

DFT-SOFDM 系统中一种新的跳频方法

路淼 王亚峰 杨大成
(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘要: 该文提出一种传输时间间隔(TTI, Transform Time Interval)内与传输时间间隔间联合跳频新方法, 以解决 EUTRA(Evolved UMTS Terrestrial Radio Access)上行链路多颗粒度用户及混合重传情况下跳频的问题。该方法根据用户的带宽需求与拉丁方计算得出跳频序列, 控制子载波映射时各用户的子载波分配。这个方法适合任意传输带宽需求, 既能保持系统单载波传输特性, 又能避免数据包之间发生碰撞。仿真结果证明了其有效性。该方法在 EUTRA 上行链路中具有很好的应用前景。

关键词: 傅里叶扩频正交频分复用(DFT-SOFDM); 集中式频分多址(LFDMA); 跳频技术; 拉丁方

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2203-04

A New Frequency Hopping Method for DFT-SOFDM Systems

Lu Miao Wang Ya-feng Yang Da-cheng

(School of Telecom Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper presents a new method of intra/inter-TTI frequency hopping in E-UTRA uplink. The hopping method decides the starting frequency according to Latin square and users' frequency resource requirements. The method that can keep single carrier transmission and avoid collision at the same time is suitable for various transmission bandwidths. The conclusion is verified by computer simulation. This method will be used in E-UTRA uplink with a good prospect of application.

Key words: Discrete Fourier Transform -Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing (DFT-SOFDM); Localized Frequency Division Multiplexing Access (LFDMA); Frequency hopping; Latin square

1 引言

在3GPP LTE中, OFDM技术及其演进技术理所当然的成为物理层(L1)的重要研究方向。在上行链路多址技术的众多提案(包括SC-FDMA、OFDMA、MC-WCDMA和MC-TD-SCDMA)中单载波传输方案SC-FDMA具有较低的峰均功率比值(PAPR), 因此能够提高功率的有效性并增大覆盖范围。被大多数公司推荐的单载波传输方案DFT-SOFDM中使用了循环前缀(Cyclic Prefix, CP), 可以保证上行链路中用户之间的正交性, 也能保证接收端频域均衡的有效性, 并且可以与下行的OFDM方案共用大部分参数, 如时钟频率等。所以DFT-SOFDM更具有实用性, 已成为目前LTE上行传输的基本候选方案^[1]。

DFT-SOFDM 系统主要是基于之前盛行的OFDM系统改进而成的, 即各个用户编码调制后的数据符号先经过一个较小点数(与分配的子载波数目相同)的DFT变换, 然后将变换后的数据映射到分配的子载波上传输。由于DFT-SOFDM将每个数据符号扩频到所有分配的子载波上传输, 使得其传输信号具有单载波信号的特性。因此, 与OFDM 系统相比, 该系统可明显降低传输信号峰均比。在DFT-

SOFDM系统中, 基于子载波映射方式的数据传输方案有两种: 分布式频分多址(DFDMA)和集中式频分多址(LFDMA)。基于分布式子载波分配的方案由于存在对频率差错有较高的敏感度, 对上行功率控制要求较高, 信道估计性能较差等诸多问题, 目前已经被LTE的研究放弃, 但分布式子载波所固有频率分集的好处, 仍然可以被基于集中式子载波分配的方案以跳频的方式获得。因此大多数公司推荐使用跳频技术(Frequency Hopping)的LFDMA——FH传输方案。这种方案既可以保证良好的信道估计性能, 还可以获得频率分集增益, 并且可以获得干扰分集增益^[2-5]。

目前 3GPP LTE 的研究中, 仍没有一种明确的、完备的跳频方案提出来。尤其是当上行用户发射所占带宽的颗粒度需求不同时, 跳频会造成多颗粒度用户占用不连续的子载波, 这会使系统的 PAPR 增大, 从而违反了单载波系统的设计初衷。所谓的上行用户占用带宽的颗粒度不同, 是指由于多个上行用户资源需求的多样性, 所需占据的带宽不同, 从而造成了一个移动网络系统需解决多种用户带宽需求的跳频方式。本文由解决多颗粒度用户跳频发射时必须占用连续子载波的目的出发, 提出一种根据预定义的跳频图样作为上行多用户跳频的方法。每个用户根据自己的带宽需求占用连续的频谱, 既能保持单载波特性, 又能取得理想的频率分集

增益。

2 系统模型

LFDMA-FH传输方案原理框图如图1所示。其中左半部分为LFDMA-FH发射机系统的实施方案。跳频DFT-SOFDM调制模块对信号进行DFT-SOFDM调制,并加CP,以避免符号间串扰,然后送成帧模块进行成帧^[1]。

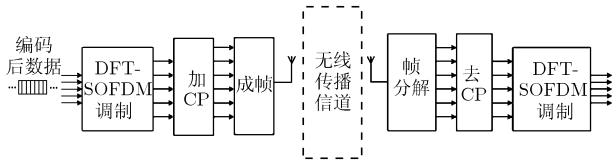


图1 LFDMA-FH 传输方案的总体框图

跳频DFT-SOFDM调制器的内部结构及处理方法如图2所示。跳频DFT-SOFDM调制器包括 M 点DFT变换器、子载波映射器、 N 点IDFT变换器或IFFT变换器、跳频图样产生器。首先对每个移动用户 u , ($u = 0, 1, \dots, U-1$)编码后数据流进行串并转换,得到并行数据符号 $\bar{s}^{(u)} = \{s^{(u)}(m), m = 0, 1, \dots, M-1\}$,对其作 M 点DFT变换,可得频域序列

$$\bar{S}^{(u)}(i) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} s^{(u)}(m) e^{-\frac{2\pi j}{M} im}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

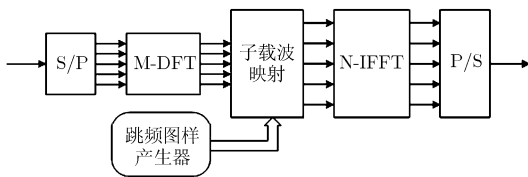


图2 DFT-SOFDM 调制器内部装置框图

然后完成频域信号 M 点子载波到 N 点子载波的映射,可以得到 N 点频域信号

$$\bar{X}^{(u)}(k) = \begin{cases} \bar{S}^{(u)}(i), & k \in \{k_0, k_1, \dots, k_i, \dots, k_{M-1}\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $k = 0, 1, \dots, N-1$, 为所有传输子载波序号; $\{k_i\}$, $i = 0, 1, \dots, M-1$, 为子载波映射序号。

为了使DFT-SOFDM具有单载波的PAPR,一般采用分布式频多址(DFDMA)和集中式频多址(LFDMA)。分布式子载波映射是指用户的信息等间隔的映射在整个带宽上,不同的用户采用不同的频偏,这时分配给用户 u 的子载波为 $k_i = u + i \times U$ 。这种方案的好处是可以获得较大的频率分集,但却存在对频率差错有较高的敏感度,对上行功率控制要求较高,信道估计性能较差等诸多问题。集中式子载波映射是指用户的信息映射到某一块连续的子载波上。数据集中映射到连续的若干个子载波上,即只占用整个频域信道的部分带宽,这种方式虽然没有分布式那样具有较大频率分集的

增益,但是由于它占用的带宽窄,信道的频域相应变化要相对小一些,便于和频域调度结合,能够达到较好的性能。

因此本文考虑采用集中式映射方法,而分布式子载波所固有频率分集的好处,仍然可以被基于集中式子载波分配的方案以跳频的方式获得。即同一用户数据占用连续的子载波,并且占用的子载波频率随时间跳变,在不同时隙(slot)、子帧(sub-frame)或TTI间占用不同子载波组。跳频图样产生器根据所采用的跳频图样与各用户带宽需求计算跳频序列,输出起始子载波位置到子载波映射器,控制子载波映射时各用户的子载波分配,这时用户 u 占用的子载波可以表示为

$$k_i = f(u, j) + i \quad (3)$$

其中 $f(u, j)$ 表示用户 u 在 j 时刻的起始发射频点,由所采用的跳频图样决定,具体计算过程将在下一节介绍。

然后采用IDFT或IFFT变换对频域信号作频域-时域的转换,将频域信号转换为时域信号。

$$x^{(u)}(v) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{X}^{(u)}(k) e^{j2\pi vk/N}, \quad v = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

接收机系统的实施方案如图1右半部分所示。接收机系统包括:帧分解模块、去CP、跳频DFT-SOFDM解调模块等。先对接收到的时域信号进行帧分解操作,然后去除CP循环前缀,送跳频DFT-SOFDM解调模块进行解调。

跳频DFT-SOFDM解调器的内部结构及处理方法如图3所示,跳频DFT-SOFDM解调器包括 N 点DFT变换器或FFT变换器、子载波逆映射器、 M 点IDFT变换器、跳频图样产生器。先通过 N 点的DFT变换将时域信号转换为频域信号。接收信号 $Y^{(m)}(k)$ 可以表示为

$$Y^{(m)}(k) = H_{k_i}^{(m)} X^{(m)}(k) + N^{(m)}(k_i) \quad (5)$$

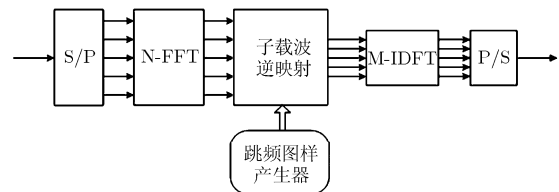


图3 DFT-SOFDM解调器内部装置框图

然后再经过 N 点子载波到 M 点的子载波逆映射,采用跳频的集中式逆映射方法。跳频图样产生器根据所采用的跳频图样与各用户带宽需求计算跳频序列,输出起始子载波位置到子载波映射器,控制子载波映射时各用户的子载波分配,由 M 点IDFT变换器将逆映射的频域信号转换为时域信号。

3 跳频方案

在EUTRA上行链路进行TTI内和TTI间跳频,还存在若干问题急需解决。其一,不跳频的数据包和跳频的数据包在重传时可能会发生碰撞。其二,不跳频的数据包和TTI内跳频的数据包之间可能会发生碰撞。其三,当上行用户发射所

占带宽的颗粒度需求不同时,跳频会造成多颗粒度用户占用不连续的子载波,这会使系统的PAPR增大,违反了单载波系统的设计初衷。因此,当前急需找到一种通用的跳频图样,能够适用于各种传输带宽同时还能保持单载波传输特性。

目前通用的跳频方案都是在单用户或者多用户单颗粒度传输环境下进行的。在多用户多颗粒度(multi-users, multi-granularity)情况下存在的问题仍没有解决的方案。针对这些问题,若根据预先设计好的跳频图样(例如Latin方, Costas序列等)跳频,则可以始终保持小区内的正交性。另一方面,若令所有用户根据自己的带宽需求,决定占用连续带宽的大小,则可以始终保持占用子载波的连续性,也就不存在PAPR恶化的问题。

为了得到尽可能大地频率分集增益,并最大程度上解决小小区间干扰的缺点,除了要使跳频间隔尽量大之外,还应该让一个用户通过跳频能遍历所有的频点,并且出现在每个频点上的概率相等。如果设计正交的跳频图样,则每个用户出现在不同的频点上的概率是相等的,而且可以完全遍历所有频点。因此按照该准则,采用设计好的跳频图样(如Latin方, Costas序列, RS序列等)可以得到较大的频率分集增益。而且如果在小小区间采用互相正交的跳频图样,可以做到1个周期只发生1次碰撞,这样可以最大限度地随机化邻小区的干扰,因此可以获得最大的干扰分集增益。

基于以上分析,本文提出了一种EUTRA上行链路中跳频的集中式频分多址(LFDMA-FH)的解决方案。具体步骤如下:

步骤1 确定每个用户 u 在跳频图样中的发射编号为 $p = g(u)$ 。其中 $p = 0, \dots, P-1$ 为在跳频图样中的跳频编号,取值由所选Latin方决定;

步骤2 根据步骤1确定的用户 u 在跳频图样内的发射编号 p 和各个用户的带宽需求 $Q(k)$,由 $f(p) = \sum_{l=0}^{p-1} Q(g^{-1}(l))$ 确定用户 u 的起始频点 $f(p)$ 。 P 表示跳频图样的大小, $g(u)$ 为用户与跳频编号间的关系函数,由所采用的跳频图样决定。其流程如图4所示。

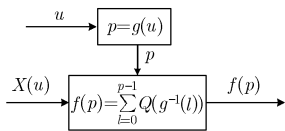


图4 跳频方法流程图

为方便描述此实施方案,本文以基于Latin方的跳频图样为例说明上述跳频图样发生器的起始频点确定方法。拉丁方的设计是根据伽罗华域或仿射有限几何的理论来完成的^[6,7]。给定一个质数 P ,定义一个 $P \times P$ 的矩阵集合 $\mathcal{A} = \{A_\alpha, \alpha = 1, \dots, P-1\}$, A_α 中的元素由下式给出:

$$A_\alpha(p, j) = (\alpha p + j) \bmod P, \quad p, j = 0, \dots, P-1 \quad (6)$$

由于进行了模 P 运算,有限域 $GF(P)$ 中的每个元素在方阵 A_α 的每行中只出现一次。而且方阵 A 的每一行每一列都是有限域 $GF(P)$ 中元素的全排列。考虑任意两个正交拉丁方 $A_\alpha, A_{\alpha'} \in \mathcal{A}$,它们中的任意两个元素 (y, y') 出现在方阵中相同位置 (p, j) 的次数仅有一次。集合 \mathcal{A} 是由 $M-1$ 个相互正交的拉丁方组成的^[8]。

设系统的跳频范围为 N 个RB(无线资源块或子载波),共有 U 个用户,用户 u 的带宽需求为 $Q(u)$, $u = 0, 1, \dots, U-1$,满足 $\sum_{u=0}^{U-1} Q(u) \leq N$,则在时刻 j ,用户 u 占用的频点的起始位置为

$$f(u, j, p) = \sum_{l=0}^{p-1} X[(\alpha l + j) \bmod M] \quad (7)$$

式(7)中, P 为大于等于 U 的一个素数,表示Latin方的阶数,当系统满载时 $U=P$; $\alpha = 1, 2, \dots, P-1$,表示在不同小区内采用不同的Latin方,不同的 α 对应着不同的跳频间隔; p 的取值由所选Latin方决定:

$$p = ((u - j)\alpha^{-1}) \bmod P, \quad p = 0, 1, \dots, P-1 \quad (8)$$

此外,通过在相邻小区设置不同的 α ,可以保证相邻小区之间的跳频图样的正交性,即一个周期内只和相同的用户碰撞一次。其它跳频图样例如基于Costas序列、RS序列等可依此类推。

由于3GPP LTE上行链路同时支持频域调度和跳频两种传输方案,如何实现这两种方案的复用也是需要考虑的问题。从容易实现的角度考虑,可以简单地采用频分方式。频域调度与跳频各自根据需要占用固定的带宽,这样两种方式各自在自己带宽内部执行,互不干扰。更复杂的情况,可以从时分复用的角度出发。即把所有系统资源在时域上划分为跳频时隙与调度时隙。跳频用户与调度用户各自占用不同的时隙进行数据传输。这样各用户可以共享所有频域资源,与频分复用相比这种方式可以大大提高调度和跳频取得的分集增益。

4 仿真结果与分析

针对本文提出的跳频方案进行了仿真,跳频模式采用基于Latin方的多颗粒度跳频方案,仿真参数如表1所示。主要考察上行多用户的DFT-SOFDM通信系统中本方案在TTI内和TTI间跳频时,在单颗粒度、多颗粒度、混合重传等情况下的性能。在仿真结果中,使用误块率(BLER)和信噪比(SNR)衡量系统性能。

图5给出了在TU信道3kmph环境下,系统采用本文提出的跳频方案时的误块率仿真曲线。图6给出了在TU信道120kmph环境下的跳频仿真曲线。从图中可以看出,采用本文提出的跳频模式时,在低速信道和高速信道的情况下,本跳频方案都可以带来显著的频率分集增益。并且多颗粒度情况下跳频产生的频率分集增益与单颗粒度时大体相同,说明本方案在多颗粒度情况下可以完全避开不同用户间数据包

表1 仿真参数

带宽	5 MHz(2.0 GHz)
采样速率	7.68Mcps
信道模型	TU3kmph 与 120kmph
信道编码	1/2 Turbo 编码
调制方式	QPSK
天线配置	1 个发送天线, 2 个接收天线
TTI 大小(1 个子帧)	1ms(0.5ms × 2)
映射方式	Localised
用户数	6
单用户数据占子载波数	12 / LB
单用户导频占子载波数	6 / SB
FFT 大小	512
CP 长	31
HARQ 最大重传次数	4
HARQ 重传间隔	6TTI
跳频方式	TTI 内与 TTI 间跳频

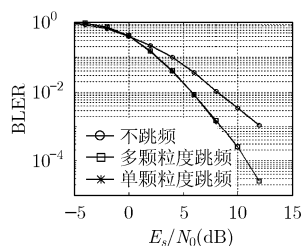


图5 在 TU 信道 3kmph 环境下的跳频性能曲线

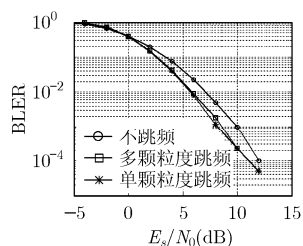


图6 在 TU 信道 120kmph 环境下的跳频性能曲线

的碰撞。

5 结束语

本文提出了一种TTI内与TTI间联合跳频的跳频方案, 适合任意传输带宽需求, 既能保持系统单载波传输特性, 又能避免数据包之间发生碰撞。理论分析和仿真结果表明, 该方案在低速信道和高速信道的情况下都能够取得理想的频率分集增益, 在EUTRA上行链路DFT-SOFDM系统中具

有很好的应用前景。多小区环境下, 对相邻不同的小区设置不同的 α 。该跳频方案可以保证相邻小区之间的跳频图样的正交性, 即一个周期内只和相同的用户碰撞一次, 可以实现干扰随机化, 获得干扰分集。

参考文献

- [1] 3GPP TR 25.814 v7.1.0 (2006-10), Physical layer aspects for evolved UTRA [EB/OL].
- [2] 3GPP, R1-063249, UL LFDMA with hopping [EB/OL].
- [3] 3GPP, R1-062851, Frequency hopping for E-UTRA uplink, Ericsson [EB/OL].
- [4] 3GPP, R1-062554, Uplink frequency hopping, LG Electronics [EB/OL].
- [5] 3GPP, R1-062816, Comparison between distributed sub-carrier allocation and sub-frame based frequency hopping [EB/OL].
- [6] Golomb S W and Posner E C. Rook domains, Latin squares, Affine planes, and error-distributing codes [J]. *IEEE Trans. on the Information Theory*, 1964, 10(3): 196-208.
- [7] Stamatiou K and Proakis J. A performance analysis of coded frequency-hopped OFDM[C]. *Proceedings of IEEE WCNC*, 2005, 2(2): 1132-1137.
- [8] Pottie G J and Calderbank A R. Channel coding strategies for cellular radio. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1995, 44(3): 763-770.
- [9] Chen Jie. Fast hopping OFDM and packet-awareness coder design for wireless multimedia delivery[C]. *ICME*, 2003, 1(1): 665-668.
- [10] Galda D and Rohling H A. Low complexity transmitter structure for OFDM-FDMA uplink systems [A]. *Proceedings of IEEE VTC'02[C]*. IEEE, 2002: 1737-1741.

路 森: 男, 1979 年生, 博士, 研究方向为无线通信中的信号处理。

王亚峰: 男, 1974 年生, 副教授, 从事移动通信关键技术的研究。

杨大成: 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 近年来从事移动通信的研究。