

# 正交通道中 I/Q 不平衡估计与补偿研究

周 翔, 吕幼新

(电子科技大学, 四川成都 611731)

**摘 要:** I/Q 通道普遍存在于信号处理的正交调制和解调过程中。严格的正交过程要求 I/Q 两个通道的增益和时延完全一致且 I/Q 两路中都不存在直流分量,同时还要求 I 路和 Q 路的本振信号的相位精确的相差  $90^\circ$ 。然而,在实际的信号处理过程中,难免会存在误差和不匹配的情况。基于 I/Q 通道不平衡的基础,研究各种不平衡因子对 I/Q 通道性能的影响。利用提出的补偿算法,在对存在不同幅度和相位不平衡的情况进行仿真,仿真结果表明在不同的不平衡条件下,该算法都能够有效地补偿不平衡,改善了系统性能。

**关键词:** 正交通道; I/Q 不平衡; 信号处理; 数字补偿

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2017)01-0008-05

## Research on Estimation and Compensation of I/Q Imbalance in Orthogonal Channels

ZHOU Xiang, LYU Youxin

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** I/Q channels are widely existed in the process of quadrature modulation and demodulation of signal processing. Strict orthogonal process requires that the gain and delay of I/Q two channels are exactly the same and I/Q channels do not exist DC component. Besides, the phases of the LO signals of the I channel and the Q channel are required to have a accurately difference of 90 degrees. However, in the actual signal processing, it is inevitable that there will be error and mismatch. Based on the imbalance of I/Q channels, the effects of different factors on the performance of I/Q channels are studied. In this paper, the compensation algorithm is used to simulate the different amplitude error and the phase error. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively compensate the imbalance and improve the performance of the system under different unbalanced conditions.

**Key words:** quadrature channel; I/Q imbalance; signal processing; digital compensation

## 0 引 言

在雷达系统和通信系统中,随着数字化技术的发展和芯片处理数据速度的提高,人们将信号处理的工作量越来越多地放在数字域<sup>[1]</sup>,包括在数字域进行的 I/Q 两路正交调制与正交解调。然而,在实际信号处理过程中,所用器件的不同、电路设计的不同、PCB 布局的误差都会使 I 路和 Q 路的信号产生相位和幅度的差异,进而造成 I/Q 信道的不平衡,产生镜像的干扰信号,且在基带处理信号时提高误码率。

信号的 I/Q 不平衡失真主要为幅度不平衡、相位不平衡、直流分量三个部分<sup>[2]</sup>。在正交调制或

解调中,输入到 I/Q 两路的信号在两个通道中的增益往往存在差异,这就是幅度不平衡失真;在 I/Q 两路中,本振信号相位不会严格相差  $90^\circ$ ,其误差就是相位不平衡<sup>[3]</sup>;直流分量则往往是由本振泄漏造成。本文将分析两类由于信号不平衡造成的所需信号的干扰,并研究对不平衡的补偿。

## 1 I/Q 相位幅度不平衡

在上变频和下变频系统中,当存在 I/Q 两路信号时,不可避免地存在幅度和相位的不平衡。图 1、图 2 分别描述了正交过程中上下变频系统存在相位和幅度不平衡的情况<sup>[4]</sup>。在同相通道和正交通道中,引入相位失配因子和幅度失配因子,并在

两个通道中分别引入直流分量  $\kappa$  和  $\gamma$ 。但是,对幅度和相位而言,分析中往往只关心它们的幅度差和相位是否正交。因此,为了方便分析,将其中一个通道作为幅度和相位参考,将幅度增益和相位偏差置于另一个通道中<sup>[5]</sup>,从而通过正交的解调方式,得到解调后的信号。

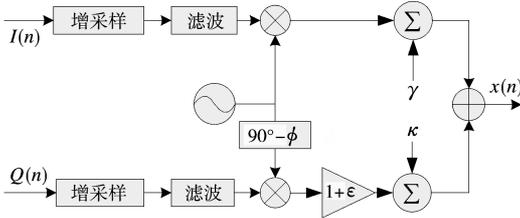


图1 相位幅度失配误差的正交调制过程

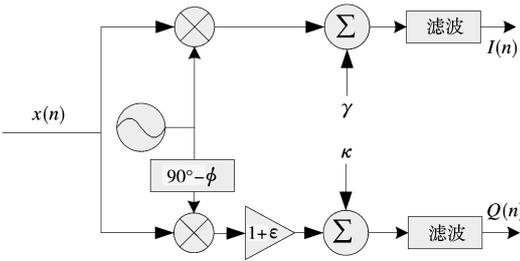


图2 相位幅度失配误差的正交解调过程

由图1、图2可知,在正交调制和解调过程中均存在相位和幅度不平衡。以图2为例,经过正交解调的两路信号合成,得到信号  $x(n)$  :

$$\begin{aligned}
 x(n) &= A \cos\theta + \gamma + j[A(1+\epsilon)\sin(\theta-\phi) + \kappa] = \\
 &= A\{[1-j(1+\epsilon)\sin\phi]\cos\theta + \\
 &= j(1+\epsilon)\cos\phi\sin\theta\} + (\gamma + j\kappa) = \\
 &= A(\alpha \cos\theta + j\beta \sin\theta) + (\gamma + j\kappa) \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中,  $\alpha = 1 - j(1 + \epsilon)\sin\phi$ ,  $\beta = (1 + \epsilon)\cos\phi$ ,  $A$  为 I/Q 两路的理想幅度,  $(1 + \epsilon)$  为幅度失配因子,  $\phi$  为相位失配因子,  $\kappa$  和  $\gamma$  为 I/Q 两路引入的直流分量。  $\theta$  包含需要的信息,这里不考虑  $\theta$  的时变性。常数  $\alpha$  为复数,而  $\beta$  为实数。显然,当不存在失配误差时,即  $\epsilon = \phi = 0, \alpha = \beta = 1$ 。

使用等式:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{\alpha - \beta}{2} \\
 \beta &= \frac{\alpha + \beta}{2} - \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (2)
 \end{aligned}$$

合并相同幅度项,得

$$\begin{aligned}
 x(n) &= A\left[\frac{\alpha + \beta}{2}(\cos\theta + j\sin\theta) + \frac{\alpha - \beta}{2}(\cos\theta - j\sin\theta)\right] + \\
 &= (\gamma + j\kappa) =
 \end{aligned}$$

$$A\left[\frac{\alpha + \beta}{2}e^{j\theta} + \frac{\alpha - \beta}{2}e^{-j\theta}\right] + (\gamma + j\kappa) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,当存在幅度或相位误差时,复信号  $x(t)$  不仅包含所需的信号分量  $A \exp[j\theta(t)]$ ,而且包含一个具有不同幅度、与所需信号的频率成镜像的分量,还包含直流分量。在实际应用过程中,镜像信号由幅度和相位的不平衡造成,直流分量由本振泄漏造成。

而在雷达信号处理过程中,对空中目标进行检测与跟踪存在失配的情况下,会产生一个虚假目标信号,其频率是实际多普勒频率的负值,且存在直流分量等效于零多普勒处的虚假目标信号,造成虚警。那么,存在失配误差时,幅度或相位的不匹配程度如何,会对系统产生怎样的影响,本文将对其重要性进行评价。这里考虑镜像分量与所需的信号功率比值<sup>[6]</sup>。

由式(3)可得到镜像与所需信号的功率比为

$$P_r = \frac{|\alpha - \beta|/2|^2}{|\alpha + \beta|/2|^2} = \frac{[1 - (1 + \epsilon)\cos\phi]^2 + [(1 + \epsilon)\sin\phi]^2}{[1 + (1 + \epsilon)\cos\phi]^2 + [(1 + \epsilon)\sin\phi]^2} \quad (4)$$

根据图2,  $\epsilon$  为 I/Q 两路的相对幅度误差,  $\phi$  为相位误差。对镜像功率与信号功率的比值进行仿真,如图3所示。

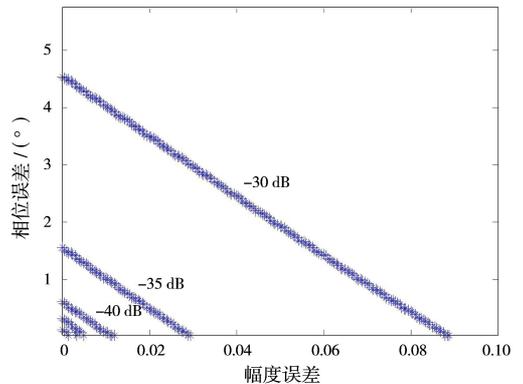


图3 由 I/Q 失配,幅度和相位失配镜像信号的相对功率

由图3可以看出,失配镜像信号相对信号的功率,随着相位误差和幅度误差的增加而增大,且在失配量较小时,随着误差的增大,镜像功率迅速增加。图3中,镜像分量与信号分量功率的比值从左到右依次为-50,-45,-40,-35和-30 dB。

而对于调制过程,同样存在幅度和相位的不平衡,其分析过程与解调类似。

为了更直观地观测 I/Q 不平衡对调制解调过

程的影响,下面对存在不平衡的正交解调过程进行仿真。参数设置:频率为 100 MHz 的单频信号,本振信号频率为 60 MHz,将信号搬到中频为 40 MHz 的频带上,相位不平衡为  $2^\circ$ ,幅度不平衡为 0.02,加入直流分量为 0.001 和 0.001。仿真结果如图 4 所示。

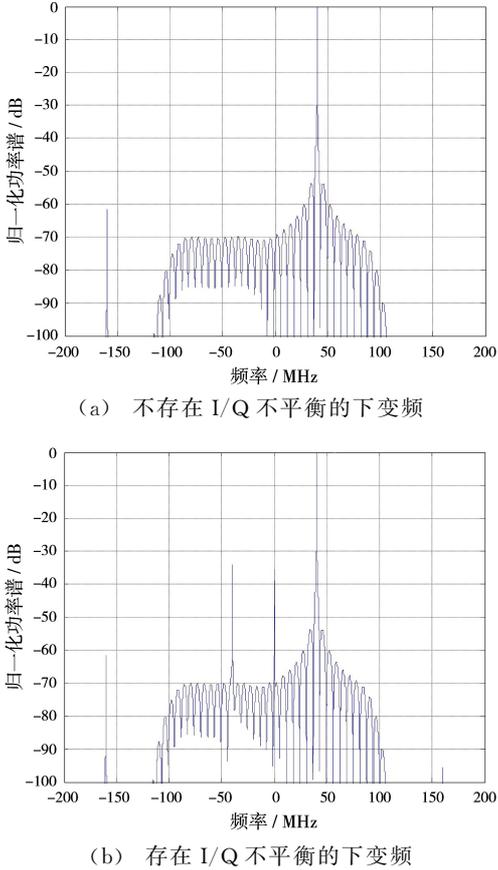


图 4 是否存在不平衡的正交解调功率谱对比

如图 4 所示,存在幅度和相位时,在中心频率为  $-40$  MHz 处出现了不期望的干扰信号,其归一化功率谱约为  $-33$  dB,与之前分析一致。值得注意的是,加入的直流分量在零频处也产生了干扰,因此对直流分量的抑制也很有必要。

同理,在正交上变频系统中,设置参数为:频率为 40 MHz,相位不平衡为  $2^\circ$ ,幅度不平衡为 0.02,通过正交调制将信号搬到频率为 100 MHz 的频带上。

从图 5 可以看出,存在 I/Q 不平衡,幅度误差和相位误差一致的情况下,频率为 100 MHz 的信号,以 60 MHz 载频,在 20 MHz 处产生镜像频率,并且其镜像频率功率与图 3 中解调的镜像频率功率谱相当。

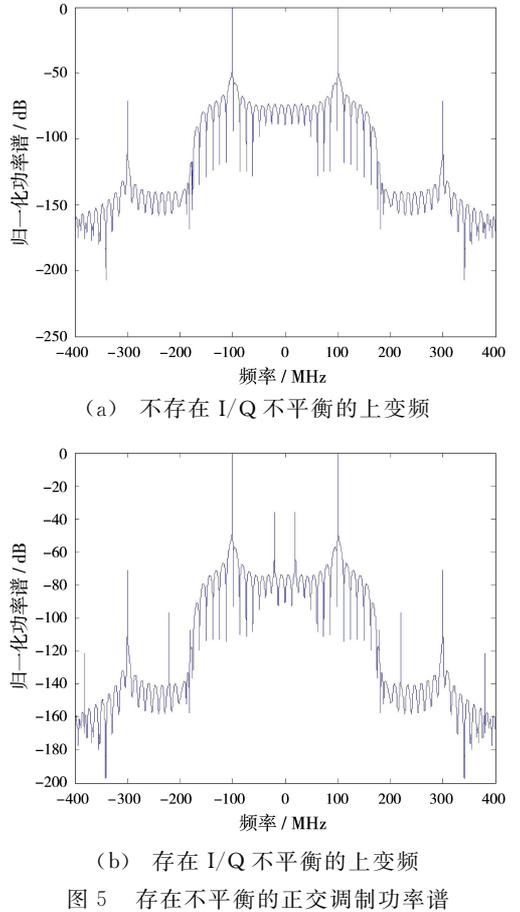


图 5 存在不平衡的正交调制功率谱

## 2 不平衡补偿分析

既然存在 I/Q 不平衡,且当 I/Q 两路的相位和幅度不平衡较大时,会产生后续信号处理过程的错误率,那么就应对 I/Q 不平衡进行补偿,以减小其带来的误差。

从模拟域来说,优化硬件电路可以改善 I/Q 不平衡带来的影响,包括选用更好的混频器、放大器和低通滤波器,优化 PCB 电路等方法,尽量保证 I 路和 Q 路的平衡。但这种方法会大大提高成本,并且无法完全消除不平衡<sup>[7]</sup>。因此,采用数字补偿技术是目前通用的方法。它对接收到的基带信号进行数字补偿,大大降低了 I/Q 不平衡带来的镜像信号影响。

本节将对 I/Q 存在的不平衡性进行补偿方法的研究。首先,对于相位幅度的不平衡,由图 2 可以看出:

$$I = A \cos(\theta) + \gamma \quad (5)$$

$$Q = (1 + \epsilon)A \sin(\theta + \phi) + \kappa \quad (6)$$

对于期望的信号,希望  $I' = A \cos(\theta)$ ,  $Q' =$

$A \sin(\theta)$ 。于是,建立 IQ 和  $I'Q'$  之间的线性关系:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \cos\theta \\ A \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}a_{12} \\ a_{21}a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I) - (\gamma) \\ (Q) - (\kappa) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}a_{12} & A \cos\theta \\ a_{21}a_{22} & A(1+\epsilon)\sin(\theta-\phi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

若要满足式(7),则需要  $a_{11}=0, a_{12}=0$ 。利用三角等式,解得

$$a_{21} = \tan\phi, a_{22} = \frac{1}{(1+\epsilon)\cos\phi} \quad (8)$$

所以将式(8)代入式(7)可以得到

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tan\phi & \frac{1}{(1+\epsilon)\cos\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I) - (\gamma) \\ (Q) - (\kappa) \end{bmatrix} \quad (9)$$

令

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tan\phi & \frac{1}{(1+\epsilon)\cos\phi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

接下来,估计  $\phi, \epsilon, \kappa, \gamma$  的值。对于直流分量  $\gamma$  和  $\kappa$ ,可以对系统输入没有直流分量的一个正弦信号,则输出有

$$\begin{aligned} d_i &= 1/N \sum_{i=0}^{n-1} x_i \\ d_q &= 1/N \sum_{i=0}^{q-1} x_q \end{aligned} \quad (11)$$

这里,令  $\gamma = d_i, \kappa = d_q$ ,可以估算出图 2 中接收机带来的直流偏置分量。然后,在补偿阶段就可以将其抵消。

而对于幅度和相位误差的估计,可以基于信号自身的统计特性进行校准。当需要校准的信号具有如下的期望统计特性时:

$$\begin{aligned} E\{I'(n)Q'(n)\} &= 0 \\ E\{I'^2(n)\} &= E\{Q'^2(n)\} \end{aligned} \quad (12)$$

那么,对需要校准的信号进行类似的处理(这里不考虑直流分量):

$$\begin{aligned} E\{I^2(n)\} &= E\{I'^2(n)\} \\ E\{Q^2(n)\} &= (1+\epsilon)^2 E\{Q'^2(n)\} \\ E\{I(n)Q(n)\} &= -(1+\epsilon)\sin\phi E\{I'^2(n)\} \end{aligned} \quad (13)$$

于是,可以估计出幅度和相位误差值为

$$\begin{aligned} \epsilon &= \sqrt{\frac{E\{Q^2(n)\}}{E\{I^2(n)\}}} - 1 \\ \phi &= -\arcsin \frac{E\{I(n)Q(n)\}}{\sqrt{E\{I^2(n)\}E\{Q^2(n)\}}} \end{aligned} \quad (14)$$

得到  $\epsilon$  和  $\phi$  的误差估计后,就可以构造出矩阵  $P$ 。

同样,对图 4 中存在相位和幅度误差的解调过程进行 I/Q 补偿,结果如图 6、图 7 所示。其中,图 6 为全局图,图 7 为图 6 框出部分的细节图。

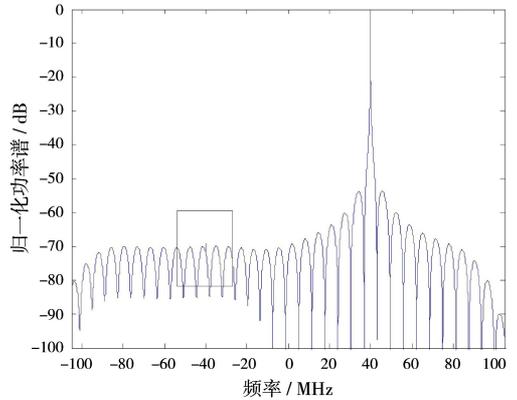


图 6 经过补偿之后的 I/Q 不平衡

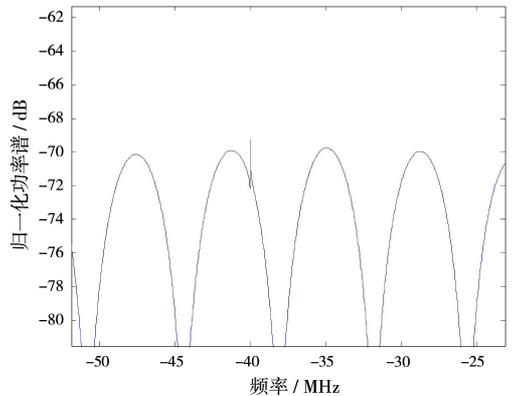


图 7 图 6 框出部分的细节

由图 6、图 7 和图 4 的对比可以发现,进行 I/Q 补偿后的下变频操作,在其镜像频率  $-40$  MHz 处的功率谱大大降低,仅仅只有很小的镜像功率。与没有补偿前相比,镜像功率谱降低了 35 dB 左右,大大提高了系统性能。

从表 1 中的数据可以看出,随着幅度相位不平衡量的增加,其镜像功率不断增加,但通过 I/Q 不平衡补偿后,其镜像功率可大大降低,说明该补偿算法可以很好地提高系统的性能。

表 1 在观测点数为 10000 个点时不同幅度相位误差估计

幅度误差	相位误差	幅度误差估计	相位误差估计/(°)	补偿前镜像功率/dB	补偿后镜像功率/dB
0.02	2°	0.020 2	2.012	-34	-69
0.03	3°	0.030 2	3.009	-30	-68
0.04	4°	0.040 2	4.011	-28	-68
0.05	5°	0.050 2	5.010	-26	-68
0.06	6°	0.060 2	6.010	-24	-68

图 8 的结果显示,相位幅度估计误差随着统计点数的增加,其估计值越来越接近真实的 I/Q 不平衡值。在统计点数为 4 000 时,幅度的估计误差

已经接近 0.05%，相位估计误差已经低于 0.05°。根据实际使用情况，可选择适当的统计点数来补偿 I/Q 不平衡带来的镜像误差。

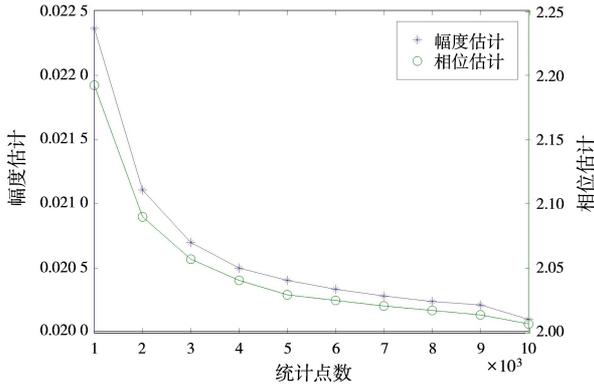


图 8 不同统计点数下幅度和相位误差估计值

近年来, I/Q 通道不平衡的误差校正被越来越多地研究。在时域和频域中, 新的校正方法被不断提出。在文献[8]中, 提出了基于压缩感知的稀疏信道估计算法; 在文献[9-10]中, 提出了在 MIMO-OFDM 接收机中的不平衡补偿算法。

### 3 结束语

本文针对接收机和发射机的 I/Q 两路不平衡问题进行研究, 分析了造成 I/Q 两路不平衡的原因, 并针对 I/Q 幅度和相位不平衡的量级进行分析, 得出了由于不平衡引起的镜像信号功率随着不平衡量的变化。在此基础上, 研究补偿 I/Q 不平衡的方法。通过仿真得出, 该补偿算法可以自适应地对不平衡量进行估计, 且在统计量较大时, 可以有效补偿 I/Q 不平衡带来的影响, 大大提高了系统的性能。

#### 参考文献:

- [1] LI W, ZHANG Y, HUANG L, et al. Low Cost Estimation of IQ Imbalance for Direct Conversion Transmitters [C] // IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Beijing: IEEE, 2014:1-6.
- [2] LI W, ZHANG Y, WANG J, et al. Diode-Based IQ Imbalance Estimation in Direct Conversion Transmitters[J]. Electronics Letters, 2014, 50(5): 409-411.

- [3] OKA H, AHN C J, OMORI T, et al. IQ Imbalance and Carrier Frequency Offset Compensation Schemes for TFI-OFDM[C] // International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Kuching, Malaysia: IEEE, 2014:17-22.
- [4] MOGHADDAM M H, ASSARZADE G. Both Transmitter and Receiver IQ Imbalance Compensation and CFO Synchronization for LDPC-Coded MIMO-OFDM Systems Using OSTBC Algorithms[C] // 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering, Teheran, Iran: IEEE, 2014:1383-1388.
- [5] Richards M A. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [6] 郗蕴天, 陈春. 一种补偿低中频接收机 I/Q 不平衡的方法[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(6):604-608. XI Yuntian, CHEN Chun. A Compensation Method for I/Q Imbalance of Low-IF Receiver [J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(6): 604-608. (in Chinese)
- [7] 胡伟光. 宽带零中频接收机 IQ 不平衡校准技术研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015:12-16.
- [8] 李妍妍. IQ 不平衡 OFDM 系统的信道估计与补偿算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013:30-33.
- [9] 刘元, 彭端, 尹长川. 高性能的 MIMO-OFDM 接收机 IQ 不平衡补偿新算法[J]. 电路与系统学报, 2009, 14(2):90-94.
- [10] BOK J, RYU H G. Analysis and Suppression of Phase Noise and IQ Imbalance for Dual-Band MIMO-OFDM[C] // International Conference on Information Networking, Phuket, Thailand: KIIE, 2014:320-324.

#### 作者简介:



周翔 男, 1991年8月生于四川泸州, 电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理。  
E-mail: slxiangz@163.com



吕幼新 男, 1963年6月生, 电子科技大学电子工程学院教授, 信号与系统课程首席教师, 主要研究方向为雷达信号理论、高速实时信号处理。