

IEEE 802. 16e 上行测距研究

吕海坤 黎海涛

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

摘要 IEEE802. 16e/ WiMAX 无线网络中,由于每个用户端与基站的距离各不相同,需要采用有效的测距机制对用户信号进行上行同步和功率控制。首先分析了 IEEE802. 16e 的测距原理,包括测距码的产生、发送与检测算法等;然后,给出了上行基站测距处理的各个功能单元,如测距码、功率检测和时延估计的设计流程;最后,在 IEEE802. 16e 基站系统中完成了上行测距处理的实现,测试结果表明给出的测距方案可行。

关键词 测距,差分相乘,功率检测,时延估计

中图分类号 TN92 **文献标识码** A

Research on Uplink Ranging Technique in IEEE 802. 16e Network

LV Hai-kun LI Hai-tao

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Efficient ranging technique is utilized to achieve the uplink time slot synchronization and power control in WiMAX/IEEE802. 16e network. The principle of ranging which is involved in the generation, transmission and detection of ranging codes is analyzed firstly. Then, the key techniques of uplink ranging processing which includes the power detection and time delay estimation is investigated. Finally, the DSP implementation of ranging processing is given in detail, the test results show that the proposed ranging scheme is feasible.

Keywords Ranging, Differentially multiplying, Power detection, Time delay estimation

1 引言

WiMAX/IEEE 802. 16e 作为一项重要的宽带无线接入技术标准受到业界广泛关注。在 IEEE 802. 16e 上行链路(UL, uplink)中,由于每个用户终端(SS, subscriber station)与基站(BS, base station)的距离各不相同,对用户发送信号的上行同步及功率控制尤为重要,这个处理过程也称为测距(Ranging)。

IEEE 802. 16e 测距过程包括初始测距、周期测距、切换测距和带宽请求测距。初始测距允许用户终端加入网络获取正确的传输参数,如时间偏移和发射功率,以保证用户发送帧与 BS 接收帧对齐,以及用户信号能在合适的功率门限中被接收。周期测距可以视为初始测距的延续,通过周期测距保证周期地执行测距操作,以调整用户传输参数,使之能维持与 BS 的正常通信^[1-4]。

WiMAX 无线网络中,测距是用户端入网的首要步骤。基于 IEEE 802. 16e 标准,本文分析了 WiMAX 系统的测距码生成、发射和检测的原理及算法,设计了上行测距处理流程,并完成了测距处理的 DSP 实现。

2 测距码生成

IEEE802. 16e 标准规定了 256 个长为 144 bit 的伪随机码作为测距码,如图 1 所示,二进制测距码 C_k 是伪随机二进

制序列生成器(PRBS, Pseudo-Random Binary Sequence, 伪随机二进制序列生成器)输出的 PN(Pseudo-noise, 伪噪声)序列的子序列。每个测距码由 15 级 PRBS 产生,其生成多项式为 $1+X_1+X_4+X_7+X_{15}$, 初始化种子为 $[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]$, 其中 s_6 是最重要的比特, s_6-s_0 为标识值 ID cell 的二进制表示,是基站广播的传输参数之一。

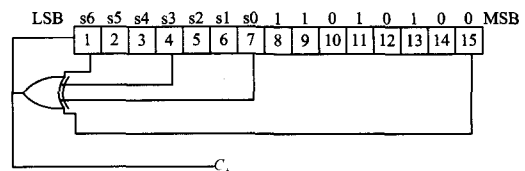


图 1 测距码生成

一个测距码为 144 bit,因此每输出 144 bit 就产生一个测距码。例如,PRBS 的前 144 bit 输出为第 1 个测距码,则第 145 到 288 bit 输出为第 2 个测距码。PRBS 产生的测距码字共有 256 个,这些码划分为:初始测距、周期测距、切换测距和带宽请求。测距码在时域上有很好的自相关和互相关特性,其时域自相关峰值明显大于互相关峰值,峰值比可达到 4. 2 倍。

3 测距码发射

测距过程中,定义了测距信道、测距时隙、测距码字以及测距信号。在时分双工(TDD)帧结构中,IEEE 802. 16e 标准

本文受北京市自然科学基金项目(4112012),北京市教委科技成果转化项目资助。

吕海坤(1989-),女,硕士生,主要研究方向为无线通信,E-mail:haikun_lv@163.com;黎海涛(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信、信号处理和 MCU/FPGA/DSP 开发等。

为测距过程分配了特定带宽,称为测距信道。测距信道由一组或多组子信道组成,每组含有6个连续子信道,每个子信道包含24个子载波。一个测距时隙(Ranging Slot),即测距请求机会,在时域上占2个OFDM符号,频域上占6个子信道,144个子载波,如图2所示。

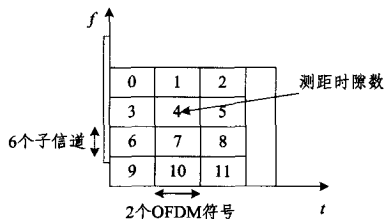


图2 测距时隙

初始测距信号由两个连续且相同的OFDM符号组成。每个OFDM符号承载调制后的测距码。测距码字采用BPSK调制后映射到测距子载波上。为了保证两个OFDM符号之间的连续性,测距信号在时域上通过添加循环前缀和循环后缀使得整个初始测距信号具有连续的相位。测距信号时域结构如图3所示。

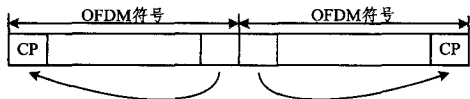


图3 测距信号时域结构

初始测距过程中,用户端从初始测距码字集中随机选择一个144bit的初始测距码。对该测距码字采用BPSK调制,然后随机选择一个测距时隙,将调制后的符号映射到144个测距子载波上形成测距信号。初始测距码的发送过程如图4所示。

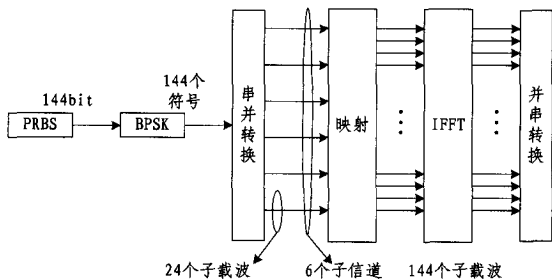


图4 初始测距系统发送端

周期测距用于SS维持与BS之间的通信,只能由已经与系统同步的SS周期地发送测距码。周期测距码的保护间隔,是把测距码后的保护间隔长度的数据拷贝到符号前。这与初始测距码不同,初始测距的码是在两个符号或四个符号上调制测距码,在第二个符号中,不是使用保护前缀,而是将第二个符号的循环前缀(CP)长度的数据拷贝到符号后面形成后缀,以保持两个符号之间的相位连续^[2]。在周期测距信道的3个OFDMA符号上调制3个连续的测距码,测距信道由MAC层动态地分配,并且在UL MAP(Uplink MAP,上行映射)中指示,周期测距码字发射的时域如图5所示。

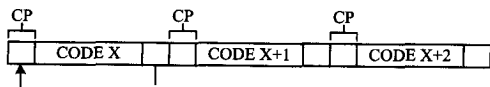


图5 周期测距码发射

4 测距检测

当多用户接入时,终端选择测距码并发送测距信号,故上行链路中基站接收到的是不同用户测距信号的叠加。基站接收到终端发送的测距码后,需检测出SS发送信号的功率并估计其时延值。测距码的检测包括时域算法和频域算法。时域算法是把频域生成的本地码变换到时域,然后与基站接收到的信号进行互相关从而确定峰值^[5]。

频域相关检测算法是把本地测距码与基站接收到的测距信号进行相关,比较相关值与阈值来判断是否检测到测距码,并根据天线端接收的峰值值来进行时延估计。由于一般的时、频域测距检测算法的计算复杂度较高,本文采用子载波差分的频域检测方法。

在IEEE802.16e系统中,测距子信道由一组相邻子载波组成,可假设相邻子载波的信道特性相似。若将接收到的相邻测距子载波进行差分相乘,可以去掉子载波之间的信道相位模糊。然后把接收的差分测距子载波信号与本地子载波符号进行相关运算,得到测距码功率值。所有超过该功率阈值的测距码作为待处理的测距码,并对所选测距码进行时延估计,其原理描述如下。

设发送测距码 $X_r(k, l) \in \{-1, 1\}$, 其中 k 是测距子载波索引, l 是测距序列索引。频域中接收的测距码是:

$$X_r(k, l) = X_r(k, l) \cdot H(k, l) \cdot e^{-j\frac{2\pi k l D}{N}} \quad (1)$$

式中, $H(k, l)$ 是第 l 个所发送的测距序列的第 k 个子载波的复信道传递函数, $\tau(l)$ 是对应第 l 个测距序列的传播延迟, N 是子载波号。

把相邻的测距码差分相乘得到:

$$X_r(k+1, l) \cdot X_r^*(k, l) = X_r(k+1, l) \cdot X_r^*(k, l) \cdot H(k+1, l) \cdot H^*(k, l) \cdot e^{-j\frac{2\pi k l D}{N}} \quad (2)$$

假定相邻子载波的信道响应相同,得到:

$$X_r(k+1, l) \cdot X_r^*(k, l) = X_r(k+1, l) \cdot X_r^*(k, l) \cdot |H(k, l)|^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi k l D}{N}} \quad (3)$$

把接收的差分测距码与本地差分测距码相乘并将结果相加:

$$R(l, l') = \sum_{k=0}^{N-1} [X_r(k+1, l) \cdot X_r^*(k, l) \cdot X_r(k+1, l') \cdot X_r^*(k, l')] \quad (4)$$

$$l' = 1, 2, \dots, L$$

则接收差分测距码的功率为:

$$P(l, l') = |R(l, l')|^2 \quad (5)$$

式中,令 $l=l'$, 可达到功率峰值 $P(l, l')$, 即

$$P_{\max}(l, l') = |R(l, l')_{l=l'}|^2 = |R(l)|^2 = \left| \sum_k |H(k, l)|^2 \right|^2 \quad (6)$$

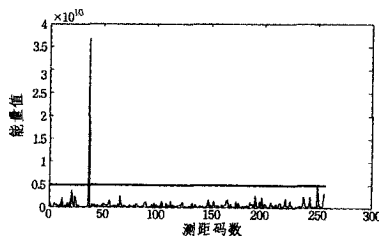


图6 测距码能量

因此,可以利用峰值来设定阈值 P_k ,选取接收测距码功率值超过阈值的测距码序列,将其视为检测到测距码。图 6 给出上行符号数为 21、基站接收天线数为 2,采用子载波差分法得到的测距码能量(功率),其中红线为阈值,由图可以明显看出能够检测到测距码。

检测出测距码后,可进一步计算每个用户的信号时延。基于信道脉冲响应来估计发送信号的时延 τ ,可直接把接收到的测距子载波信号和检测到的测距码 $X_p(k, l)$ 的乘积进行 IFFT 变换来求得时延。

$$h(l, t-\tau) = IFFT(X_r(k, l) \cdot X_p(k, l)), l \in L_k \quad (7)$$

因接收端的 FFT 窗加在每个 OFDMA 的符号体位置,故第二个符号会被 FFT 窗截掉一个 CP,相当于时域符号延迟了 CP 个点,如图 7 所示。若检测第二个符号来估计时延值,则需对得到的时延偏移值进行补偿。以 5M 为例说明,其 CP 长为 1/8 OFDMA 符号,即 64 点,峰值位置在区间 $[0 \sim 447]$ 之内加 64 改变为 $[64 \sim 511]$;峰值位置在区间 $[448 \sim 511]$ 之内减 448 改变为 $[0 \sim 63]$ 。通过该操作补偿了循环前缀,使补偿后的值仍在 $[0 \sim 511]$ 之内。补偿之后,大于 256 认为是超前,小于或等于 256 认为是延迟,故初始测距检测点数范围为 $[-256, 256]$ 。

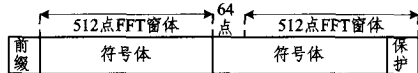


图 7 初始测距符号结构和 FFT 窗位置

整个测距过程流程为:BS 在 UL_MAP_IE 中给 SS 分配初始测距机会,SS 选择一个初始测距码并发送,BS 接收到测距码后会广播测距应答,即 RNG_RSP(包含了测距码的属性以及时延值和功率调整值),若应答消息中的状态为“继续”,则 SS 会根据 RNG_RSP 中的消息进行调整,接着会在 UL_MAP_IE 中得到周期测距机会,发送初始测距码,如图 8 所示。

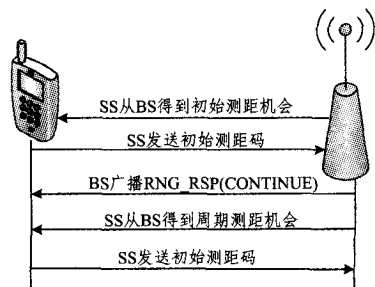


图 8 初始测距流程图(初始测距状态:继续)

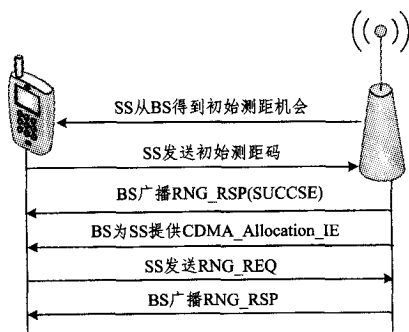


图 9 初始测距流程图(初始测距状态:成功)

若初始测距 RNG_RSP 中的状态为“成功”,则 BS 在 UL_MAP 中使用 CDMA_Allocation_IE 为 SS 分配带宽,接着 SS 发送 RNG_REQ(包含 MAC 地址和请求的下行突发配置描述),BS 广播 RNG_RSP 消息(包含基本 CID 和主管理 CID),若该消息为“成功”,则初始测距成功;若为“继续”,则 SS 按照消息内容继续调整参数,继续发送 RNG_REQ,如图 9 所示。

5 测距实现

下面以 5M 带宽/512 个子载波的 IEEE 802.16e 实际系统为例给出测距的实现流程。该系统中,把保护子载波和中心子载波除外,共 420 个可用子载波,按上行 PUSC(partial usage of subchannels,部分利用子信道)分配,共有 17 个子信道,针对 3 个段(segment),每段子信道划分为 6、6、5,而无论是 6 个还是 5 个子信道,其物理层测距算法均相同。测距流程描述如下:

首先,提取子载波端接收信号,进行差分运算得到接收差分码,进而计算出差分码总能量,利用该值设定阈值。同时,利用其与本地理想差分码进行相关得到测距码量,若其能量超过阈值,则认为检测到测距码。随后,计算该测距码能量并与设定的期望接收功率对比,即可得到功率调整值。时延估计是利用式(7)对天线端的 144 个子载波求能量,比较每个多径的能量并选取能量最大时对应的值为最大径,其对应的值即为时延估计值。

得到功率调整值和时延估计值之后,观测两者是否同时满足容忍范围,判定测距状态是“成功”(success)还是“继续”(continue)。基站 MAC 层根据 PHY 层上传的状态值,通知用户端进行调整,若“继续”,则按照基站的指示调整时间、功率等,然后随机选择一个测距码,在下一个测距机会继续测距;若“成功”,基站在 UL_MAP 消息中使用 UTUC=14 的 CDMA_Allocation_IE(Code Division Multiple Access allocation information element,CDMA 分配信息单元)为该终端提供用于发送 RNG_REQ(Ranging Request,测距请求)消息的带宽,这个带宽可以让用户发送下一轮的测距请求消息。

在 WiMAX 基站硬件平台中利用 DSP 实现上述测距流程的框图,如图 10 所示。DSP 选用 TI 公司的 TMS320TCI6487 处理器,TCI6487 包含 3 个 64+DSP 的 core。它支持 16/32 bit DDR2-667Mhz,自带 2 个 Rapid IO 接口,2 个 McBSP(multichannel buffered serial port,多通道缓冲串行口)接口和 1 个 10/100/1000 Mbps Ethernet MAC(SGMII,Serial Gigabit Media Independent Interface,串行千兆介质独立接口)。下面介绍其主要功能单元。

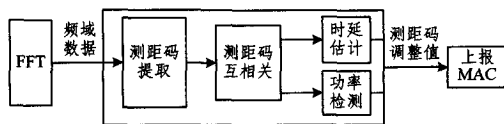


图 10 测距 DSP 实现框图

5.1 测距码检测

由于基站端采用了 2 幅接收天线,因此先提取每幅天线端接收到的子载波信号,对接收子载波信号共轭相乘求差分,以消除相位影响,得到 108 bit 差分码,将两天线端的差分码合并后平方得到差分码的总能量,利用其设置判定门限作为

阈值。再将 108 bit 差分码与本地理想差分码进行相关运算得到差分码的功率,将其与阈值相比较,若超过阈值则判定为检测到测距码。若未检测到测距码,则估算基站接收机底噪,再计算出期望接收的子载波功率值。测距检测流程如图 11 所示。

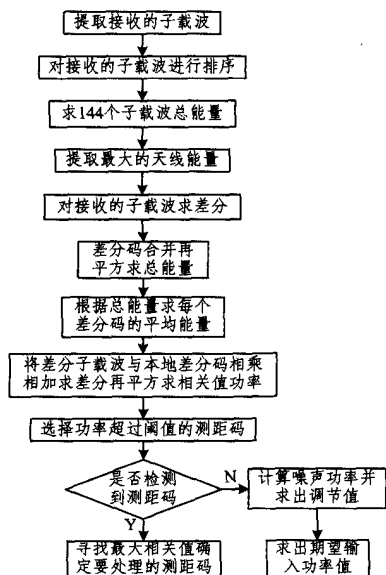


图 11 测距码检测流程图

5.2 功率检测

根据检测到的若干测距码,选择相关值最大的作为功率检测处理的测距码,计算其子载波信号的能量。并根据接收天线的配置情况,对其进行功率调整,得到最终的接收子载波信号功率值。用期望接收功率减去接收子载波信号功率,得到需要调整的功率值。功率检测的 DSP 软件设计流程如图 12 所示。

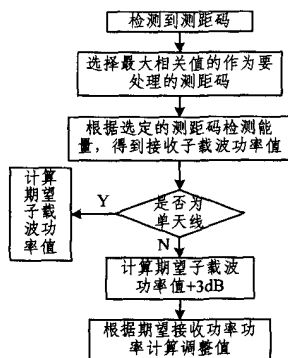


图 12 功率检测流程图

5.3 时延检测

每幅天线接收信号的能量不同,分别计算天线接收到的子载波能量,选择接收子载波信号能量最大的天线来估计时延值。首先,将天线接收到的子载波信号与已经检测到的测距码相乘并取共轭,然后进行 FFT 运算后再取共轭。这等效于做了 IFFT,从而将频域子载波转换为时域,根据时域信息寻找最大值,将最大径作为时延值。将时延值与功率调整值记录下来,根据其范围大小来判定测距状态是“成功”(success)还是“继续”(continue),并将这些信息上传给 MAC。时延检测流程如图 13 所示。

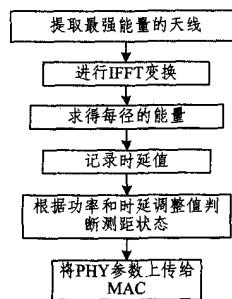


图 13 时延检测流程图

5.4 测试结果

根据上述设计流程编写了测距的 DSP 实现程序,并搭建了测试平台,如图 14 所示。图中 WiMAX 基站通过交换机与 PC 端相连,通过 PC 设置基站相关参数。终端通过以太网与基站进行通信,参数设置见表 1。

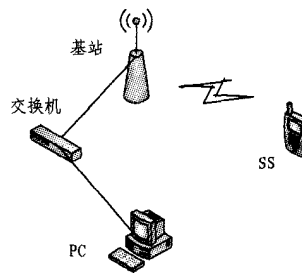


图 14 测试平台

表 1 参数设置

参数	取值
TTG/RTG	148/84
带宽	5M
初始测距码数	12
周期测距码数	28
上下行符号比率	21:26
带宽请求码数	4
分配子信道	1-17

5.4.1 消息交互测试

终端入网和初始化过程时,先进行下行信道扫描和同步,获得下行信道参数 DL_MAP 和 DCD 消息,则认为 SS 与 BS 同步;然后,终端获得上行信道参数,等待成功接收 UL_MAP 和 UCD 消息之后,终端才能进行测距操作,如图 15 所示。

```

MAC Management Message Type: 3
Reserved: 0
UCD count: 0
Uplink Channel ID: 10892
Num OFDMA Symbols: 21
UL_MAP IES (20 bytes)
CDMA Bandwidth/Ranging Request IE
CID: 6535
UIUC: 12
0000 0000 ..... = OFDMA Symbol Offset: 0
..... 0000 0000 ..... = Subchannel Offset: 0
..... 0 0000 10..... = No. OFDMA Symbols: 2
..... ..00 0011 0... = No. Subchannels: 6
..... ..00..... = Ranging Method: 0
..... ..0 = Dedicated ranging Indicator: 0
    
```

图 15 UL_MAP 消息

5.4.2 测距测试

RNG_REQ 是终端向基站发送测距请求,RNG_RSP 是基站向终端发送测距响应。在基站成功接收到测距后,会使用 CID 广播一个测距应答(RNG_RSP)消息,如图 16 所示。

(下转第 254 页)

架构和体系结构必须赋予新的内涵和外延,以适应需求的变化。本文以海洋环境探测的实际应用为主线进行需求分析,设计了系统架构,提出了高密度水下传感器网络的概念。在现有研究的基础上提出了一种新的水下传感器网络体系结构,对各层和各模块功能进行了详细阐述。设计了一种新的路由机制,该机制简单易行,能量有效,可以有效节省节点能量,延长网络生存时间。

参考文献

[1] <http://www.globalfuture.com/mit-trends2003.htm>
 [2] Rice J. Enabling Undersea FORCENet with Seaweb Acoustic Networks[C]//Biennial Review 2003,SSC San Diego TD 3155, December 2003;174-180
 [3] 李彦,罗续业.海洋监测传感器网络概念与应用探讨[J].海洋技术,2006,25(4):34-38
 [4] Zheng Jun-Jie. A Effective Submarine Detection Technology: Underwater Sensor Networks[C]//2011 IEEE International Conference on Information Theory and Information Security, 2011(12):417-421
 [5] 郑君杰,姚春富.基于水下传感器网络的海洋探测系统关键技术

研究[J].国际关系学院学报,2011(10)
 [6] 金军,纵芳,梁妙元,等.水下传感器网络路由协议研究[J].电信科学,2012,28(2):123-125
 [7] 朱昌平,等.水声通信[M].北京:电子工业出版社,2009:270-275
 [8] 郭忠文,罗汉江.水下无线传感器网络的研究进展[J].计算机研究与发展,2010,47(3):377-389
 [9] 雷昌有,蒋英.北斗卫星通信在水情自动测报系统中的研究与应用[J].水利水电快报,2005(21):26-28
 [10] 朱昌平,等.水声通信[M].北京:电子工业出版社,2009:280-281
 [11] 刘林峰,刘业.面向海洋场景的无线传感器网络体系结构模型研究[J].计算机科学,2010,37(10):744-77
 [12] Xie P,Cui J H,Lao L.VBF:Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks[C]//UbiNet-TRD5-03.Connecticut:University of Connecticut,Computer Science and Engineering,2006
 [13] Nicolaou N C,See A G,Xie P,et al.Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks[C]//Proc of IEEE OCEANS 2007,Piscataway,NJ,IEEE,2007

(上接第 231 页)

```

MAC Management Message: RNG-RSP (5)
MAC Management Message Type: 5
Reserved: 0
Ranging status: success (3)
TLV type: 4
TLV length: 1
TLV value: Ranging status (0x03)
Ranging status: success (3)
Power Level Adjust (1 byte(s))
TLV type: 2
TLV length: 1
TLV value: Power Level Adjust (1 byte(s)) (0xf7)
Power Level Adjust: -2.25 dB
CRC: 0x178c0750
    
```

图 16 RNG_RSP 消息

```

Message Notice ipc message process, type 1
Message Debug ipcMsgProcess, type 1
MAC-HD Debug Servo:Timer T205 ID NBR ADV timeout for sector=0
MAC-HD Info Servo module: trigger to send MSG_NBR_ADV, but active nbr bs doesn't exist!!
DSP_CORE2 Info Sym/1 Code detected Num 1, code:10, timing:3, power:-40, status:-2.25 dB
DSP_CORE2 Info LMR print: gusExpectedPwr:431, uscore!Pwr:468,LMR print END FN:7013c
MAC-CRSIG Info Rev Initial Ranging CodeFrame 0x81a3 (SectorId=0 Code=10 Status=3)
MAC-INIEMF Info Succeed to send OPA Msg RNG_RSP to SS(FrameNbr=0x81a5,SectorId=0,CID=0)
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to start timer FwRangingRsp.
MAC-INIEMF Debug Succeed to process the initial ranging code indication with code idx 7 and
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to send CDMG allocation request!
MAC-CRSIG Notice Receive msg SIG_RNG_REQ successfully,frm 0x0001ad.
MAC-CRSIG Notice Msg SIG_RNG_REQ has been forwarded to BsInitEntry successfully.
MAC-CFSCtrl Info Rev OPA Msg RNG_REQ from SS(FrameNbr=0x81ad,SectorId=0,CID=0)
MAC-INIEMF Debug Enter init FwRangingMsg with CID 0 and type4.
MAC-INIEMF Info BsInitEntry:Succeed to parse RNG_REQ message(Mac Addr=0x64:4b:c3:60:9:23 a
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to allocate ECID=1 for Ms(Mac Addr=0x64:4b:c3:60:9:23
MAC-CFSCtrl Notice Bs entry, info as following: BcId(1) and sector(0) and Mac (0x64:4b:c3
MAC-RPMSG Debug Succeed to send MSG_MS_ENTER_LEAVE_IND to SE1(000001ad)
MAC-HD Info BsInitEntry: This Ms(mac address=0x64:4b:c3:60:9:23 and bcid=1) enters network
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to generate the RNG-RSP message(Mac Addr=0x64:4b:c3:6
MAC-INIEMF Info Succeed to send OPA Msg RNG_RSP to SS(FrameNbr=0x81ad,SectorId=0,MacId=2)
MAC-INIEMF Debug Succeed to send SS_ENTRY_START_IND to ME for ECID 1
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry: Succeed to start timer T3(bcId=1).
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry: Succeed to start timer T3_ULSW_IND for SS with ECID 1.
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry: Succeed to start timer ErrorStat(bcId=1).
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to process the management message!
DSP_CORE2 Info Sym2 Code detected Num 2, code:39, Timing:0(to MAC:0), power:-10, status:3
MAC-CRSIG Info BsCtrlSignal receives msg SIG_SEC_REQ successfully,frm 0x0001c0.
MAC-CRSIG Notice Msg SIG_SEC_REQ has been forwarded to BsInitEntry successfully.
MAC-CFSCtrl Info Rev OPA Msg SEC_REQ from SS(FrameNbr=0x81c0,SectorId=0,CID=1)
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to get an related entry in RCP_Sstasustable
MAC-INIEMF Debug Enter init FwRangingMsg with CID 1 and type26.
MAC-INIEMF Debug SIG_SEC_RSP message of 76 bytes has been generated!
MAC-INIEMF Info Succeed to send OPA Msg SEC_RSP to SS(FrameNbr=0x81c0,SectorId=0,CID=1)
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to cancel timer T3(bcId=1)!
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to start timer T11 upon reception of SIG_SEC_REQ(bcId
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry: Succeed to configure default Service Flow for the SS with BC
MAC-INIEMF Debug BsInitEntry:Succeed to process the management message!
DSP_CORE2 Info Sym2 Code detected Num 2, code:36, Timing:0(to MAC:0), power:-23, status:3
MAC-CRSIG Notice BsCtrlSignal receives msg SIG_RNG_REQ successfully,frm 0x0001d3.
    
```

图 17 BS、SS 交互消息

从图 17 中可看到 SS 接入后进行初始测距和周期测距的交互信息,其与 IEEE802.16e 标准相一致,由此验证了测距功能的正确性。

结束语 针对 802.16e 通信协议的上行链路,本文分析了 IEEE802.16e 标准中测距技术原理,包括测距码的产生、发送、以及检测等;给出了上行基站测距码的检测处理的各个功能单元的具体实现算法流程,如测距码、功率检测和时延估计的设计流程。最后,利用 DSP 完成了上行测距处理的实现。

参考文献

[1] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16:Air Interface for Broadband Wireless Access Systems[S]. May 2009,29
 [2] Mahmoud H A, Arslan H, Ozdemir M K. Initial Ranging for WiMAX (802.16e) OFDMA [C] // Military Communications Conference, MILCOM 2006. IEEE, Washington DC, 2006: 1-7
 [3] Lin Yung-chuan, Su Szu-lin, Wang Hsin-chih. A Low Complexity Method of Initial Ranging for IEEE802.16e OFDMA Systems[C]//Advanced Communication Technology, ICACT 2009. 11th International Conference, Gangwon-Do, South Korea, 2009:1137-1141
 [4] Lee D H, Morikawa H. Performance Analysis of Ranging Process in IEEE802.16e OFDMA Systems[C]//Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, WiMOB 2007. Third IEEE International Conference, White Plains, NY, 2007:16
 [5] 李焕华.正交频分复用系统的测距技术研究[D].广州:华南理工大学,2010