

矢量毫米波系统中非线性补偿技术研究

韩超, 华阳

(海军驻大连 426 厂军事代表室, 辽宁 大连 430000)

摘要: **目的** 针对矢量毫米波系统中因传输链路和光电转换带来的非线性问题, 提出一个基于维特拉级数的非线性均衡方案。**方法** 首先给出该方案的基本原理, 然后搭建一个射频载波频率为 40 GHz、传输信号为 5 Gbaud 16QAM 的矢量毫米波仿真系统, 分析基于维特拉级数的非线性模型各阶非线性项的贡献, 并比较在不同传输距离情况下, 该方案相对于仅采用线性均衡方案对系统性能的提升。**结果** 在传输距离为 10 km 时, 该方案能够将平台误码率降低到 10^{-3} 以下。**结论** 该方案明显提升了系统的性能。

关键词: 非线性失真补偿; 维特拉级数; 矢量毫米波系统; 光载无线波

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.014

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)11-0075-04

Nonlinearity Compensation Technology in Vector Millimeter Wave System

HAN Chao, HUA Yang

(Military Representative Office of the 426 Navy in Dalian, Dalian 430000, China)

ABSTRACT: Objective To propose a nonlinear equalization method based on the Volterra series to solve the nonlinear problems caused by transmission link and photoelectric conversion in vector millimeter wave system. **Methods** Firstly, the basic principle of this method was given, and then a vector millimeter wave simulation system was built. Its RF carrier frequency was 40GHz and its transmission signal was 5Gbaud 16QAM. Finally the nonlinear term contribution of the nonlinear model based on Volterra series was analyzed. The nonlinear equilibrium method's ability to improvement of the system performance was compared with the linear equilibrium scheme in the case of different transmission distance. **Results** When the transmission distance was 10km, the proposed nonlinear equalization method could reduce platform bit error rate to less than 10^{-3} . **Conclusion** This plan significantly improves the performance of the system.

KEY WORDS: nonlinear distortion compensation; volterra series; vector mm-wave system; radio over fiber

无线通信和光纤通信技术发展迅猛,无线通信用户急速扩大,多媒体服务也日益多样化。虽然光纤通信技术提供了海量的带宽和超高的速率,却存在缺乏灵活的分配方式以及接入方式。无线通信可以提供灵活的接入,却受到电的调制带宽的必然约束。因此,从超大容量超高速通信的需求和发展上来看,以光纤作为的媒质,传送高速宽带无线信号,结合光纤和无线各自长处的光载无线波(RoF)通信技术,成为一种有效的解决方案^[1-10]。

矢量毫米波系统最近引起了广泛关注,该系统仅利用一个调制器,即可同时产生经过调制的高频射频载波信号,大大简化了系统结构。由于采用的是载波倍频方案,产生的射频载波频率非常稳定^[2-4]。在光载波转化为射频载波的过程中,采用的是平方律探测方式,是一个非线性过程,因而在矢量毫米波系统发射机端,需要进行幅度和相位的预编码过程,从而保证接收到的信号是一个正常的正交幅度信号(QAM)。然而,产生的两个用于拍频的光载波在光纤中传输

时,由于光纤色散的影响,会产生一定的时延,经过平方律探测后,会引入额外的非线性失真,而这个是和传输的光纤长度有关,不能通过预编码技术予以补偿。

文中提出一个基于维特拉级数的非线性均衡方案,用来补偿矢量毫米波系统中的非线性失真。首先推导了矢量毫米波系统产生经调制的射频载波信号的基本原理,然后搭建了一个射频载波频率为 40 GHz、传输信号为 5 Gbaud 16QAM 的矢量毫米波系统,通过该仿真系统研究提出方案的非线性补偿性能。

1 原理

在矢量毫米波系统中,强度调制器(IM)或者相位调制器(PM)均可用于产生两个拍频的光载波,通过平方律探测引入非线性的过程是相似的。对于该系统,强度调制器的直流偏置点设置为零点以实现载波抑制,因此输出的光信号可表示为:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t) \cdot$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \cdot J_{2n-1}(\kappa) \cdot \cos((2n-1)2\pi f_s t + \varphi(t)) \quad (1)$$

式中: J_{2n-1} 是奇数阶 $(2n-1)$ 第一类贝塞尔函数; $\kappa = \pi V_{\text{drive}} K_2(t) / V_{\pi}$; V_{drive} 和 V_{π} 是强度调制器的驱动电压和 $\pi V_{\text{drive}} K_2(t) / V_{\pi}$ 半波电压; f_c 是光载波频率; f_s 是矢量毫米波射频信号中心频率; A 是光载波幅度。如果仅选用第一阶光载波边带,强度调制器的输出可以简化为:

$$s(t) = A J_1(\kappa) \cdot \cos(2\pi f_c t) \cdot \cos(2\pi f_s t + \varphi(t)) \quad (2)$$

经过平方律探测后信号可以表示为:

$$i_{\text{RF}}(t) = R |s(t)|^2 = R A^2 J_1^2(\kappa) + R A^2 J_1^2(\kappa) \cos(2\pi \cdot 2f_s t + 2\varphi(t)) \quad (3)$$

R 是光电探测器(PD)的响应率。从式(3)中可以看出,获得的射频信号的相位为原始相位的 2 倍,并且幅度为原始幅度的 $J_1^2(\kappa)$,从而导致输出的 M-QAM 信号不再是正常的方形星座点。

为了获得正常的 QAM 信号,需要对原始信号进行幅度和相位预编码。但光纤中的色散效应会导致进行拍频的两个光载波的传输时延,经过 PD 后会引入新的非线性失真。Volterra 级数广泛应用于非线性建模中,通过多阶非线性项及其系数来拟合不同的非线性特性。因此提出了一个基于 Volterra 级数的非线性均衡方案,其表达式为:

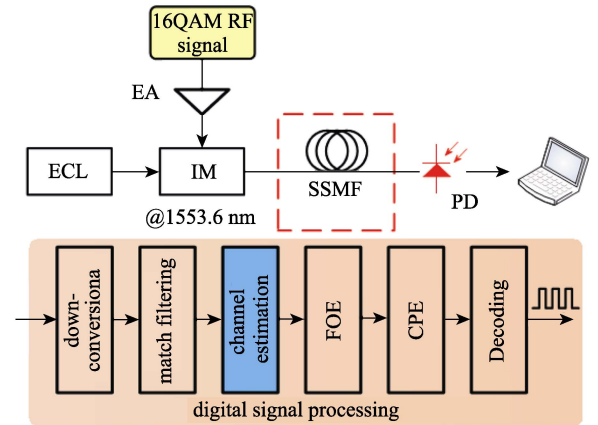
$$y(i) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(i) \cdot x(i-k) + \sum_{p=2}^{N_p} \sum_{k=0}^{N-1} h_p(i) \cdot x^p(i-k) \quad (4)$$

式中忽略了相邻比特之间的乘积项,从而简化了

非线性模型的结构。 h_k 和 h_l 为线性项系数, N 为记忆长度, p 为非线性阶数, N_p 为非线性项数。

2 仿真和讨论

在这个部分中,搭建了一个射频载波频率为 40 GHz、调制信号为 5 Gbaud 16QAM 的矢量毫米波系统,如图 1 所示。首先对长度为 $2^{16}-1$ 的伪随机序列进行四阶信号的编码,然后根据第二部分推导的关系对每一个 16QAM 码元进行幅度和相位预编码。经过预编码的基带 16QAM 信号变换到 20 GHz 的射频载波上,产生的信号用来驱动强度调制器,强度调制器的直流偏置点设置为零点。利用该光载波抑制技术可以产生两个光的一阶边带,其频率间隔为 40 GHz。仿真系统中激光器波长为 1553.6 nm,线宽为 100 kHz,注入到光纤中的功率为 3 dBm。光纤损耗和色散分别设置为 0.2 dB/km 和 17 ps/(km·nm)。



ECL: 外腔激光器, IM: 强度调制器, EA: 电放大器, PD: 光电探测器

图 1 16QAM 矢量毫米波仿真系统

经过光纤链路后,光矢量信号在光电探测器(PD)处拍频,从而产生了 40 GHz 的毫米波信号,采用数字信号处理(DSP)的方式对该信号进行解调。首先进行数字下变频和匹配滤波,获得基带的 16QAM 信号。然后采用线性均衡器(LE)或者非线性均衡器(NLE)进行信道估计,其中均衡器系数利用改进级联多模算法(MCMMMA)进行自适应更新^[5]。信道估计后再进行频率偏移估计、相位噪声估计和解码,最后通过统计 $2^{16}-1$ 个比特中的误码数来评估系统的误码率。

16QAM 矢量毫米波信号的星座如图 2 所示。未进行幅度预编码的星座图如图 2a 所示,可以看到式(3)中的 $J_1^2(\kappa)$ 系数项会导致星座点之间的距离发生变化。经过幅度预编码之后,可以形成正常的 16QAM 星座图,如图 2b 所示。经过光纤传输之后,16QAM 矢量毫米波的星座图再次发生畸变,并且随着传输距离的增加,色散影响增大,畸变程度也更为明显,如图 2c 和 d 所示。

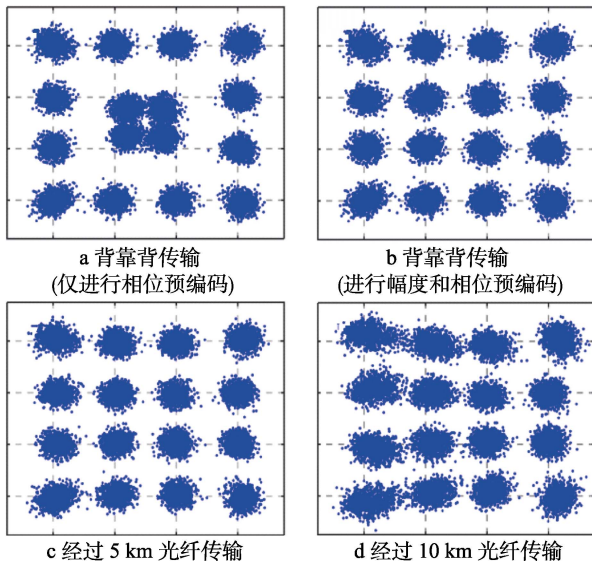


图 2 接收到的 16QAM 矢量毫米波信号的星座

接下来将研究提出的非线性补偿方案的性能。首先研究 Volterra 级数模型不同非线性项的贡献。系统传输波特率为 5 Gbaud, 传输距离为 8 km, 非线性方案中均衡器不同非线性阶数的归一化系数如图 3 所示 (传输波特率为 5 Gbaud, 传输距离为 8 km)。可以看出, 系统的五阶和九阶非线性阶数贡献较大, 二阶和四阶非线性次之。考虑到系统的性能和计算复杂度, 在后续的非线性均衡方案中我们将选取二阶和五阶多项式进行计算。

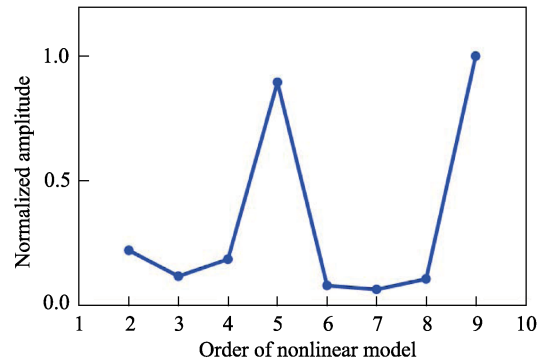


图 3 非线性均衡方案中非线性项归一化系数

对 16QAM 矢量毫米波的误码特性进行了研究, 如图 4 所示 (插图 A 和 B 分别为经过 10 km 和 8 km 光纤传输后在接收功率为 -20.5 dBm 时的星座图)。当 5 Gbaud 16QAM 信号传输 8 km 光纤后, 采用文中提出的非线性均衡方案。当接收到的光功率在 -20 dBm 以下时, 系统误码率特性有了明显提升。当传输距离提高到 10 km 时, 由于此时光纤色散和平方律探测引入的非线性效应加重, 对于线性或者非线性方案, 提高接收到的光功率都不能明显降低系统的误码, 但使用非线性均衡方案的误码曲线明显低于线性方案的误码曲线。与图 2 中各种失真信号和经过补偿的信号星座图相比, 图 4 中插图 A 的星座图已经接近于正常的方形分布了。因此可以得出本文提出的非线性均衡方案在矢量毫米波系统中对非线性失真的补偿是可行的。

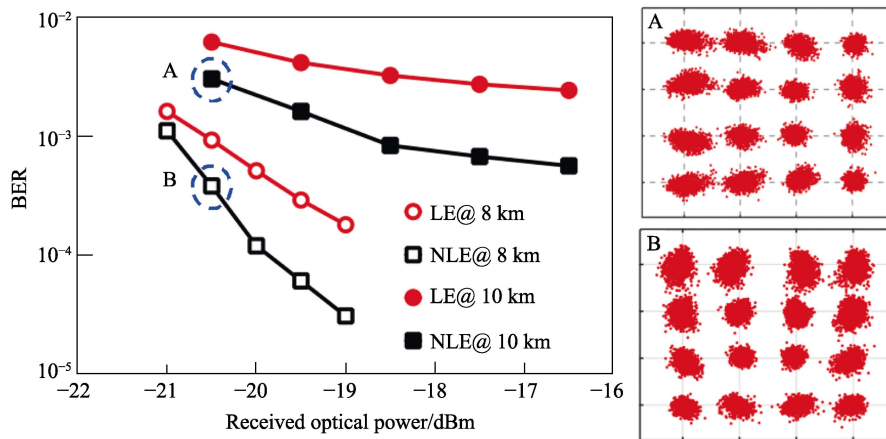


图 4 5 Gbaud 16QAM 矢量毫米波信号传输 8 km 和 10 km 光纤后采用非线性均衡方案的误码率特性比较

3 结论

文中提出了基于维特拉级数的非线性均衡方案, 用来补偿矢量毫米波系统中的非线性失真。搭建了一个产生 40 GHz 射频载波, 5 Gbaud 16QAM 调制信号的矢量毫米波仿真系统。通过对信号星座图分析证明了光纤色散和平方律探测会带来系统非线性失真。同时对提出的非线性均衡方案进行了研究, 分析了

Volterra 级数模型中不同非线性阶数的权重, 并通过系统误码特性仿真验证了所提出的非线性均衡方案对于矢量毫米波系统中非线性失真的缓解是可行的。

参考文献:

- [1] TAO L, DONG Z, YU J, et al. Experimental Demonstration of 48-Gb/s PDM-QPSK Radio-Over-Fiber System Over 40-GHz mm-Wave MIMO Wireless

- Transmission[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24: 2276-2279.
- [2] XIAO J, ZHANG Z, LI X, et al. Vector 8QAM Signal Generation and Transmission Based on Optical Carrier Suppression[J]. Optics Communications, 2015, 355: 125-129.
- [3] ZHAO L, YU J, CHEN L, et al. 16QAM Vector Millimeter-Wave Signal Generation Based on Phase Modulator with Photonic Frequency Doubling and Precoding[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-8.
- [4] CHEN L, YU J, LI X. PDM-16QAM Vector Signal Generation and Detection Based on Intensity Modulation and Direct Detection[J]. Optics Communications, 2016, 371: 15-18.
- [5] TAO L, JI Y, LIU J, et al. Advanced Modulation Formats for Short Reach Optical Communication Systems[J]. IEEE Network, 2013, 27(6): 6-13.
- [6] SHI J, ZHANG J, ZHOU Y, et al. Transmission Performance Comparison for 100Gb/s PAM-4, CAP-16 and DFT-S OFDM with Direct Detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 99: 1.
- [7] LI X, YU J, WANG K, et al. Delivery of 54-Gbps 8QAM W-Band Signal and 32-Gbps 16QAM K-Band Signal over 20-km SMF-28 and 2500-m Wireless Distance[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 99: 1.
- [8] LI X, YU J. Over 100 Gb/s ultrabroadband MIMO wireless signal delivery system at the D-band[J]. IEEE Photonics Journal 2016, 8(5): 1-10.
- [9] LI X, XIAO J, YU J. Long-Distance Wireless mm-Wave Signal Delivery at W-Band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 661-668.
- [10] LI X, YU J, XIAO J. Demonstration of Ultra-Capacity Wireless Signal Delivery at W-Band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 180-187.
- [11] XU Y, LI X, YU J, et al. Simple and Reconfigured Single-sideband OFDM RoF System[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22830-22835.