DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2013.01.014

MIMO 雷达 OFDM-LFM 波形设计与实现

陈正辉，严济鸿，何子述
（电子科技大学电子工程学院，四川成都 611731）

摘　要：由于 MIMO 雷达发射相互正交的波形，因此正交波形设计是 MIMO 雷达实现的关键问题。针对 MIMO 雷达发射波形正交的特点，介绍了正交频分复用线性调频波形（OFDM-LFM）的设计原理。提出了一种正交频分线性调频波形产生的实现方案，该方案通过并行发射多路频分的线性调频信号形成 OFDM-LFM 波形。设计了一种由主控计算机、波形控制模块和数字中频合成模块构成的 OFDM-LFM 波形产生器。给出了基于 AD9910 数字斜坡调制方式产生单通道线性调频信号的方法和 OSK 功能产生多通道线性调频脉冲信号的方法，并对单通道线性调频信号线性度进行了分析。最后给出了其中两通道 LFM 信号频谱和一通道线性调频脉冲信号的时域波形的测试结果，验证了方案的正确性和可行性。

关键词：多输入多输出（MIMO）；正交频分复用；线性调频；波形设计；AD9910

中图分类号：TN957；TN958.92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2013)01-0077-05

Design for MIMO Radar and Implementation of OFDM-LFM Waveform

CHEN Zheng-hui, YAN Ji-hong, HE Zi-shu
(*School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *China*)

Abstract: Waveform design is crucial for MIMO radar that transmits mutually orthogonal waveforms. Based on the characteristics of transmitted orthogonal waveforms, the design principles of the orthogonal frequency division multiplexing linear frequency modulation(OFDM-LFM) signals are introduced. In this paper a new realization scheme is presented where multi-channel frequency division linear frequency modulation signals are used to generate OFDM-LFM signals. We design a waveform generator composed of a host computer, a waveform control module, and a digital intermediate frequency synthesis module. The method for forming single-channel linear frequency modulation signal based on the digital ramp modulation mode of AD9910 and the method for forming multi-channel chirp signal based on the OSK function of AD9910 are introduced and the linearity of the single-channel LFM signal is analyzed. Finally, the experimental results of the two-channel LFM signal spectrum and the time domain waveform of one channel chirp signal are presented to verify the correctness and feasibility of the method.

Key words: multiple-input multiple-output(MIMO); orthogonal frequency division multiplexing; linear frequency modulation; waveform design; AD9910

1　引　言

近年来随着雷达技术的发展，雷达与通信技术交融产生的 MIMO 雷达受到雷达领域的广泛关注[1]。其中林肯实验室提出的 MIMO 雷达概念，被称之为正交信号相控阵雷达或发射分集 MIMO 雷达[2]。发射分集 MIMO 雷达发射时将雷达阵列分为多个子阵，采用数字方法产生不同的发射波形，使各阵元的发射波形之间相互正交，在空间不能同相位叠加合成高增益的窄波束，而是形成低增益的宽波束[1]。

MIMO 雷达采用的发射波形主要有正交频分线性调频信号（OFDM-LFM）、正交多相编码信号和正交离散频率编码信号（DFCW）。正交频分线性调频信号作为 MIMO 雷达的发射波形，每个子载波通过不同的通道并行发射，每个信号占有不同的频带，通过接收信号处理，可以得到宽带效

收稿日期：2012-06-15；修回日期：2012-08-07

果，获得高分辨率[3-4]。

本文针对 MIMO 雷达发射波形的功能需求和特点，分析了产生 OFDM-LFM 波形的原理，研制了一种新型的 MIMO 雷达 OFDM-LFM 波形产生器。该设计利用直接频率合成器 AD9910 的数字斜坡调制模式和 OSK 功能实现单通道 LFM 信号，通过 FPGA 控制调制方式和同步多通道 LFM 信号实现 MIMO 雷达 OFDM-LFM 脉冲的中频产生。

2 OFDM-LFM 信号的设计

2.1 OFDM-LFM 信号产生原理

发射分集 MIMO 雷达基本原理如图 1 所示[1-2]，发射时将雷达阵列分成 M 个子阵(或阵元)，通过对数字收发单元的控制，使每个子阵发射的波形 $s_1(t),s_2(t),\cdots,s_M(t)$ 相互正交[3]。由于各子阵信号的正交性，在空间将不能同相位叠加合成高增益的窄波束，而是形成图 1 所示的低增益宽波束，由于阵面被分成 M 个子阵，波束主瓣增益将减小 M 倍，发射功率被分散到 M 个子阵，每个子阵发射功率为原发射总功率的 $1/M$。

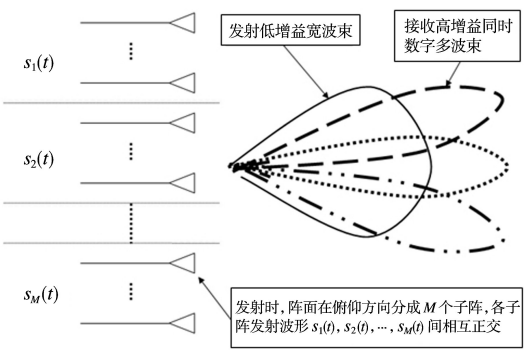

图 1 MIMO 雷达原理示意图

MIMO 雷达发射波形可以设计为多种形式的正交信号，本文针对 OFDM-LFM 信号作为 MIMO 雷达正交发射波形的情形进行讨论。

MIMO 雷达在发射端发射多个正交频分 LFM 信号，设发射通道发射的窄带线性调频信号为 $s_i(i=1,2,\cdots,M)$，M 为发射通道个数。单个通道发射的 LFM 信号数学表达式为

$$s(t)=\frac{1}{\sqrt{T_p}}\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)e^{j2\pi\left(f_0t+\frac{1}{2}\mu t^2\right)} \tag{1}$$

$$u(t)=\frac{1}{\sqrt{T_p}}\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)e^{j2\pi\frac{1}{2}\mu t^2} \tag{2}$$

式中，$u(t)$ 为 LFM 的复包络；$\mu=B/T_p$ 为调制斜率；B 为频率变化范围，T_p 为脉冲宽度。于是，信号的瞬时频率为 $f_0\pm\mu t(-T_p/2\leqslant t\leqslant T_p/2)$。

要产生 M 通道的正交频分 LFM 信号(OFDM-LFM)信号，其产生方式如图 2 所示。

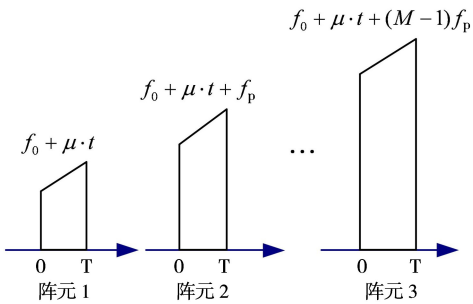

图 2 OFDM-LFM 发射信号时频关系图

各个阵元的发射信号分别为

$$\begin{aligned}
s_1(t)&=v(t)e^{j2\pi\left(f_0t+\frac{1}{2}\mu t^2\right)}\\
s_2(t)&=v(t)e^{j2\pi\left(f_0t+\frac{1}{2}\mu t^2+f_pt\right)}\\
&\vdots\\
s_M(t)&=v(t)e^{j2\pi\left(f_0t+\frac{1}{2}\mu t^2+(M-1)f_pt\right)}
\end{aligned} \tag{3}$$

式中，$f_p=\frac{1}{T_p}$，且 $v(t)=\frac{1}{\sqrt{T_p}}\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)$。因为

$$\int_0^{T_p}s_m(t)s_n^*(t)\mathrm{d}t=\int_0^{T_p}|v(t)|^2e^{j2\pi t\cdot(m-n)f_p}\mathrm{d}t=\begin{cases}A^2, & m=n\\ 0, & m\neq n\end{cases} \tag{4}$$

所以 $s_m(t)$，$s_n(t)$ 在 $[0,T_p]$ 内相互正交。因此，相邻阵元发射信号中心频点间隔 f_Δ 是信号时宽倒数 $\frac{1}{T_p}$ 的整数倍，即 $f_\Delta=Kf_p$(K 取正整数)时，各个阵元发射信号依旧正交[5]。每个阵元发射信号的线性调频带宽相互交叠时，只要满足上述条件，各阵元发射信号满足正交性。

OFMD-LFM 信号的总带宽由 LFM 信号的带宽和信号间的频率间隔共同决定[6]。单个信号的子带宽为 B_s，考虑频分方式，则信号 $s_1(t),s_2(t),\cdots,s_M(t)$ 的总带宽为

$$B=B_s+(M-1)f_\Delta \tag{5}$$

2.2 OFDM-LFM 信号产生

MIMO 雷达 M 个阵元发射脉冲序列如图 3 所示，M 个通道的发射信号均为 LFM 信号，f_1、$f_2\cdots f_M$ 为各通道 LFM 信号中心频点，T_r 为发射脉冲的重复周期，T_p 为单个脉冲的宽度。M 个通道的 LFM 脉冲同步并行发射形成 OFDM-LFM 信号。

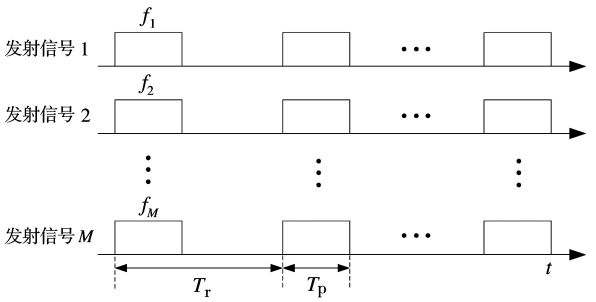

图 3　OFDM-LFM 多通道发射脉冲示意图

文献[6]对子带宽 B_s 等于、小于和大于频率间隔 f_Δ 三种情况进行了详细讨论。在 $f_\Delta = B_s$ 的临界状态条件下,可以避免接收信号处理中综合匹配输出产生的两类旁瓣[6]。

本文设计的 MIMO 雷达 OFDM-LFM 信号产生器单通道的 LFM 脉冲信号测试参数为:脉冲时宽 $T_p = 20\,\mu s$,脉冲重复周期 $T_r = 100\,\mu s$,$f_p = 50\,kHz$,相邻发射通道中心频点间隔 $f_\Delta = B_s = 1\,MHz$,8 通道发射信号总带宽为 $B = B_s + (M-1)f_\Delta = 8\,MHz$。

3　OFDM-LFM 波形产生器的设计

根据 OFDM-LFM 信号产生原理设计的 MIMO 雷达 OFDM-LFM 波形产生器结构框图如图 4 所示。系统采用 FPGA 芯片 EP2C8Q208C8N 作为 OFDM-LFM 波形控制模块,FPGA 通过 RS422 串口接收主控计算机的控制指令和各通道波形配置参数。AD9910 及带通滤波器构成数字中频合成模块[7]。波形控制模块通过串行端口配置 AD9910 的调制模式和波形参数。AD9910 中频直接频率合成方式产生 LFM 信号,经带通滤波器输出后与本振混频滤波后输出射频信号。

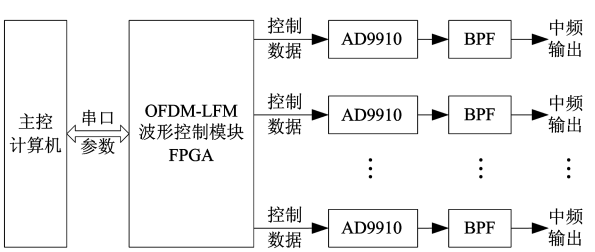

图 4　OFDM-LFM 波形产生器结构框图

各通道的 AD9910 通过多器件同步功能实现时钟状态同步,保证各子脉冲发射同步[8]。一片 AD9910 同步时钟发生器输出 SYNC_OUT 信号经过同步时钟分配为 8 路边沿对齐的同步 SYNC_IN 信号。AD9910 的同步逻辑功能强制内部时钟发生器进入预定义状态,与外部 SYNC_IN 引脚上外部同步信号保持一致。

3.1　波形产生器功能

OFDM-LFM 波形产生器的参数设置和模式控制由主控计算机和波形控制模块两个部分共同完成。主控计算机和波形控制模块的主要功能如下:

(1) 主控计算机功能

① 波形产生器各通道工作模式和工作状态的设置。工作模式包括 2 子阵 MIMO、4 子阵 MIMO 和 8 子阵 MIMO 三种模式,工作状态包括待机、发射通道自检、接收通道自检和正常工作四种状态。

② 波形数据的配置。配置参数有雷达周期、各通道中心工作频点、中心频点间隔、线性调频斜率方向、线性调频带宽字、线性调频频率步进字和线性调频步进时间间隔字等。

(2) OFDM-LFM 波形控制模块功能

① 配置 AD9910 串行端口为三线式串行编程模式,使能 PLL,设置 PLL 分频倍数,使能数字斜坡发生器,设置各项数字斜坡模式调制参数。

② LFM 信号扫频方向控制,脉冲发射时间控制,各通道发射信号的同步控制。

3.2　LFM 信号的产生

本文设计的 MIMO 雷达的 OFDM-LFM 信号的单个通道信号带宽为 1 MHz 的窄带 LFM 信号,单个通道 LFM 信号采用 ADI 公司的直接数字频率合成器(DDS)AD9910 合成中频信号。AD9910 内置 14 位 DAC、1024 字×32 位的 RAM 和 PLL REFCLK 乘法器,频率最小分辨率 0.23 Hz,1 kHz 偏移、400 MHz 载波时相位噪声低于 −125 dBc/Hz。AD9910 通过编程内部锁相环倍频器可以从外部低频时钟产生最高 1 GHz 的系统参考时钟,能够输出频率高达 400 MHz 的频率捷变正弦波形。AD9910 通过串行 I/O 端口控制,具有调相、调幅功能,利用其同步逻辑可以实现多片 AD9910 同步。AD9910 支持单频调制、RAM 调制、数字斜坡调制和并行数据端口调制四种工作模式。另外,AD9910 的输出振幅键控(OSK)功能通过独立的数字线性斜坡发生器可以直接驱动 DDS 的振幅参数。

AD9910 数字斜坡调制模式由集成的数字斜坡发生器(DRG)提供 DDS 控制参数。DRG 的 DDS 控制参数分辨率为 32 位,可以从编程设定的斜坡起点到终点扫描相位、频率和振幅。

DRG 的斜坡控制参数为频率参数以扫频方式产生 LFM 信号。DRG 产生扫频信号工作方式如图 5 所示,数字斜坡下限值为扫频频率的起点,数字斜坡上限为扫频频率的终点,数字斜坡方向为扫频信号的 chirp 方向,数字斜坡正负步进步长 $\pm\Delta f$ 为扫频正负向频率步进值,数字斜坡正负步进时间间隔 $\pm\Delta t$ 为扫频步进时间间隔。DRCTL 引脚控制 DRG 的斜坡方向,逻辑 1 时斜坡方向为正,逻辑 0 则斜坡方向为负。扫频频率到达扫频上下限值,DROVER 输出逻辑 1,数字斜坡结束。

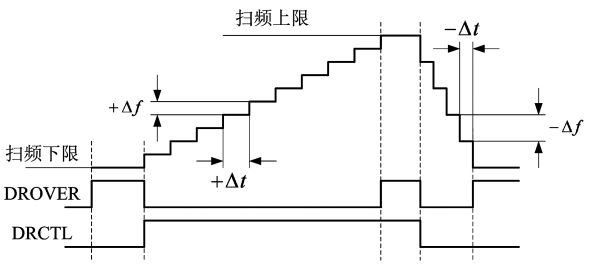

图 5 DRG 产生扫频信号示意图

3.3 AD9910 产生 LFM 信号的性能分析

LFM 信号的非线性度是描述扫频产生线性调频信号性能参数的重要指标[9]。设 $|f_e|_{\max}$ 为工作带宽内输出信号相对于理想信号的最大频偏,则 DDS 通过扫频方式实现线性调频信号的非线性度定义为最大频偏 $|f_e|_{\max}$ 与扫频带宽 B 之比,即

$$L=\frac{|f_e|_{\max}}{B} \tag{6}$$

数字斜坡调制模式下频率步进值 Δf_{DRG} 最小可以达到 0.23 Hz,步进时间间隔 Δt_{DRG} 最小为 4 ns。本文设计的 MIMO 雷达信号发生器单通道 LFM 信号的脉冲宽度为 20 μs、信号带宽为 1 MHz,这里设置步进时间间隔 $\Delta t_{\mathrm{DRG}}=4$ ns,则 LFM 信号步进阶梯数为

$$N=\frac{T}{\Delta t_{\mathrm{DRG}}}=\frac{20\ \mu\mathrm{s}}{4\ \mathrm{ns}}=5000 \tag{7}$$

LFM 信号频率步进值

$$\Delta f_{\mathrm{DRG}}=\frac{B}{N}=\frac{1\ \mathrm{MHz}}{5000}=200\ \mathrm{Hz} \tag{8}$$

则在数字斜坡调制模式下产生的 LFM 信号的非线性度:

$$L_{\mathrm{DRG}}=\frac{|f_e|_{\max}}{B}=\frac{\Delta f_{\mathrm{DRG}}}{2B}=0.01\% \tag{9}$$

数字斜坡调制模式以扫频方式产生的 LFM 信号可以很小的频率步进值和时间步进值获得优秀的线性度。

3.4 LFM 脉冲的产生

利用 AD9910 的 OSK 功能调制数字斜坡模式下的 LFM 信号的振幅参数可以实现 LFM 脉冲的产生。FPGA 控制 AD9910 实现 OSK 调制的原理图如图 6 所示。FPGA 控制 DRCTL 电平决定数字斜坡的方向,控制 DRHOLD 为高可以使数字斜坡发生器保持当前状态。在 OSK 的手动模式中,OSK 引脚输入逻辑为 0 时,输出振幅强制为 0;OSK 引脚逻辑为 1 时,输出振幅由振幅比例因子决定。利用数字斜坡发生器的 DROVER 信号作为 OSK 引脚的控制信号,DROVER 引脚信号在 FPGA 中反相后输出到 OSK 引脚。当数字斜坡发生器扫频到达限值,DROVER 输出高电平经过反相后控制 OSK 电平为 0,强制 AD9910 输出幅度为 0。AD9910 的 IO_UPDATE 由 FPGA 中波形控制模块提供,IO_UPDATE 信号上升沿触发 AD9910 寄存器值由 I/O 端口缓冲器中导入[10],在 IO_UPDATE 信号上升沿之后的 SYNC_CLK 上升沿开始新一次 LFM 脉冲输出。因此,IO_UPDATE 周期等于 LFM 脉冲重复周期 T_r。数字字斜坡模式完成一次扫频的时间为单个脉冲的时宽 T_p,OSK 信号的重复周期为 LFM 脉冲重复周期 T_r。多路 AD9910 的 IO_UPDATE 信号统一由 FPGA 提供,可实现多路 LFM 脉冲的同步输出,PCB 布线时需注意 FPGA 到各片 AD9910 的 IO_UPDATE 信号线等长。

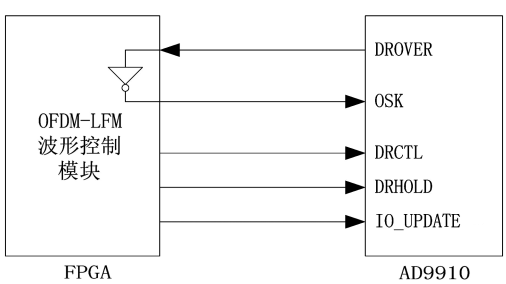

图 6 AD9910 OSK 调制控制示意图

数字斜坡模式下实现 OSK 调制的主要寄存器配置如下:CFR2[19]置 1,使能数字斜坡发生器;CFR2[21∶20]置 00,DDS 控制参数选择频率;数字斜坡 CFR2[18∶17]置 00,非驻留高位和非驻留地位功能禁用;将 LFM 参数对应的寄存器值写入数字斜坡限值寄存器、数字斜坡步长寄存器和数字斜坡速率寄存器值;CFR1[9]置 1,使能 OSK 功能;CFR1[8]置 0,使能手动 OSK 功能;CFR1[23]置 1,使能外部 OSK 引脚手动控制功能;CFR1[14]置 1,使能自动清零数字斜坡累加器功能,实现 IO_UPDATE 之后数字斜坡累加器复位;向 ASF[15∶2]写入振幅比例因子。

4　测试结果

MIMO 雷达 OFDM-LFM 波形产生器产生 8 路 OFDM-LFM 信号中频的中心频点依次为 57,58,59,60,61,62,63 和 64 MHz。图 7 和图 8 是带宽为 1 MHz、中心频点分别为 60 MHz 和 61 MHz 的相邻单通道连续波 LFM 信号的中频频谱,测试频谱仪为 R&S 公司的 FSP-K9。两个通道数字斜坡上下限分别为 60.5 MHz、59.5 MHz 和 61.5 MHz、60.5 MHz。从图 7 和图 8 可以看出,信号产生器产生的 1 MHz 窄带 LFM 信号包络非常平坦,带内波动很小,通道和通道之间的幅度一致性较好。经测试,信号的无杂散动态范围(SFDR)约为 80 dB。

图 9 和图 10 是时宽为 20 μs、带宽为 1 MHz、中心频点为 60 MHz 单通道 OSK 功能调制的 LFM 脉冲的时域波形,测试示波器为 Tektronix 公司的 TDS3052B。图 9 所示的 CH1 为 LFM 脉冲,CH2 为 IO_UPDATE 信号;图 10 所示的 CH1 为 LFM 脉冲,CH2 为 OSK 信号。从上述 LFM 脉冲的时域波形可以验证:LFM 脉冲在 IO_UPDATE 信号上升沿开始扫频输出,当 OSK 低电平时其输出幅度为 0。AD9910 设计的信号产生器能够产生优秀的 LFM 脉冲信号。

5　结束语

本文在对 MIMO 雷达 OFDM-LFM 波形特点进行讨论的基础上提出一种 OFDM-LFM 波形产生方案。设计出了基于数字中频合成的 MIMO 雷

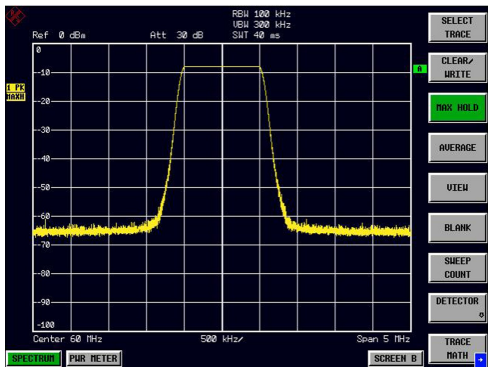

图 7　中心频点 60 MHz 的单通道 LFM 信号频谱

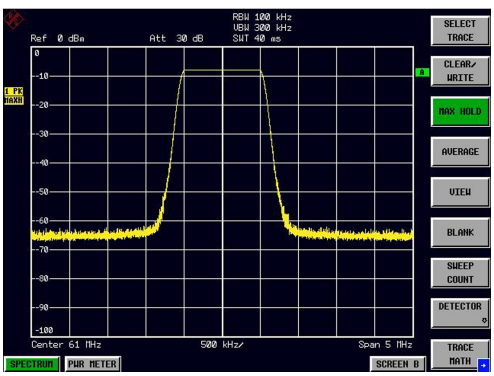

图 8　中心频点 61 MHz 的单通道 LFM 信号频谱

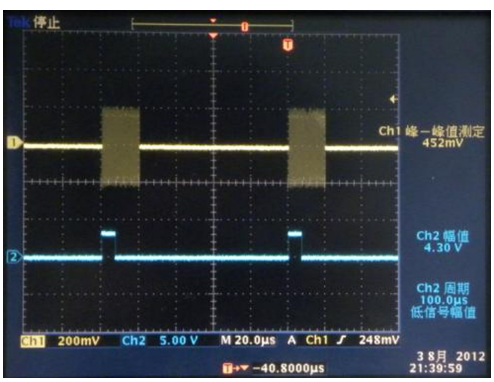

图 9　LFM 脉冲和 IO_UPDATE 信号的时域波形

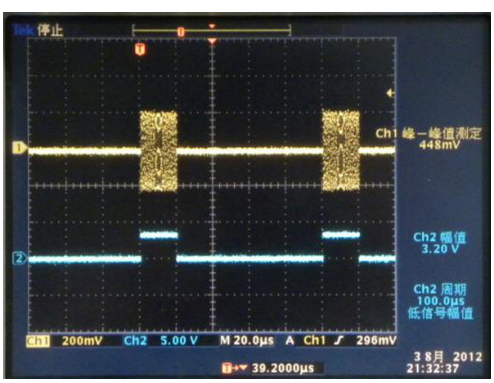

图 10　LFM 脉冲和 OSK 信号的时域波形

(下转第 86 页)