

全相位 OFDM 系统的调制解调新算法

张亮^{1,2}

(1. 天津大学 电子信息工程学院, 300072 天津;
2. 天津工业大学 电工电能新技术天津市重点实验室, 300387 天津)

摘要:为解决 OFDM 系统中的频偏问题,利用全相位 FFT 技术,在全相位 FFT 和 OFDM 理论上,推导出全相位 OFDM 调制解调的数学表达式,建立了全相位 OFDM 调制解调系统模型和算法.全相位 FFT 利用自身的频谱分析功能来实现对信号相位和振幅的判决.实验结果表明:由频偏引起的相位误差和泄漏明显减小,系统误码率显著降低,验证出全相位 OFDM 的性能要好于现有的 OFDM 系统.

关键词: OFDM;全相位 OFDM;调制;解调;频率偏移

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)05-0097-04

New modulation and demodulation algorithm in all-phase OFDM

ZHANG Liang^{1,2}

(1. School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, 300072 Tianjin, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy, Tianjin Polytechnic University, 300387 Tianjin, China)

Abstract: To solve the problem of frequency spectrum, a method using all-phase FFT is presented in this paper. Based on the theory of all-phase FFT and OFDM, the mathematical expression, model and algorithm of modulation and demodulation in all-phase OFDM system were derived. The all-Phase FFT can adjudicate the phase and amplitude by using the function of spectrum analysis. The simulation results show that All-Phase OFDM system has less phase error, spectrum leakage and lower BER than OFDM.

Key words: OFDM; all-phase OFDM; modulation; demodulation; frequency spectrums

众所周知,OFDM 系统有频谱利用率高、抗频率选择性衰落强等特点^[1-6].但 OFDM 的缺点也很突出,如因为无线信道存在着时变性,一旦传输中信号频谱发生偏移,或者可能发生的情况为发射机与接收机振荡器之间存在频率偏差,OFDM 子载波间的正交性就会遭到破坏,导致系统子载波之间出现相互干扰.文献[7]用基于训练序列的 Schmidl&Cox 方法来捕获载波频偏,但捕获范围比较小;文献[8]提出频域互相关方法,但只能获得整数倍数的频偏估计;Classen 等^[9]提出利用导频来进行频偏估计,精度较高,但计算复杂,速度很慢.本文把全相位 FFT 技术应用到 OFDM 系统,给出了全相位 OFDM 的调制解调算法及数学

模型,有效的解决了 OFDM 系统的频偏问题.

1 OFDM 系统模型及调制解调算法

1.1 OFDM 系统模型

基于 IFFT 的 OFDM 系统模型^[10-11]如图 1 所示,在发送端由二进制数据流先经过信道纠错编码和交织,随后对处理结果进行数字调制,在得到的调制符号中插入导频,这时串行数据会被变换到一组并行的信道上进行 IFFT,把结果串行输出并添加循环前缀,这样就形成了基本的 OFDM 符号(如图 2).OFDM 符号经过调制,处理成模拟信号,最后通过射频电路被发送出去.

而接收(RX)则是发送的逆过程,所接收的 OFDM 符号经过同步处理,由模拟信号转换成数字信号,这些串行信号先被去除循环前缀,再进行串并转换,数字解调,调制后数据进行解交织,前向解码得到信源发送的信息(如图 3).

收稿日期: 2010-01-16.

作者简介: 张亮(1980—),男,讲师.

通信作者: 张亮, zhangliang117@hotmail.com.

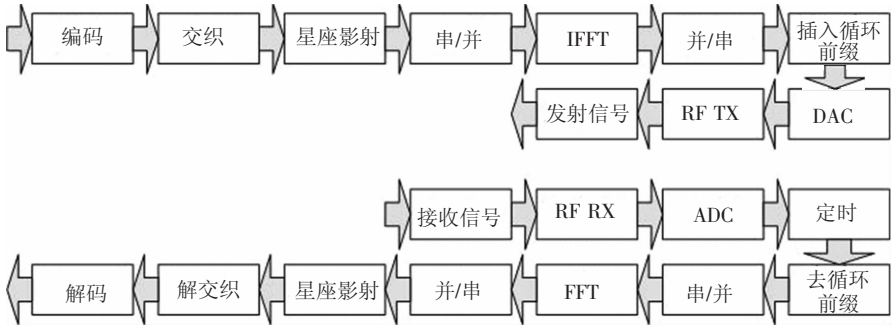


图 1 OFDM 系统原理

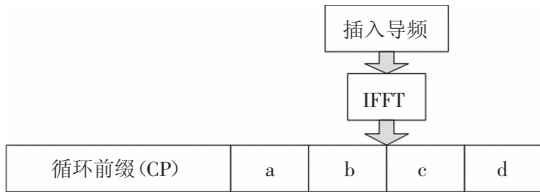


图 2 OFDM 信号调制

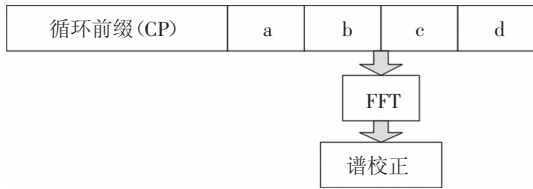


图 3 OFDM 信号解调

1.2 OFDM 系统调制解调算法

OFDM 信号可以表示为 N 个独立调制的正交子载波之和,即

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} d_{n,k} g_k(t - nT_s).$$

其中: $g_k(t)$ ($k = 0, 1, \dots, N - 1$) 表示第 N 个子载波,并可以表示为 $g_k(k) = e^{j2\pi f t}$, $t \in [0, T_s]$; $d_{n,k}$ 表示第 n 个信号间隔中第 k 个载波上加载的调制信号,其中每个信号的间隔为 T_s ,而 N 个符号则在 T_s 中传输. 符号序列 $d_{n,k}$ 通过串并转换将速率是 N/T_s 的一系列串行符号序列转换为速率为 $1/T_s$ 的 N 路并行符号序列.

在第 n 个信号间隔中传输的信号可定义为第 n 个 OFDM 帧信号,即

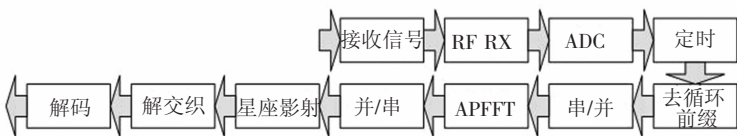
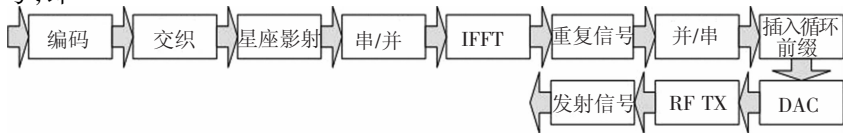


图 4 全相位 OFDM 系统原理

要得到 $(2N - 1)$ 个数据,只需在发送端将原 IFFT 后形成的 N 阶 OFDM 信号重复一次,去掉第 1 个数据后,形成 $(2N - 1)$ 个数据组成全相位 OFDM 信号,如图 5 所示.

$$F_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_{n,k} g_k(t - nT_s).$$

可以认为第 n 个 OFDM 帧 $F_n(t)$ 系 N 个符号组成,而每个符号则在 N 个正交子载波中的 1 个上进行了调制.

由于载波之间彼此相互正交,于是有

$$\langle g_k(t), g_i(t) \rangle_{T_s} = \int_{T_s} g_k(t) g_i^*(t) dt = T_s \delta(k - i).$$

因此,利用子载波的正交性可以用下式解调每个子载波上调制的信号,即

$$d'_{n,k} = \frac{1}{T_s} \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} s(t) g_k(t) dt.$$

如果没有码间干扰,那么上式可以表示为

$$d'_{n,k} = \frac{1}{T_s} \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} F_n(t) g_k(t) dt = d_{n,k}.$$

可以很好解调出发射信号中加载的子载波信号,恢复出发射符号序列.

2 全相位 OFDM 系统模型及调制解调算法

本节把全相位 FFT 技术运用到 OFDM 系统中,以克服 OFDM 系统的缺点.

2.1 全相位 OFDM 系统模型

全相位 OFDM 系统结构如图 4 所示,对于 N 阶变换,全相位 FFT 需要 $(2N - 1)$ 个数据,而 OFDM 信号是 N 个数据经 IFFT 形成的,不可能直接对原 OFDM 信号进行全相位 FFT 解码.

相应的,在接收端用全相位 FFT 对全相位 OFDM 信号进行解调,如图 6 所示,先乘以三角窗,再移位相加组成 N 个全相位预处理后的数据,再进行 N 阶快速傅里叶变换,经过校正后输出信号.

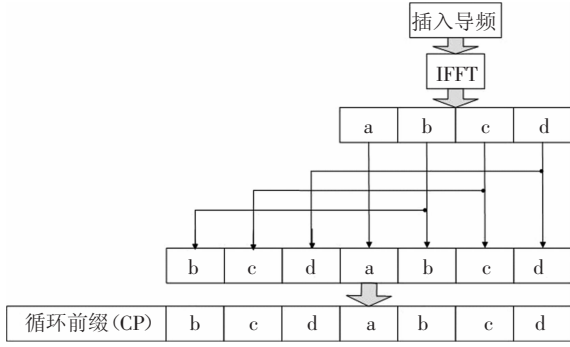


图 5 全相位 OFDM 调制信号

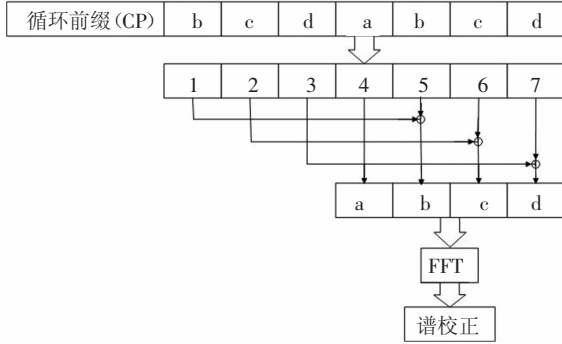


图 6 全相位 OFDM 信号解调

$$x_{ap} = n^{-1} [nx(n) \quad (n-1)x(n+1) + x(1) \quad \dots \quad x(2n-1) + (n-1)x(n-1)]^T$$

全相位 OFDM 信号是 OFDM 信号的重复,使频谱利用率降低了近一半,但是 OFDM 在实际应用中为了克服频偏影响,插入大量的导频信号和保护间隔,占用了大量的带宽,也造成了频带的严重浪费.全相位 OFDM 重复了信号,但每个子载波能携带更多信息,节省了频带.

待发送的全相位 OFDM 信号 $D(t)$ 为

$$D(t) = \text{Re} \left(\sum_{n=0}^{2N-1} X(n) \cdot e^{j\omega_n t} \right) = \cos 2\pi f_c t \cdot \text{Re} \left(\sum_{n=0}^{2N-1} X(n) \cdot e^{j2\pi n t/T} \right) - \sin 2\pi f_c t \cdot \text{Im} \left(\sum_{n=0}^{2N-1} X(n) \cdot e^{j2\pi n t/T} \right)$$

其中 $t \in [0, T]$.

接收端对接收到的信号进行如下解调:

$$X_{ap}(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} X_i(n) \cdot e^{j\frac{2\pi ni}{N}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{n=0}^{n-1} x(N-i+n) e^{-j\frac{2\pi i n}{N}} e^{j\frac{2\pi ni}{N}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{n=0}^{n-1} e^{2\pi \frac{f_0}{f_s} (N-i+n)} e^{-j\frac{2\pi i n}{N}} e^{j\frac{2\pi ni}{N}} = \frac{1}{n} e^{2\pi \frac{f_0}{f_s} N} \sum_{i=0}^{n-1} e^{-j2\pi \left(\frac{f_0}{f_s} - \frac{n}{N} \right) i} \sum_{i=0}^{n-1} e^{j2\pi \left(\frac{f_0}{f_s} - \frac{n}{N} \right) i}$$

3 仿真结果

仿真 1. 用计算机生成如下单载波信号, $N = 256$, 频率为 30 Hz, 相位为 30° , 图 7 为采用 FFT

2.2 全相位 OFDM 系统调制解调算法

在发送端,全相位 OFDM 需要把 N 个数据进行重复,而生成 $(2N-1)$ 个数据,将整个信道分成 $(2N-1)$ 个子信道.把这些子信道码元分别调制到 $(2N-1)$ 个子载波频率 $f_0, f_1, \dots, f_{2N-1}$ 上,相邻频率相差 $1/(2N-1)$. 对于任意一点 $x(N)$,其 N 维向量为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0 = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-N+1)]^T, \\ \mathbf{x}_1 = [x(n+1) \quad x(n) \quad \dots \quad x(n-N+2)]^T, \\ \dots \\ \mathbf{x}_{N-1} = [x(n+N-1) \quad x(n+N-2) \quad \dots \quad x(n)]^T. \end{cases}$$

把每个向量循环并移位,把样本点 $x(N)$ 移到首位,会得到另外的 N 个 N 维向量:

$$\begin{cases} \mathbf{x}'_0 = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-N+1)]^T, \\ \mathbf{x}'_1 = [x(n+1) \quad x(n) \quad \dots \quad x(n-N+2)]^T, \\ \dots \\ \mathbf{x}'_{N-1} = [x(n+N-1) \quad x(n+N-2) \quad \dots \quad x(n)]^T. \end{cases}$$

以 $x(N)$ 为基准相加得到全相位数据向量:

处理后的频谱图,图 8 为采用全相位 FFT 处理后的频谱图.

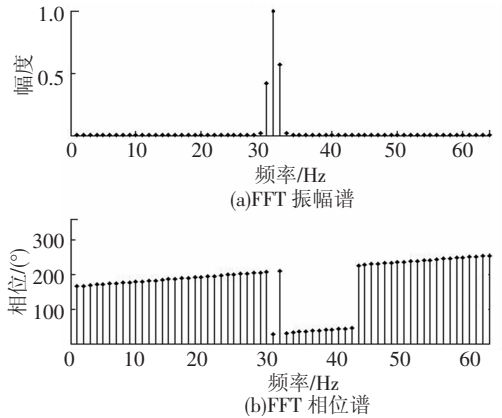


图 7 应用 FFT 技术后的频谱

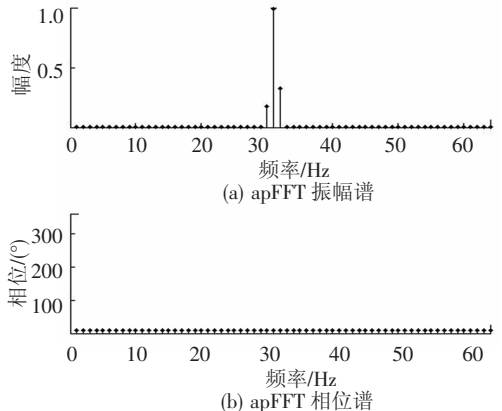
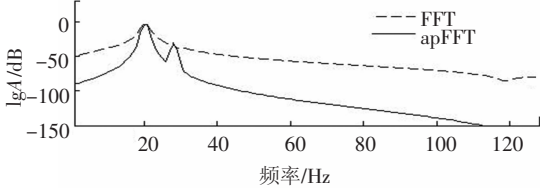


图 8 应用全相位 FFT 技术后的频谱

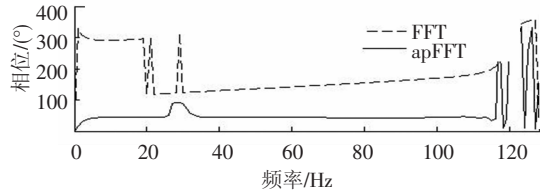
用全相位 FFT 技术处理后的检测结果误差很小,信号的频谱泄露非常少,而且相位几乎没有

出现误差. 当多个单指数频率信号复用时, 频谱之间的干扰必然大为减轻, 所以将全相位 FFT 用于 OFDM 是有效的.

仿真 2. 用计算机生成 1 个多载波信号, 频率分别为 20 Hz 和 30 Hz, 相位分别为 45° 和 90°. 图 9 为经 FFT 和全相位 FFT 处理后的频谱对比图.



(a) FFT 和 apFFT 处理多载波幅度谱对比



(b) FFT 和 apFFT 处理多载波相位谱对比

图 9 FFT 和全相位 FFT 处理多载波频谱对比

图中 A 表示幅度. 当 OFDM 出现频偏后, 在频率间隔的整数倍点上, 全相位 FFT 谱上的样点要比 FFT 谱小, 也就是说, 各路子载波间的泄露少, 即子载波间干扰少, 全相位 OFDM 的误码率必然要比传统 OFDM 系统低得多.

仿真 3. 图 10 和图 11 显示了 N 为 64, 频偏为 1.003 时 OFDM 和全相位 OFDM 的 64-QAM 频偏星座图.

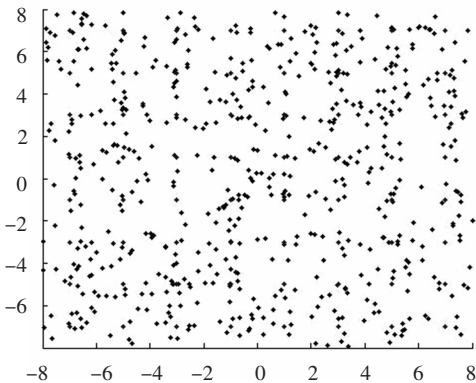


图 10 存在频偏时 OFDM 恢复的星座

在同等频偏条件下, OFDM 产生了很多误码, 而全相位 FFT 的输出明显减弱了频偏的影响, 星座集中度较高. 可见, 全相位 FFT 解调性能比 FFT 的解调性能要好, 全相位 FFT 技术可以有效的纠正由载波偏移而引起星座点幅值和相角的偏差, 达到了降低系统误码率的目的. 图 10 中, OFDM 的频偏使星座图都出界了, 即发生了误码, 而在图 11 中, 全相位 OFDM 系统的 64-QAM 星座仍无误

码, 全相位 OFDM 重复占了频带, 但每个子载波携带更多信息的同时节省了频带.

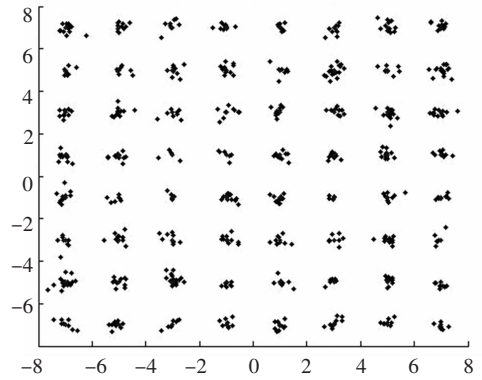


图 11 存在频偏时全相位 OFDM 恢复的星座

4 结 论

- 1) 当单指数频率信号发生频偏时, 全相位 FFT 的频谱泄露非常的少, 相位误差几乎为零;
- 2) 当 OFDM 发生频偏时, 全相位 FFT 的谱泄露程度要比 FFT 低, 所以基于全相位 FFT 的数字解调能力比基于 FFT 的更强;
- 3) 当发生同等频偏时, 全相位 FFT 拥有更优良的抑制谱泄漏性能, 明显减弱了频偏对系统的影响, 引起的子载波间干扰要少的多, 有效的降低了系统的误码率;
- 4) 全相位 FFT 的抗频偏能力更强, 比 FFT 更适合应用于 OFDM 系统;
- 5) 全相位 OFDM 重复了 OFDM 的信号, 使频谱利用率下降, 但是全相位 OFDM 信号携带更多信息, 以重复占据的方式节省了频带.

参考文献:

[1] BARACCA P, TOMASIN S, VANGELISTA L, *et al.* Per sub-block equalization of very long OFDM blocks in mobile communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(2):363-368.

[2] SUH S, BASU A, SCHLOTTMANN C, *et al.* Low-power discrete Fourier transform for OFDM: a programmable analog approach[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011, 58(2):290-298.

[3] EGHBAKHAH B, BORNOOSH B, AMINI-SHESHDEH Z, *et al.* A new preamble-less timing synchronization method for OFDM systems under multi-path channels[C]//In proceeding of Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era. Hammamet, Tunisia:[s. n.], 2007:196-199.