

利用 CAZAC 序列的 OFDM 频率同步方法

严春林 李少谦 唐友喜 罗 霄 房家奕
(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘 要 频率偏移估计是 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)的关键技术。该文提出了在一个 OFDM 符号内利用两个重复的 CAZAC (Constant Amplitude Zero Auto Correlation)序列进行频率偏移估计的新方法,估计范围可达整个 OFDM 带宽。用于同步的训练序列还可用于信道估计和均衡,这将提高系统的数据传输效率。此算法同步精度达到了 Schmidl 提出的 Cramer-Rao bound,有效性在 AWGN 和 Rayleigh 多径信道下得到了验证。

关键词 OFDM, 频率同步, CAZAC 序列, 多径衰落信道

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2006)01-0139-04

New Frequency Offset Estimation Methods for OFDM Systems by Using CAZAC Sequence

Yan Chun-lin Li Shao-qian Tang You-xi Luo Xiao Fang Jia-yi

(National Key Lab. of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Frequency offset estimation is the critical part in Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) systems. In this paper a new method for frequency offset estimation is proposed where the training sequence is composed of two Constant Amplitude Zero Auto Correlation (CAZAC) sequences in one OFDM symbol and the frequency offset up to OFDM bandwidth can be detected. The training sequence also can be used for channel estimation and equalization. This will enhance the efficiency of data transmission. Cramer-Rao bound can be reached in the estimation. The valid of the algorithm is verified in AWGN channel and Rayleigh channel.

Key words Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Frequency synchronization, CAZAC sequences, Multi-path fading channel

1 引言

现代移动通信追求更快的传输速率、更好的传输质量、更高的频谱效率、更大的系统容量。在移动、多径、衰落环境下实现上述目标, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)有很大的技术优势^[1]。OFDM由于采用并行多载波传输,其数据传输速率可以很大;子载波间频谱重叠,故频谱效率高;由于将数据进行并行传输,等价于将数据符号大大展宽,故能有效抗多径。OFDM已应用于固定和移动数字传输,如DAB(Digital Audio Broadcast)^[2], DVB(Digital Video Broadcast)^[3], Hiperlan/2^[4]。

但OFDM也存在某些缺点,解决这些缺点是OFDM能应用的关键。OFDM的缺点之一是对频率偏移非常敏感^[5]。存在偏移时OFDM各子载波间正交性被破坏,引发同信道干扰,系统性能急剧恶化^[5]。若将频率偏移以子载波间隔为单

位分为整数和小数(小数部分绝对值<0.5)部分,则整数个子载波的频率偏移不会导致子载波间干扰,仅使输出子载波循环移位;小数部分频率偏移导致OFDM子载波间干扰^[6]。一般来说,在AWGN信道频率偏移误差要小于OFDM子载波间隔4%^[5];在多径环境频率偏移误差要小于OFDM子载波间隔2%^[7]。整数个子载波的频率偏移估计常常称为频率粗同步,小数个子载波的频率偏移估计称为频率精同步。

OFDM的同步方法有: van de Beek提出的利用循环前缀的频率同步方法^[7],此方法不会降低系统传输效率,但频率偏移估计最大值不大于0.5个子载波。文献[8]中分析了利用循环前缀的频率同步方法的估计精度。Moose提出的利用重复符号的频率同步方法^[5],优点是频率偏移估计精度高,但也有频率偏移估计最大值不大于0.5个子载波的缺点。若缩短重复符号的时间周期,频率估计范围会增大,但估计精度又会降低。Schmidl提出利用训练序列的时间频率同步方法^[6],这种方法频率偏移估计精度高,能实现频率粗同步和精同步,缺点是时间同步准确性不是很高。Tufvesson提出的利用PN序列的时间频率同步方法^[9],其优点是时间同步目标函数尖锐,时间同步精确;频率偏移估计范围大,能同时实

2004-06-14 收到, 2005-07-06 改回
国家自然科学基金重大项目(60390540-3), 国家自然科学基金项目(60272009), 国家“863”计划(2001AA1230131)和教育部博士点基金(20020614001)资助课题

现频率粗同步和精同步。Lambretteh和Meyr (L&M)提出利用多个重复CAZAC序列在时域进行频率同步的方法,其频率偏移估计范围超过 0.5 个子载波间隔^[10]。Chen Biao和Tureli提出的利用虚子载波的MUSIC^[11]或ESPRIT^[13]的频率同步方法,其估计范围没有不超过半个子载波间隔的限制。Moreli和Mengali(M&M)提出的利用 L 个重复序列的BLUE(Best Linear Unbiased Estimation)算法,其估计范围为 $L/2$ 个子载波间隔^[14],相同条件下其估计比Schmidl方法精确,但复杂度大大提高。Minn改进了M&M方法,Min的方法在不改变用于同步训练序列结构和估计范围前提下有更高的估计精度^[15]。

本文提出了一种利用CAZAC序列的OFDM频率同步方法。Frank序列和Chu序列都是CAZAC序列^[16]。CAZAC序列具有相关峰尖锐,旁瓣为零的特点。CAZAC的FFT变换还是一个CAZAC序列^[17],巧妙地利用这一性质可以获得性能很好的频率偏移估计算法,频率偏移估计范围可以达 N 个子载波间隔,其中 N 为FFT的点数。此方法的估计精度可达到Schmidl提出的Cramer Rao bound,它与利用重复CAZAC作同步训练序列的L&M方法不同,最大的不同在于本文频率粗同步是在频域完成,利用了CAZAC序列的FFT还是一个CAZAC序列和CAZAC序列极好自相关特性。而L&M方法是在时域完成,没有利用上述性质,其频率偏移估计范围远远小于 N 个子载波间隔;粗同步的估计精度也没有本文方法好。同时,本文提出的同步方法中用于同步CAZAC序列相关函数是一个冲击函数,其傅里叶变换的幅度极为平坦,这非常适合于作信道估计和均衡^[17]。

2 系统模型

假设 N 为OFDM所作FFT点数, N_u 为使用的子载波的个数。 X_k 为传输的调制符号,则作IFFT后的输出为

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N_u-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

加入循环前缀后,一个OFDM符号可表示为 $\{x_{N-N_g}, \dots, x_{N-1}, x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$, 前 N_g 个点为循环前缀,是OFDM符号最后 N_g 个点的复制,用于消除符号间干扰。

引起频率偏移的主要因素是移动台移动引起的多普勒频移和晶体振荡器的不稳定。在AWGN信道,当存在频率偏移时,接收端第 k 个抽样时刻信号可表示为

$$r(k) = s(k) \exp\left(\frac{j2\pi \varepsilon k}{N}\right) + n(k) \quad (2)$$

上式中, ε 表示频率偏移被子载波间隔归一化后值, $r(k)$ 为接收信号的第 k 个时刻的抽样值, $s(k)$ 为发射信号第 k 个时刻的抽样值, $n(k)$ 为信道中的加性高斯白噪声在第 k 个时刻的抽样值。对OFDM系统,当频率偏移为零时,各个子载波间正交;当存在频率偏移时,子载波间存在干扰,系统性能会急剧下降。在AWGN信道,信噪比为SNR,频率偏移为 ε 时,有效信噪比SNR_e的下界是^[5]:

$$\text{SNR}_e(\varepsilon) \geq \frac{\text{SNR}}{1 + 0.5947 \text{SNR} \sin^2(\pi \varepsilon)} \cdot \left(\frac{\sin(\pi \varepsilon)}{\pi \varepsilon}\right)^2 \quad (3)$$

对OFDM系统而言,在AWGN信道要求频率偏移值不大于子载波间隔的 4%^[5];对于衰落信道要求频率偏移值不大于子载波间隔的 2~3%^[7]。

3 OFDM的频率同步算法

此处我们提出一种OFDM频率同步新算法,它有频率偏移估计范围大和精度高的优点。此方法利用CAZAC序列作为训练序列。周期为 N_1 的CAZAC序列 $c(k)$ 的自相关特性是

$$\sum_{k=0}^{N_1-1} c(k) c^*(k + \tau)_{\text{mod } N_1} = \begin{cases} N_1, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

上式中mod表示取模,CAZAC序列的循环自相关满足旁瓣为0的特性。由文献[16]知CAZAC序列可取为

$$c(k) = \exp\left(\frac{j\pi r k^2}{N_1}\right) \quad (5)$$

上式中, j 为虚数的单位, $j^2 = -1$, r 为正整数, r 与 N_1 互质。若 $N = 2N_1$, $r = 1$, 存在频率偏移时接收信号为

$$\begin{aligned} y(k) &= c(k) \exp\left(\frac{j2\pi k \varepsilon}{N}\right) + n(k) \\ &= \exp\left(\frac{j(2\pi k^2 + 2\pi k \varepsilon)}{N}\right) + n(k) \\ &= \exp\left(\frac{-j\pi \varepsilon^2}{2N}\right) \cdot \exp\left(\frac{j2\pi(k + \varepsilon/2)^2}{N}\right) + n(k) \end{aligned} \quad (6)$$

对生成式为式(5)的CAZAC序列而言,存在频率偏移时可能导致其在时域循环移位。上式中,当 ε 为偶数时,忽略噪声和固定相位的影响,接收信号相对于原始CAZAC序列循环移位了 $\varepsilon/2$ 个点,这对时间同步不利。当 r 取值较大时频率偏移较大才会导致CAZAC序列循环移位。当 r 取尽可能的大,有

$$c(k) = \exp\left(\frac{j\pi(N_1-1)k^2}{N_1}\right) \quad (7)$$

此时,频率偏移大于 $2(N_1-1)$ 个子载波间隔才会对时间同步产生影响。

本文采用的CAZAC序列周期为 $N/2$, 两个相同的CAZAC序列构成长为 N 的训练序列用于时间和频率同步,此处仅讨论频率同步。长为 N 的训练序列在时域表示为 $\{x_n\}$, $x_{n+N/2} = x_n$, $n=0,1,\dots,N/2-1$ 。将训练序列作FFT后得到序列 $\{S_k\}$, $k=0,1,\dots,N-1$ 。由FFT的性质和CAZAC序列的FFT变换还是一个CAZAC序列的特点可知,序列 $\{S_k\}$ 的奇数抽样点为0,而 $\{S_{2n}\}$, $n=0,1,\dots,N/2-1$, 为长为 $N/2$ 的CAZAC序列 a 。假设理想时间同步,则小数部分频率偏移估计(频率精同步)为

$$\hat{\varepsilon}_f = -\frac{\arg\left(\sum_{n=0}^{N/2-1} y(n)y^*(n+N/2)\right)}{\pi} \quad (8)$$

将估计出的频率偏移补偿后可进行频率粗同步估计。由于此时只剩余整数个子载波间隔的频率偏移,而整数个频率偏移导致FFT输出循环移位。利用CAZAC序列 a 优异自相关特性实现频率粗同步,估计范围达 N 个子载波间隔,远远高于普通的频率同步方法。整数部分频率偏移估计(频率粗同步)是找到使下式取得最大值的 $\hat{g}$,

$$F(g) = \frac{\left| \sum_{k \in \kappa} Y_{2k} S_{2k+2g}^* \right|^2}{\left(\sum_{k \in \kappa} |Y_{2k}|^2 \right)^2} \quad (9)$$

上式中 Y_{2k} 表示训练序列FFT变换在第 $2k$ 个子载波上的值。 $\kappa \in \{0, 1, 2, \dots, N/2-1\}$ 。此频率同步算法与Schmidl方法和Schmidl的改进方法——Yun Hee Kim提出的频率同步方法^[21]很类似,但两者有根本的不同。Schmidl的方法利用了两个OFDM符号相同的偶数子载波上差分PN序列编码构成训练序列结构,Yun Hee Kim的算法是在一个OFDM符号相邻的偶数子载波上差分PN序列编码来实现训练序列结构,而本文不需差分编码且只需一个OFDM符号作训练序列。Schmidl和Yun Hee Kim的方法时间同步是通过将接收信号延迟相关来实现的,其时间同步目标函数没有利用CAZAC序列与本地CAZAC序列相关所得时间同步目标函数尖锐。利用CAZAC序列时间同步将在另外的工作中进行研究和分析。与L&M方法也不同,本文的方法是在频域完成频率粗同步而L&M方法是在时域完成的,L&M方法频率偏移估计范围与CAZAC序列周期成反比,而本文方法没有此限制且估计范围远大于L&M方法。文中所提方法巧妙利用了FFT的性质和CAZAC的性质来构成训练序列,不但可以利用时域的CAZAC序列进行时间同步,还可利用频域的CAZAC序列进行频率粗同步。在大信噪比下本文方法估计方差为

$$\text{Var}(\hat{\varepsilon}) = \frac{2}{\pi^2 \cdot N \cdot \text{SNR}} \quad (10)$$

式中SNR为信噪比,上式满足文献[6]中的Cramer-Rao bound。由CAZAC序列组成的训练序列具有恒模特性,非常适合于信道估计和均衡。将同步的训练序列用于信道估计能提高系统的数据传输效率,这是这种同步方法的又一个优点。

4 数值与仿真结果

以下通过仿真验证这种方法在AWGN信道和Rayleigh衰落信道下性能。仿真参数为:仿真环境为BEYOND 3G系统,载频 $f_c=3.2\text{ GHz}$, $N=1024$,每一个子载波为 20 kHz ,1024个抽样点对应 $50\text{ }\mu\text{s}$ 。取2个周期为512的CAZAC序列构成训练序列,CAZAC序列 $c(k)=e^{j\pi 511k^2/512}$, $k=0,1,\dots,511$ 。Rayleigh信道取ITU-M.1225 Vehicle Channel B^[22]信道,其信

道特征见表1,表中将各径时延与抽样间隔归一化时作了近似处理。AWGN信道和Rayleigh多径信道频率偏移都取 $\varepsilon=57.7$ 。估计时先作频率精同步,补偿后再作频率粗同步。

图1为AWGN信道下性能曲线,频率偏移为57.7,图中理论估计值按照公式(10)计算。图中估计方差随着信噪比的增加线性下降,仿真与理论分析结果较为吻合,特别是在信噪比稍大时,这是因为在对估计精度进行理论分析时有些假设在信噪比较大时才成立。

表1 ITU-M.1225 Vehicle Channel B 信道特性

相对时延 (ns)	对应抽样点数	平均功率 (dB)	多普勒谱
0	0	-2.5	Classic
300	6	0	Classic
8,900	180	-12.8	Classic
12,900	260	-10.0	Classic
17,100	340	-25.2	Classic
20,000	400	-16.0	Classic

图2为ITU-R M.1225 Vehicle Channel B信道,移动速度为 5 km/h 和 60 km/h ,频率偏移为57.7时的估计性能。由图可见移动速度较小由于信道变换较慢,估计方差近似随信噪比增加而线性下降,没有地板效应(error floor)。而当移动速度较快时,受时变信道影响相同信噪比下估计方差都较低速时差,且随信噪比增加估计方差下降缓慢,当信噪比大于一定程度时估计方差不再下降。本文所提方法的优点在于频率粗同步是在频域完成的且利用了CAZAC序列优异的自相关特性,其估计精度在多径衰落信道低信噪比下也有较好的性能。普通的频率同步方法在频率偏移较大,多径衰落信道和低信噪比时由于频率粗同步不准确估计性能较差,一般在信噪比较大(大于8dB或11dB)才会有较好的估计性能,而本文所提方法在信噪比较低(5dB)都有较好的性能。

AWGN信道和多径衰落信道下本文方法在频率偏移高达57.7仍能进行精确的频率同步,这得益于它是在频域进行频率偏移估计且利用了CAZAC序列的极好的自相关特性。若在时域进行频率粗同步而频率偏移又如此的大,很难达到如此好的性能,特别在低信噪比和多径衰落信道下。这是本文所提算法优于其它算法的最重要特征。

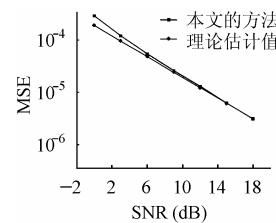


图1 AWGN信道下估计性能 (频率偏移为57.7)

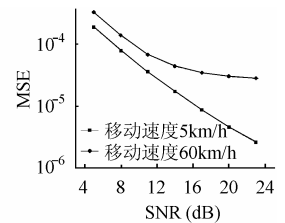


图2 ITU-R M.1225 Vehicle Channel B信道下估计性能, 移动速度为 5 km/h 和 60 km/h , 频率偏移为57.7

5 结束语

本文提出了一种利用 CAZAC 序列的 OFDM 频率同步的新算法。它有频率偏移估计范围极大——频率偏移估计范围可达 OFDM 带宽,估计精度高——可以达到 Schmidl 提出的 CRB 界的优点。AWGN 信道下的仿真验证了所做分析,多径衰落信道下此方法也有很好的性能,特别在大频偏和低信噪比下此方法较普通同步方法更有优势。同时由 CAZAC 序列组成的训练序列还可用于信道估计和均衡,这使这种同步方法具有潜在的提高数据传输效率的能力。

参 考 文 献

- [1] Bingham J A C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come [J]. *IEEE Commun Mag*, 1990, 28(5): 5 – 14.
- [2] ETS 300 401 Second Edition, Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers [S]. 1997.
- [3] Reimers U. DVB-T: the COFDM-based system for terrestrial television [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1997, 9(1): 28 – 32.
- [4] Khun-Jush J, Schramm P, Wachsmann U, Wenger F. Structure and performance of the HIPERLAN/2 physical layer [c]. in Proc. IEEE 49th Vehicular Technology Conf., vol.5, 1999: 2667 – 2671.
- [5] Moose P H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, 42(10): 2908 – 2914.
- [6] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, 45(12): 1613 – 1621.
- [7] Van de Beek J J, Sandell M, Brjesson P O, ML estimation of timing and frequency offset in OFDM systems [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45(7): 1800 – 1805.
- [8] 严春林, 李少谦, 唐友喜, 房家奕, 罗霄. 利用重复序列和循环前缀的 OFDM 频率同步新方法. *电波科学学报*, 2005, 20(6): 1233 – 1237.
- [9] Tufvesson F, Faulkner M, Edfors O. Time and frequency synchronization for OFDM using PN-sequence preambles [C], Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Amsterdam, The Netherlands, September 19 – 22, 1999: 2203 – 2207.
- [10] Lambrette U, Speth M, Meyr H. OFDM burst frequency synchronization by single carrier training data. *IEEE Communications Letters*, 1997, 1(2): 46 – 48.
- [11] Chen Biao. Maximum likelihood estimation of OFDM carrier frequency offset [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(4): 123 – 126.
- [12] Tureli U, Kivanc D, Liu H. Experimental and analytical studies on a high resolution OFDM carrier frequency estimator [C]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2001, 50(2): 629 – 643.
- [13] Tureli U, Liu H, Zoltowski M D. OFDM blind carrier estimation: ESPRIT [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48(9): 1459 – 1461.
- [14] Morelli M, Mengali U. An improved frequency offset estimator for OFDM applications. *IEEE Communications Letters*, 1999, 3(3): 75 – 77.
- [15] Minn H, Tarasak P, Bhargava V K. OFDM frequency offset estimation based on BLUE principle, Vehicular Technology Conference, VTC -Fall. 24-28 Sept, 2002, Vol: 2 : 1230 – 1234.
- [16] Bomer L, Antweiler M. Perfect N-phase sequences and arrays. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1992, 10(4): 782 – 789.
- [17] IEEE C802.16e-04/265r1. Preamble Sequence For Fast Cell Search, Low Computational Complexity, and Low PAPR. August, 2004.
- [18] Tellambura, C, Parker M G, Guo Y J, Shepherd S J, Barton S K. Optimal sequences for channel estimation using discrete Fourier transform techniques. *IEEE Trans. on Communications*, 1999, 47(2): 230 – 238.
- [19] Ng J C L, Letaief K B, Murch K D. Multi-phase optimal sequences for fast initialization of channel estimation and equalization. IEEE International Conference on Communications, 1997, 3: 1484 – 1487.
- [20] Rohrs U H, Linde L P. Some unique properties and applications of perfect squares minimum phase CAZAC sequences. Proceedings of the South African Symposium on Communications and Signal Processing, South African, 1992: 155 – 160.
- [21] Kim Yun Hee, Song Ickho, Yoon Seokho, Park So Ryoung. An efficient frequency offset estimator for OFDM systems and its performance characteristics. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2001, 50(5): 1307 – 1312.
- [22] Recommendation ITU-R M.1225, Guideline for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000, 1997.

严春林: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为扩频通信序列设计、OFDM 同步和 MIMO 同步。

李少谦: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 通信抗干扰技术国家级重点实验室主任, 电子科大通信学院副院长, 国家 863 计划通信主题专家组成员, 国家新一代移动通信总体组成员, 国家教育部科技委信息部委员, 四川省科技顾问团顾问等职。研究方向: 无线与移动通信、个人通信、抗干扰通信、扩跳频通信、通信专用集成电路设计等。

唐友喜: 男, 1964 年生, 教授, 目前研究方向为 OFDM、扩频通信、超三代移动通信。

罗 霄: 男, 1979 年生, 硕士, 研究方向为 OFDM 同步技术研究。

房家奕: 男, 1979 年生, 硕士, 研究方向为 OFDM 同步技术及无线资源管理。