha_{r_n})]^T, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ r_n(t) &= LPF\langle R_n(t) \{ \sum_{m=1}^M [T(t)s_m(t)] + n_n(t) \} \rangle = \\ &= M \cdot LPF\langle R_n(t)T(t) \rangle s(t) + LPF\langle R_n(t)n_n(t) \rangle = \\ &= M \cdot H_n s(t) + n_{r_n}(t) \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned}$$

其中:

$$H_n = LPF\langle R_n(t)T(t) \rangle = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{r_n}) & -\sin(\alpha_{r_n}) \\ \sin(\alpha_{r_n}) & \cos(\alpha_{r_n}) \end{bmatrix}, n = 1, 2, \dots, N,$$

由于  $\alpha_{r_n} \sim N(0, \alpha_{rms}^2)$ , 在  $\alpha_{rms} \ll 1$  的假设下, 有:

$$H_n \approx \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{r_n} \\ \alpha_{r_n} & 1 \end{bmatrix}, n = 1, 2, \dots, N。$$

$$n_{r_n}(t) = LPF\langle R_n(t) \cdot n_n(t) \rangle, n = 1, 2, \dots, N。$$

又因为  $n_{r_n}(t)$  由信道噪声  $n_n(t)$  线性变换得到, 所以  $n_{r_n}(t)$  还是高斯噪声, 它是零均值的, 可得到它的自相关矩阵为:

$$C_{n_{r_n}n_{r_n}} = \frac{N_0 B}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, n = 1, 2, \dots, N。$$

式中,  $B$  为低通滤波器  $LPF$  的带宽,  $N_0$  为信道噪声  $n_n(t)$  的单边功率谱密度。

在采样时钟同步的理想情况下, 接收到的信号可表示为:

$$r_n(n) = M \cdot H_n \cdot s(n) + n_{r_n}(n) \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

最后,  $N$  根天线接收到的信号总和为:

$$r(n) = \sum_{n=1}^N r_n(n)。$$

## 2 相位噪声对 QAM 系统 EVM 影响分析

对于  $M$  发  $N$  收系统来说, 误差矢量函数可表示为:

$$\begin{aligned} e(n) &= \frac{r(n)}{MN} - s(n) = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N H_n - N \cdot I \right) s(n) + \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N n_{r_n}(n)。 \end{aligned}$$

另外考虑到信号、相位噪声及高斯白噪声互相独立, 所以:

$$\begin{aligned} EVM^2 &= \sigma_e^2 = E[e^H(n)e(n)] = \\ &= \frac{1}{N^2} E[s(n)^H \cdot \left( \sum_{n=1}^N \alpha_{r_n} \right)^2 I \cdot s(n)] + \\ &= \frac{1}{M^2 N^2} E\left[ \sum_{n=1}^N n_{r_n}^H(n) \cdot n_{r_n}(n) \right] = \\ &= \frac{1}{N} E_s R \alpha_{rms}^2 + \frac{N_0 B}{2 M^2 N}。 \end{aligned}$$

从上式可以看出, EVM 表达式中  $\frac{1}{N} E_s R \alpha_{rms}^2$  即

为相位噪声的影响, 增大接收端天线数量 ( $N$ ), 可以改善由相位噪声导致的 QAM 系统性能下降, 而增加发射端天线的数量只会改善信噪比, 对相位噪声无影响。

## 3 仿真结果

单发单收系统, 64QAM 调制方式, 相位噪声均方差  $\alpha_{rms} = 0^\circ, 0.5^\circ, 1.5^\circ, 3^\circ$ , 信噪比为 5 ~ 30 dB, 以 2 dB 步进, 误码率曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 当相位噪声均方差为  $3^\circ$  时, 出现误码率基底现象, 误码率在  $10^{-3}$  以上, 此时信噪比提高并不能改善误码率。

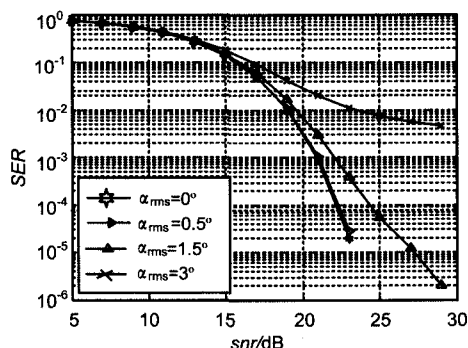


图 2 相噪对单发单收系统 SER 影响仿真

图 3 和图 4 分别是一发四收与四发四收 64QAM 系统受相位噪声影响 SER 仿真结果图, 可以看出, 接收端天线数量的增加改善了系统性能, 在相位噪声均方差为  $6^\circ$  时, 仍然会出现误码率基底现象。对比图 3 与图 4 可以发现, 发射端天线数量的增加能提高系统信噪比, 却并不能改善因相位噪声带来的性能下降。

(下转第 80 页)

## 4 结束语

对 ITU-R 降雨衰减的推测方法进行了研究,在此基础上提出了 Ku 频段卫星链路传输特性自动观测系统的设计方案,在后续工作中将对此设计方案进行实现,对 Ku 频段卫星链路传输特性进行详细分析,为地球站提供可靠依据。

### 参考文献

- [1] 谢德芳,翁木云,郭兴阳. Ku 频段卫星上行链路功率控制算法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科版), 2002,3(1):39-42.
- [2] 郝学坤,张小来,李文铎. 卫星通信链路中的雨衰动态特性分析[J]. 信息技术,2004,28(6):146-158.

- [3] 王成元,徐慨,任佳. 卫星链路降雨衰减的测量及频率换算[J]. 无线通信技术,2010,19(2):27-30.
- [4] 张俊祥,崔爱红,梁翼生. 降雨对卫星链路的影响分析[J]. 无线电工程,2005,35(12):11-13.
- [5] 杨云年. 降雨对 Ku 波段卫星通信系统的影响极对抗措施[J]. 通讯世界,1998(48):32-34.
- [6] 余英,张瑞芝. 太阳活动及雨衰对卫星通信的影响和改善措施[C]//全国广播电影电视系统首届中青年优秀科技论文集,2001:150-154.
- [7] 王成元,徐慨,袁林. 一种自适应编码调制抗雨衰对策的研究[J]. 无线通信技术,2010,36(4):45-47.
- [8] 舒畅,周坡. 基于离散降雨衰耗状态的卫星信道模型[J]. 指挥控制与仿真,2007(4):48-51.
- [9] 王艳岭,达新宇. ka 频段卫星通信分集和自适应抗雨衰技术[J]. 电讯技术,2010,50(9):125-131.

(上接第 47 页)

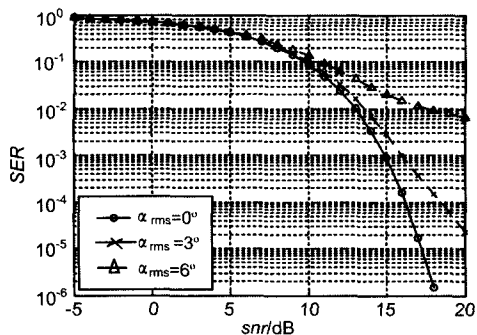


图 3 相噪对一发四收系统 SER 影响仿真

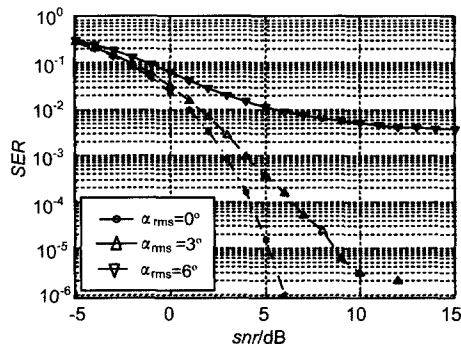


图 4 相噪对四发四收系统 SER 影响仿真

## 5 结束语

高电平 M-QAM 调制方式虽然具有较高的频谱利用率,其受相位噪声的影响也较严重,使误码率升

高,系统性能下降,甚至导致误码率基底发生,此时仅靠提高系统信噪比无法使系统性能符合要求。多天技术技术的应用可以有效提高 M-QAM 系统的性能,增加接收端天线可以有效地改善相位噪声对系统性能的损害。

### 参考文献

- [1] GRAVALOS A G, HADJINCICOLAOU M G, NI Qiang. Performance analysis of IEEE 802.11n under different STBC rates using 64-QAM[C]//IEEE CONFERENCES, 2007 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing:164-168.
- [2] LI Meng, NOUR C A, JEGO C, et al. Design of Rotated QAM Mapper/demapper for the DVB-T2 STANDARD [C]// IEEE Conferences, Signal Processing Systems, 2009:018-023.
- [3] CHEN Zhen-qi, DAI Fa-foster. Effects of LO Phase and Amplitude Imbalances and Phase Noise on M-QAM Transceiver Performance [J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2010,57(5):1505-1517.
- [4] HUNTER M, GANTI R K, ANDREWS J G. Transmission Capacity of Multi-Antenna Ad Hoc Networks with CSMA [C]// Signal, Systems and Computers (ASILOMAR), 2010:1577-1581.
- [5] HIMANSHU K, BHATTACHARJEE R. Outage Performance of Multi-Antenna Relay Cooperation in the Absence of Direct Link[J]. IEEE communication letters, 2011, 15(4):398-400.

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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](http://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>