

# 基于数据共轭映射的载波间无扰消除方法

王 锋<sup>1,2</sup>, 廉保旺<sup>1</sup>, 王永生<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:**结合实际应用中收发信电台的本振往往存在相位噪声的问题,分析了相位噪声对子载波信号的影响,并针对相位噪声引起的子载波间干扰,给出并分析了基于数据共轭映射的干扰消除方法,对该方法的 BER 性能和 PAPR 性能进行了仿真,实验结果表明,基于数据共轭映射的子载波间干扰消除方法具有良好的系统性能。

**关键词:**正交频分复用;子载波间干扰;数据共轭映射;地空战术数据链

**中图分类号:** V243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)01-0047-04

随着数据链技术的研究和发展,为了实现数据链系统中信息的迅速分发和高速传输,人们开始研究和尝试把多载波调制技术应用于地空数据链系统中。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM)技术在地空数据链中的应用就是在此基础上发展起来的。

OFDM 系统中,正交频分复用建立在子载波间严格正交的基础上,任何传输过程中的载波信号波形畸变都会影响子载波之间的正交性,从而造成子载波间干扰(Inter Carrier Interference - ICI)的产生。本文主要针对相位噪声引起的 ICI 进行讨论。

很多研究人员对 ICI 的估计和消除方法进行了研究,文献[1]提出了基于分散导频的 LS 估计算法,但这种方法的性能并不十分理想。Florent Munier 等人提出用 MMSE 和 ML 方法估计相位噪声<sup>[2]</sup>,可是算法增大了系统开销,而且复杂度较高。J. Shentu 指出了利用数据变换的方法消除相位噪声引起的 ICI<sup>[3]</sup>。J. Armstrong 和 Y. Zhao 等人提出利用数据变换来消除由于子载波频率偏移而引起的 ICI<sup>[4-5]</sup>。Y. Fu 等人讨论了利用数据共轭方法对频偏引起的 ICI 最小化<sup>[6]</sup>。H. G. Ryu 等人中讨论了利用数据共轭方法减小 ICI<sup>[7]</sup>。在以上相关理论研究的基础上,本文给出了在地空战术数据链应用中,与 QPSK 调制技术相结合时,对相位噪声引起的 ICI 利用数据共轭映射的方法进行消除,对其性能进行了仿真,并与原始 OFDM 系统以及数据变换方法进行了比较。

## 1 相位噪声对子载波信号的影响

由于发射机或接收机的本振频率不稳定而伴随产生的相位噪声是时变的,而且会对 OFDM 系统性能产生严重的影响。相位噪声对 OFDM 系统的影响主要有两方面:相位噪声低频部分造成的共同相位误差(Common Phase Error - CPE)会引起整个信号星座的旋转;相位噪声高频部分会产生子载波间干扰(ICI)。

设发送端发送的是 OFDM 信号,则该信号可表示为

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

在信息的传输过程中,既受到了发送端本振相位噪声的干扰,也受到了接收端本振相位噪声的干扰,所以,接收端信号  $r(t)$  可以表示为

收稿日期:2006-03-06

基金项目:军队专项科研基金资助项目

作者简介:王 锋(1970-),男,山西临汾人,博士生,主要从事通信、导航与测控技术研究;

廉保旺(1962-),男,河南武陟人,教授,主要从事数字信号处理技术及航空电子技术研究。

$$r(t) = [(s(t)e^{j\phi_{TX}(t)}) \otimes h(t) + n(t)]e^{j\phi_{RX}(t)} \quad (2)$$

式中,  $n(t)$  是 高 斯 白 噪 声,  $h(t)$  是 信 道 的 冲 击 响 应,  $\phi_{TX}(t)$  和  $\phi_{RX}(t)$  分 别 表 示 发 信 机 和 收 信 机 本 振 产 生 的 相 位 噪 声, 且 有  $\phi(t) = \phi_{TX}(t) = \phi_{RX}(t)$ ,  $\phi_{tot}(t) = \phi_{TX}(t) + \phi_{RX}(t)$ 。

经傅立叶变换后,可得第  $l$  路信号为

$$Y_l = \sum_{n=0}^{N-1} r(n)e^{jn\omega_l} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi(k-l)n}{N}} e^{j\phi_{tot}(n)} + N_l \quad (3)$$

一般来说,  $\phi_{tot}(n)$  很小,从而使得  $e^{j\phi_{tot}(n)} \approx 1 + j\phi_{tot}(n)$  成立,所以式(3)可改写为

$$Y_l = X_k \frac{(1 + \frac{j}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \phi_{tot}(n))}{CPE} + \frac{j}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0, k \neq l}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi(k-l)n}{N}} \phi_{tot}(n) + N_l \quad (4)$$

式(4)中可以很清楚地看出由相位噪声误差引起的共同相位误差(CPE)和子载波间干扰(ICI)对第  $l$  路子载波接收信号的影响。

## 2 基于数据共轭映射的 ICI 消除方法

Y. Zhao 等人在文献[5]中分析了利用数据变换的子载波间干扰自消除方法,其对应关系式为

$$X'_{2k} = X_k, \quad X'_{2k+1} = -X_k, \quad (k = 0, \dots, N-1) \quad (5)$$

与式(5)不同的是,本文中基于数据共轭映射的相应关系式则表示如下

$$X'_{2k} = X_k, \quad X'_{2k+1} = -X_k^*, \quad (k = 0, \dots, N-1) \quad (6)$$

式中,  $X_k$  是进行数据共轭映射之前的第  $k$  支路信息数据,  $X'_{2k}$  是经过数据共轭映射之后的第  $2k$  支路信息数据。在接收端,恢复信息数据的逆映射关系表示为

$$Z'_k = (Y_{2k} - Y_{2k+1}^*)/2 \quad (7)$$

式中,  $Y_{2k}$  是第  $2k$  路子载波数据,  $Z'_k$  是数据共轭逆映射之后的第  $k$  支路信息数据。系统工作原理如图1所示,输入信息数据经过 QPSK 数字调制后,在映射变换之前,首先需要进行串并变换。经过串并变换,变换为具有  $N/2$  路的并行数据,然后经过数据共轭映射将  $N/2$  路的并行数据变换为  $N$  路并行数据。

根据式(6),经过数据映射变换后的 OFDM 基带信号为

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X'_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}} = \sum_{k=0}^{N/2-1} (X_k e^{j\frac{2\pi 2kn}{N}} - X_k^* e^{j\frac{2\pi (2k+1)n}{N}}) \quad 0 \leq n \leq N \quad (8)$$

在接收端,对第  $2k$  路子载波数据进行 FFT 变换后,得到相应数据  $Y_{2k}$  的表示式,

$$Y_{2k} = \sum_{i=0}^{N/2-1} \left[ \frac{1}{N} X_i H_{2i} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(\frac{2\pi}{N}(2i-2k)m + \phi_{tot}(m))} - \frac{1}{N} X_i^* H_{2i+1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(\frac{2\pi}{N}(2i+1-2k)m + \phi_{tot}(m))} \right] + N_{2k} \quad (9)$$

式中,随机相位噪声  $\phi_{tot}(m) = \phi_{TX}(m) + \phi_{RX}(m)$ , 而且有  $e^{j\phi_{tot}(m)} \approx 1 + j\phi_{tot}(m)$ 。

同样,可以得到第  $2k+1$  个子载波信号的表示式,即

$$Y_{2k+1} = \sum_{i=0}^{N/2-1} \left[ \frac{1}{N} X_i H_{2i} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(\frac{2\pi}{N}(2i-2k-1)m + \phi_{tot}(m))} - \frac{1}{N} X_i^* H_{2i+1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(\frac{2\pi}{N}(2i-2k)m + \phi_{tot}(m))} \right] + N_{2k+1} \quad (10)$$

在式(9)和式(10)中,  $l = k$  时对应于含有 CPE 的情况,  $l \neq k$  时对应于含有 ICI 的情况。

设信道频率特性是平坦均匀的,信道的频率响应  $H(k) = 1$ ,在接收端,由受相位噪声影响的相邻子载波就可以重构第  $k$  路信号  $Z'_k$ ,即

$$Z'_k = \frac{(Y_{2k} - Y_{2k+1}^*)}{2} = X_k + \frac{1}{N} \sum_{l=0, l \neq k}^{N/2-1} \sum_{m=0}^{N-1} \sin\left(\frac{4\pi}{N}(l-k)m\right) (X_l^* e^{j\frac{2\pi lm}{N}} - X_l) \phi_{tot}(m) + N_k \quad (11)$$

另外,从信号叠加的角度来看,有

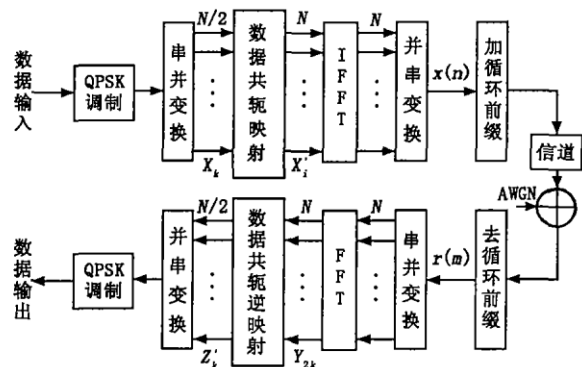


图1 基于数据共轭映射的 OFDM 基带信号处理框图

$$Z'_k = X_k + \text{CPE} + \text{ICI} + N_k \tag{12}$$

考虑到  $l = k$  时对应于含有 CPE 的情况,  $l \neq k$  时对应于含有 ICI 的情况,对比式(11) 和式(12),可以发现

$$\text{CPE} = 0 \quad ; \quad \text{ICI} = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N/2-1} \sum_{m=0}^{N-1} \sin\left(\frac{4\pi}{N}(l-k)m\right) (X_l^* e^{j\frac{2\pi}{N}m} - X_l) \phi_{\text{tot}}(m) \tag{13}$$

由式(13)可以看出,由发信机和收信机本振引起的相位噪声形成复杂的乘性因子混入其它各路子载波中,这些干扰成分的总和形成了对第  $k$  路信号  $Z'_k$  的子载波间干扰。

针对相位噪声的影响,通过对相应信号的分析,可以看出,当信道具有平坦特性时,基于数据共轭映射变换的系统具有 CPE 为零的特点。由于 ICI 的表达式没有明显的特征,因此从其表达式难以判断其性能和特点,这种情况下,我们可以通过计算机仿真来考察这种基于数据共轭映射方法的系统性能。通过对一些应用条件下的系统 BER 性能和 PAPR 性能仿真,并与原始 OFDM 以及其它几种数据处理方法相比较,可以看出基于数据共轭映射方法的明显优越性。

### 3 计算机仿真

一般来说,BER 是一个评价数字通信系统性能的重要指标。在地空数据链系统中传输的主要是数字信息,当 OFDM 技术结合 QPSK 数字调制技术应用于地空数据链时,考虑的一个重要指标就是系统传输的 BER 性能。结合 QPSK 调制,通过仿真主要考察了原始 OFDM 系统和基于卷积编码、基于数据变换、基于数据共轭映射等 4 种情况下的 BER 性能。OFDM 子载波数  $N$  设为 64,3 种相位噪声方差(Phase Noise Variance - PN.Var)条件(0、0.03、0.06)下,在加性高斯白噪声信道中和莱斯(Rician)信道中的 BER 性能分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 和图 3 可以看出,不论是加性高斯白噪声信道,还是莱斯衰落信道中,与原始 OFDM、基于卷积编码、基于数据变换等方法相比,基于数据共轭映射情况下的 OFDM 系统均具有比较好的 BER 性能。尤其是当相位噪声方差较大时,基于数据共轭映射方法的优越性更加明显。

当我们考察一定信噪比条件下的 BER 性能时,可设 SNR 为 10 dB,子载波数  $N$  仍为 64,调制方式分别选择 QPSK 和 16QAM,则 3 种情况(原始 OFDM、基于数据变换、基于数据共轭映射)下的 BER 性能如图 4 所示。由图 4 可以看出,一定信噪比条件下,与原始 OFDM 系统相比,在系统中采用数据变换或数据共轭映射方法后,均能够提高系统的 BER 性能,而且基于数据共轭映射的 OFDM 系统具有三者中最好的性能。

对峰均功率比(peak average power ratio - PAPR)敏感是 OFDM 系统的一个重要问题,当 OFDM 系统内峰均功率比较高时,信号会产生非线性失真,导致整个系统性能的下降。对 3 种情况(原始 OFDM、基于数据变换、基于数据共轭映射)下 OFDM 信号 PAPR 的比较如图 5 所示。

由图 5 可以看出,与原始 OFDM 以及基于数据变换的方法相比,基于数据共轭映射的方法可以很好地缓解高的峰均功率比的问题。这一性能表明,基于数据共轭映射的 OFDM 系统更加具有实用性。总之,通过对原始 OFDM、基于卷积编码、基于数据变换和基于数据共轭映射等 4 种 OFDM 系统在一些相应条件下的 BER 性能和 PAPR 性能的计算机仿真,可以看出,基于数据共轭映射的方法比其它几种方法均具有更好的数据信号传输性能,如果应用于地空战术数据链系统中,将更加能够保证战术数据信息的高质量有效传输。

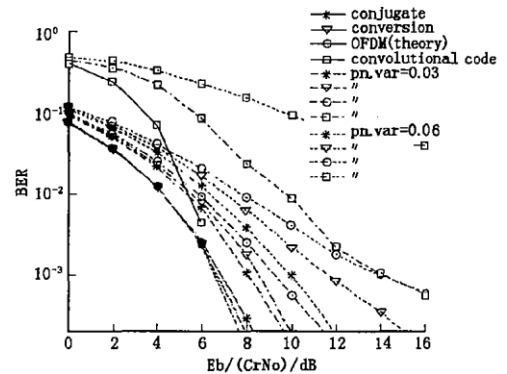


图 2 在 AWGN 信道中的 BER 性能图

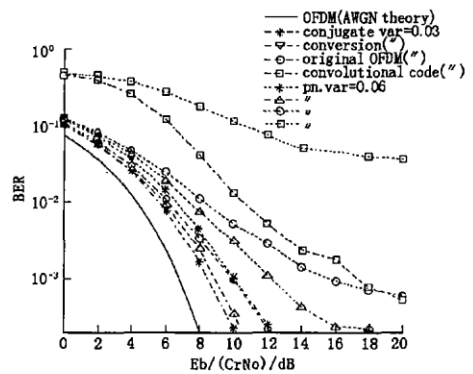


图 3 在 Rician 信道中的 BER 性能图

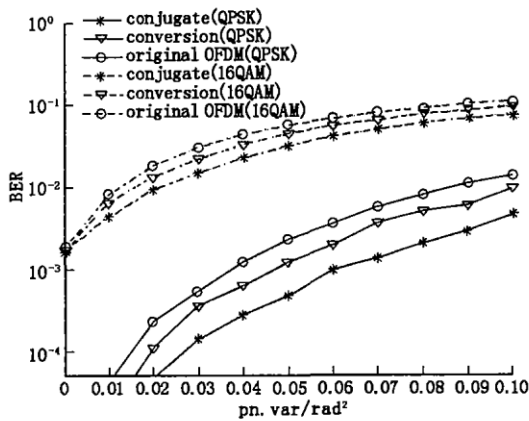


图4 一定信噪比条件下的 BER 性能图

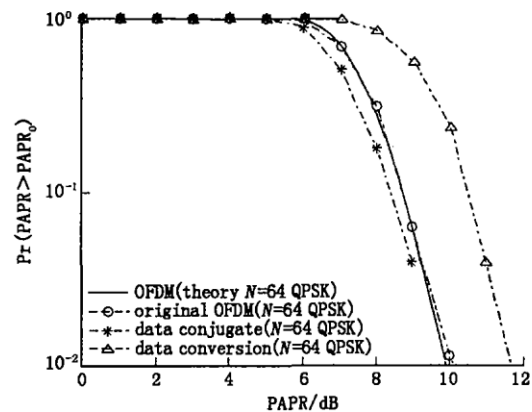


图5 不同数据处理方式下的 PAPR 比较图

## 参考文献:

- [1] Gholami M R, Nader - Esfahani S, Eftekhari A A. A New Method of Phase Noise Compensation in OFDM [A]. ICC 03 [C]. 2003:3443 - 3446.
- [2] Florent Munier, Thomas Eriksson, Arne Svensson. Receiver Algorithms for OFDM systems in Phase Noise and AWGN [A]. Barcelona, Spain, Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications [C]. 2004.
- [3] Shentu J, Panta K, Armstrong J. Effects of Phase Noise on Performance of OFDM Systems Using an ICI Cancellation Scheme [J]. IEEE Trans, Broadcast, 2003, 49(2): 221 - 224.
- [4] Armstrong J. Analysis of New and Existing Methods of Reducing Inter-carrier Interference Due to Carrier Frequency Offset in OFDM [J]. IEEE Trans. Commun, 1999, 47(3): 365 - 369.
- [5] Zhao Y, Haggman S G. Inter-carrier Interference Self - Cancellation Scheme for OFDM Mobile Communication Systems [J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49(7): 1185 - 1191.
- [6] Fu Y, Kang S G, Ko C C. A New Scheme for PAPR Reduction in OFDM Systems With ICI Self - Cancellation [A]. Proc, VTC 2002 - Fall, 2002 IEEE 56th Vehicular Technology Conf [C]. 2002, 1418 - 1421.
- [7] Heung - Gyoon Ryu, Yingshan Li, Jin - Soo Park. An Improved ICI Reduction Method in OFDM Communication System [J]. IEEE Transactions on broadcasting, 2005, 51(3): 395 - 400.

(编辑: 门向生)

## An Inter - carrier Interference Cancellation Method Based on Data Conjugate Mapping

WANG Feng<sup>1,2</sup>, LIAN Bao - wang<sup>1</sup>, WANG Yong - sheng<sup>1</sup>

- (1. The Electronic Information Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;
2. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**Abstract:** The phase noise of transceiver local oscillator and its influence on sub - carrier signal are analyzed. Aimed at the inter - sub - carrier interference caused by phase noise, an interference cancellation method based on data conjugate mapping is given and discussed. The performances of bit error rate and peak average power ratio are simulated. The simulation demonstrates that the inter - carrier interference cancellation method based on data conjugate mapping is excellent in system performance.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing; inter - sub - carrier interference; data conjugate mapping; air - ground tactical data link