无线通信

LTE系统中辅同步信号的研究与DSP实现

陈发堂,何坚龙
(重庆邮电大学 通信与信息工程学院,重庆 400065)

摘要:第三代合作伙伴计划(3GPP)长期演进(LTE)系统的同步信号包括主同步信号与辅同步信号,用于小区搜索。文章介绍了辅同步信号的生成过程,并根据定点数字信号处理器(DSP)的特点,提出了一种简单的实现方案,并利用MATLAB软件对其进行了验证。该方案已应用于LTE-时分双工(TDD)无线综合测试仪表的开发中。

关键词:长期演进;辅同步信号;主同步信号;数字信号处理器
中图分类号:TN929.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-8788(2010)05-0064-04

Research on secondary synchronization signals in LTE systems and DSP implementation

Chen Fatang, He Jianlong
(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Long Term Evolution (LTE) system, synchronization signals include primary and secondary synchronization signals, used for cell search. This paper describes the generation process the secondary synchronous signals and presents a simple implementation scheme in accordance with the features of fixed-point Digital Signal Processing (DSP) and have it verified by MATLAB. This scheme has been applied in the development of the LTE-Time Division Duplex (TDD) wireless integrated test instrumentation.

Key words: LTE; secondary synchronization signal; primary synchronization signal; DSP

0 引 言

基于正交频分复用(OFDM)技术的WiMAX标准的问世,迫使第三代合作伙伴计划(3GPP)长期演进(LTE)项目启动。LTE系统将最大系统带宽从5 MHz扩展到20 MHz,选用了新的核心传输技术—正交频分复用/频分多址(OFDM/FDMA)技术,即下行链路采用频谱效率较高的OFDMA调制方式,上行链路采用单载波-频分多址(SC-FDMA)调制技术,以降低发射终端的峰均功率比,减小终端的体积和成本[1]。

LTE系统的小区搜索过程是用户设备(UE)和小区取得时间和频率同步,并检测小区ID的过程,其涉及的信道包括同步信道、广播信道和下行参考信号。而同步信道又分成主同步信道和辅同步信道。同步信道是纯粹的L1信道,不用来传送L2/L3控制信令,而只用于同步和小区搜索过程,因此,也称为主同步信号与辅同步信号。

主同步信号的生成比较简单,在此不做介绍。本文主要介绍辅同步信号的生成过程并根据定点数字信号处理(DSP)的特点,提出一种简单的实现方案,利用MATLAB进行验证。本方案已应用于LTE-时分双工(TDD)无线综合测试仪表的开发中。

1 辅同步信号的生成

在LTE系统中,将两个长度为31的序列$S_0^{(m_0)}$、$S_1^{(m_1)}$通过交织、级联构成辅同步信号。两个不同的序列用来区分是在子帧0还是子帧5发送。其生成过程如下:

(1) 首先根据高层配置的参数$N_{ID}^{(1)}$,用式(1)计算出参数m_0和m_1。

$$m_0 = m' \bmod 31,$$
$$m_1 = (m_0 + \lfloor m'/31 \rfloor + 1) \bmod 31, \quad (1)$$

式中,$m' = N_{ID}^{(1)} + q(q+1)/2$,$q = \left\lfloor \frac{N_{ID}^{(1)} + q'(q'+1)/2}{30} \right\rfloor$,$q' = \lfloor N_{ID}^{(1)}/30 \rfloor$;$N_{ID}^{(1)}$表示小区组号,取值为0~167。

(2) 生成序列$S_0^{(m_0)}$和$S_1^{(m_1)}$

(a) 由式(2)生成一个0、1序列$x(i)$

$$x(\bar{i}+5) = \lfloor x(\bar{i}+2) + x(\bar{i}) \rfloor \bmod 2, \quad (2)$$

式中,初始化条件为$x(0)=0, x(1)=0, x(2)=0, x(3)=0, x(4)=1, 0 \leqslant \bar{i} \leqslant 25$。

收稿日期:2010-03-27
基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX03002-009)
作者简介:陈发堂(1965-),男,重庆人,副教授,硕士生导师,长期从事移动通信系统方面的研究开发工作。

(b) 由式(3)生成循环移位序列 $\tilde{s}(i)$

$$\tilde{s}(i) = 1 - 2x(i),\ 0 \leqslant i \leqslant 30, \quad (3)$$

式中，$\tilde{s}(i)$ 实质上是由 $x(i)$ 双极化得到的。

(c) 最后根据式(4)将序列 $\tilde{s}(i)$ 通过循环移位得到序列 $S_0^{(m_0)}$ 和 $S_1^{(m_1)}$

$$S_0^{(m_0)}(n) = \tilde{s}[(n + m_0) \bmod 31]$$

$$S_1^{(m_1)}(n) = \tilde{s}[(n + m_1) \bmod 31], \quad (4)$$

式中，参数 m_0 和 m_1 是由式(1)计算得到的。

(3) 生成加扰序列 $c_0(n)$ 和 $c_1(n)$

(a) 根据式(5)生成一个 0、1 序列 $x(i)$

$$x(\bar{i} + 5) = [x(\bar{i} + 3) + x(\bar{i})] \bmod 2, \quad (5)$$

其中，初始化条件为：$x(0) = 0, x(1) = 0, x(2) = 0, x(3) = 0, x(4) = 1, 0 \leqslant \bar{i} \leqslant 25$。

(b)由式(6)生成循环移位序列 $\tilde{c}(i)$

$$\tilde{c}(i) = 1 - 2x(i), \quad 0 \leqslant i \leqslant 30, \quad (6)$$

式中，$\tilde{c}(i)$ 实质上是由 $x_1(i)$ 双极性化得到的。

(c) 将序列 $\tilde{c}(i)$ 由式(7) 通过循环移位得到 $c_0(n)$ 和 $c_1(n)$

$$c_0(n) = \tilde{c}[(n + N_{\mathrm{ID}}^{(2)}) \bmod 31]$$

$$c_1(n) = \tilde{c}[(n + N_{\mathrm{ID}}^{(2)} + 3) \bmod 31], \quad (7)$$

式中，参数 $N_{\mathrm{ID}}^{(2)}$ 为高层配置参数，表示小区组内号，取值范围：0、1 和 2。

(4) 生成加扰序列 $z_1^{(m_0)}(n)$ 和 $z_1^{(m_1)}(n)$

(a) 根据式(8) 生成一个 0、1 序列 $x(i)$

$$x(\bar{i} + 5) = [x(\bar{i} + 4) + x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i} + 1) + x(\bar{i})] \bmod 2, \quad (8)$$

其中的初始化条件为：$x(0) = 0, x(1) = 0, x(2) = 0, x(3) = 0, x(4) = 1, 0 \leqslant \bar{i} \leqslant 25$。

(b) 由式(9)生成循环移位序列 $\tilde{z}(i)$

$$\tilde{z}(i) = 1 - 2x(i), \quad 0 \leqslant i \leqslant 30, \quad (9)$$

其中，$\tilde{z}(i)$ 实质上是由 $x(i)$ 双极化得到的。

(c) 将序列 $\tilde{z}(i)$ 由式(10) 通过循环移位得到 $z_1^{(m_0)}(n)$ 和 $z_1^{(m_1)}(n)$

$$z_1^{(m_0)}(n) = \tilde{z}\{[n + (m_0 \bmod 8)] \bmod 31\}$$

$$z_1^{(m_1)}(n) = \tilde{z}\{[n + (m_1 \bmod 8)] \bmod 31\}, \quad (10)$$

其中，参数 m_0 和 m_1 是由式(1)计算得到的。

(5) 最后根据式(11)生成辅同步信号序列 $d(n)$

$$d(2n) = \begin{cases} S_0^{(m_0)}(n)c_0(n) \text{ in subframe } 0 \\ S_1^{(m_1)}(n)c_0(n) \text{ in subframe } 5 \end{cases},$$

$$d(2n+1) = \begin{cases} S_1^{(m_1)}(n)c_1(n)z_1^{(m_0)}(n) \text{ in subframe } 0 \\ S_0^{(m_0)}(n)c_1(n)z_1^{(m_1)}(n) \text{ in subframe } 5 \end{cases},$$

$$0 \leqslant n \leqslant 30, \quad (11)$$

其中，$d(n)$ 序列的长度为 62，是由两个长度为 31 的二进制序列交织级联产生。根据两个长度为 31 的序列组合，则形成子帧 0 与子帧 5 之间不同的辅同步信号。

2 数字信号处理器

本系统选用 TMS320C6455 作为开发使用的 DSP 芯片。该芯片属于高速定点 DSP，最高时钟频率为 1 GHz，处理性能达 8 000 MIPS，而且每个时钟周期可执行 8 条指令，实现高速运算。片上存储器条用两级存储器结构，L1 包括相互独立的 16 kbyte 数据 Cache(L1D)和 16 kbyte 的程序 Cache (L1P)，L2 寻址空间为 1 Mbit/s，实现大量存储。片上外设包含一个增强的直接存储器访问控制器，可以提供 64 条独立的直接存储器访问(DMA)通道；两个外部存储器接口 EMIF：64 bit 的 EMIFA，16 bit 的 EMIFB；外部存储器接口可以与异步存储器(SRAM，EPROM)或者同步存储器(SDRAM，SB-SRAM，ZBTRAM，FIFO)实现无缝连接，最大寻址空间为 1 280 Mbyte；该 DSP 还独有地包含了一个 Viterbi 译码协处理器(VCP)和 Turbo 译码协处理器(TCP)。

3 设计与软件实现

3.1 输入输出参数及调用格式

在整个 LTE 系统中，辅同步信号生成是作为一个子函数模块。因此，本方案定义输入输出变量及其调用格式如表 1 所示。

表 1 输入输出参数

m_0	A4	m_1	B4
N_ID_2	A6	TxSSSDataoutD1	B6
TxSSSDataoutD2	A8	TxSSSoutLen	B8
TxSSS_x_seq	A10		B10

调用格式：extern void TxSSS(int, int, int, int *, int *, int, int *)，其中，int 分别表示 m_0、m_1、N_ID2 和 TxSSSoutLen；int * 分别表示 TxSSSDataoutD1 为指向输出序列 D1 (n) 的首地址；TxSSSDataoutD2 为指向输出序列 D2 (n) 的首地址；TxSSS_x_seq 为指向 x 序列 x_1、x_2 和 x_3 的首地址。

3.2 实现原理

3.2.1 流程描述

具体流程描述如下：

第 1 步：生成参数 m_0 和 m_1

根据高层配置的参数 $N_ID_1 = 0 \cdots 167$，利用式(1)进行计算。在 m_0 与 m_1 的计算过程中，有4个除法和两个取模操作。如果不调用除法程序，则用2 000多个周期(cycles)；而调用除法程序后，只用300多个周期。所以在main函数中，调用了4次文献[3]介绍的除法程序。

第2步：生成3个固定序列 x_1、x_2 和 x_3

利用MATLAB软件生成3个固定的 x 序列：x_1(0x04B3E375)、x_2(0x05763E69)和 x_3(0x0737D12 B)。在DSP中用3个words将其存储在首地址为TxSSS_x_seq的内存中。

第3步：序列的生成

(1) 生成单极性序列 $s_0(n)$ 和 $s_1(n)$：将 x_1 序列向左循环移 m_0 位，得到 $s_0(n)$；将 x_1 向左循环移 m_1 位，得到 $s_1(n)$。具体可以用两种方式得到：

第1种：共需要4个周期。

SHL A16,A4,A19；将 x_1 序列左移 m_0 位(1)

||SUB B18,A4,B19；计算右移位数 $32-(m_0+1)$

SHRU A16,B19,B19；将 x_1 序列右移 $32-(m_0+1)$

SHL B19,1,B19；再将左移1位(2)

ADD A19,B19,A19；再将(1)(2)的两串序列相加。

第2种：采用ROTL指令(双周期指令)[4]，因为此指令是对整字的前后循环移位，而上述序列只有31 bit，处理的结果会大于4个周期，因此，决定不采用ROTL指令，而采用第1种方法。

(2) 生成单极性加扰序列 $c_0(n)$ 和 $c_1(n)$：根据高层配置的参数 $N_ID_2 = 0$、1和2，使用第2步的 x_2 序列，将 x_2 序列向左循环移位Nid2位，得到 $c_0(n)$；将 x_2 向左循环移位 $Nid2+3$ 位，得到 $c_1(n)$。

(3) 生成单极性加扰序列 $z_0(n)$ 和 $z_1(n)$：使用第2步的 x_3 序列，将 x_3 序列向左循环移位 $a = m_0 \bmod 8$ 位，得到 $z_0(n)$；将 x_3 向左循环移位 $b = m_1 \bmod 8$ 位，得到 $z_1(n)$。

第4步：生成两个序列 $d_1(n)$ 和 $d_2(n)$：$d_1(n)$ 序列由 $s_0(n) \oplus c_0(n)$ 生成的偶数位序列和 $s_1(n) \oplus c_1(n) \oplus z_0(n)$ 生成的奇数位序列合成；$d_2(n)$ 序列由 $s_1(n) \oplus c_0(n)$ 生成的偶数位序列和 $s_0(n) \oplus c_1(n) \oplus z_1(n)$ 生成的奇数位序列合成。在DSP利用XOR指令操作，然后再采用SHFL指令将偶数位与奇数位序列间插在一起，形成 $d_1(n)$ 与 $d_2(n)$。

第5步：序列双极性化：将第4步的 $d_1(n)$ 和 $d_2(n)$ 序列进行双极化处理。在DSP中，对上面每个序列逐位进行判断，若第 n 位上是0，则判断为-1；若第 n 位上是1，则判断为1。在DSP设计中，用1个byte来存储1或者-1，这样内存需要124个存储单元(124个byte)，$d_1(n)$ 序列与 $d_2(n)$ 序列各需62个byte。

3.2.2 MATLAB验证

根据上面的算法流程，通过MATLAB编程进行仿真验证，仿真参数为 $N_{ID}^{(1)}$、$N_{ID}^{(2)}$ 和Num_subframe(子帧号，取值为0和5)。随机的取 $N_{ID}^{(1)} = 3$，$N_{ID}^{(2)} = 1$，则子帧号为0上得到的数据序列如下：1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,-1,-1, 1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,-1, 1,1,-1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,1,1,-1,1,1,1。子帧号为5上得到的数据序列如下：-1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,-1,-1, -1,-1,-1,1,1,1,-1,1,1,1,1,1,-1,1,1,-1,1,-1,-1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,1,1,1,1,1,-1,1,1,-1,1,1,1。

经过DSP软件平台CCS[5]实现的数据如图1所示。其中，TxSSSDataoutD1表示子帧号为0上数据的首地址，TxSSSDataoutD2表示子帧号为5上数据的首地址，为了节省内存空间，用1个Byte表示一个数据，图中01表示1，FF表示-1。

```
TxSSSDaaoutD1
  0x0101FFFF    0x0101FF01    0xFFFFFF01
  0xFFFF01FF    0xFFFFFFFF    0xFF010101
  0x0101FFFF    0xFFFF0101    0xFFFFFF01
  0x01FF01FF    0xFF01FF01    0xFF0101FF
  0xFF01FF01    0xFFFFFFFF    0x0101FF01
  0x01010101
TxSSSDataoutD2
  0XFF010101    0x01010101    0x01010101
  0xFFFFFFFF    0xFF010101    0xFF010101
  0x0101FF01    0x01FF01FF    0xFFFF01FF
  0x0101FFFF    0x01FFFFFF    0xFFFFFFFF
  0x01010101    0x010101FF    0x0101FF01
  0x01010101
```

图1　经过DSP软件平台CCS实现的数据

容易看出，DSP实现数据与MATLAB仿真数据相同，表明了此方案的正确性。另外，此方案只用了约1 200个周期，对于C64系列处理器，这是一个

很小的数目，表明了可实现性。

4 结束语

本文详细介绍了LTE系统中辅同步信号的生成过程，根据C64系列定点DSP的特点，提出了一种简单的实现方案，特别是在实现过程中的一些技巧的处理，最后通过MATLAB进行了验证。

参考文献：

[1] 沈嘉，索士强，全海洋. 3GPP长期演进(LTE)技术原理与系统设计 [M]. 北京：人民邮电出版社，2008. 280-284.

[2] 3GPP TS 36. 212-2009, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 9) [S].

[3] 石元君. 定点DSP除法原理及其TMS320C6000实现 [J]. 单片机与嵌入式系统应用，2002，(10)：73-74.

[4] 田黎育，何佩琨. TMS320C6000系列DSP编程工具与指南 [M]. 北京：清华大学出版社，2007.

[5] 汪安民，张松灿. TMS320C6000系列DSP实用技术与开发案例 [M]. 北京：人民邮电出版社，2008.

(上接第51页)

受激布里渊效应是限制入纤功率的主要因素，为了防止单端受激布里渊效应的发生就要降低入纤功率，从而使系统的信噪比降低。然而，采用非线性反射镜后，一方面可以通过增加入纤功率，在避免采用单根传感光纤的受激布里渊现象的同时，提高系统的信噪比；另一方面可以提高系统的可靠性，即当一根传感光纤发生故障时，另一根传感光纤能够继续使用。

4 结束语

本文利用非线性反射镜结构来提高BOTDR分布式光纤传感器的性能。由于3 dB耦合器的直通臂和耦合臂之间存在着90°的相移，利用它的这个特性构成非线性反射镜，结合双传感光纤同时测量的方法，可以将传感系统输出信号的强度提高到原来的4倍，因而可以提高系统的信噪比及测量精度。同时随着光纤制作工艺的成熟，布入多根纤芯的成本降低，也相应地促进了这种传感结构的推广。

参考文献：

[1] 张娜，冯霞. 光纤传感器在液体测量中的应用 [J]. 中国激光，2006，33(11)：67-71.

[2] 孙安，陈嘉琳，李国扬，等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测 [J]. 中国激光，2007，34 (4)：503-506.

[3] 韦斌，隋青美，张桂涛. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的发展 [J]. 电子质量，2004，(7)：80-83.

[4] Garus D, Gogolla T, Krebber K, et al. Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(4): 654-662.

[5] 宋牟平，庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术 [J]. 光学学报，2007，27(4)：711-715.

[6] Maughan S M, Kee H H, Newson T P. Novel distributed fiber sensor using microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin backscatter [A]. Proc. SPIE [C]. Italy: Proc. SPIE, 2000. 4185: 780-783.

[7] Sakair Y, Matsuura S, Adachi S, et al. Prototype double-pulse BOTDR for measuring distributed strain with 20-cm spatial resolution [A]. SICE Annual Conference [C]. Japan: SICE Annual Conference, 2008. (8): 1106-1109.

[8] Agrawal Govind P. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方，余震虹(译). 北京：电子工业出版社，2002. 318-321.

[9] Chen Yang, Liu Yong, Zhou Xiaoli, et al. A nonlinear mirror structure to improve the performance of the distributed fiber temperature sensor based on Raman backscattering [J]. J Electron Sci Technol Chin, 2008, 6(4): 405-407.

[10] Souza K D, Lees G P, Wait P C, et al. Diode-pumped landau-placzek based distributed temperature sensor utilizing an all-fibre Mach-Zehnder interferometer [J]. Electron Lett, 1996, 32 (23): 2174-2175.

[11] Li Y Q, Zhang F C, He Y J, et al. Advances in Brillouin based distributed optical fiber temperature sensing [A]. Proceedings of SPIE [C]. China: Proc. SPIE, 2005. 5634: 232-240.

[12] 李永倩，李卓明，何玉钧，等. Mach-Zehnder干涉仪差分检测布里渊温度和应变同时传感系统 [J]. 华北电力大学学报，2007，34(3)：27-30.