

一种新的 SAR 窄带干扰抑制方法

孔舒亚¹ 吴彦鸿² 俞道滨¹

(1. 装备学院研究生管理大队 北京 101416; 2. 装备学院光电装备系 北京 101416)

摘要: 合成孔径雷达易受电视网、通信网等无线设备的电磁干扰,严重影响成像质量。本文在分析 SAR 受到的干扰特点和信号模型的基础上,提出了一种基于压缩感知的 SAR 窄带干扰抑制方法。该方法根据 SAR 回波信号和窄带干扰信号在 Chirplet 字典上的调频斜率参数不同,在 SAR 回波信号重构过程中对干扰信号进行筛选并抑制,再把去除干扰后的压缩数据利用常规 SAR 成像算法进行成像。仿真结果表明,该方法不仅能有效抑制窄带干扰,而且大大减少了 SAR 系统成像处理的数据量,验证了本文所提方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;窄带干扰抑制;压缩感知;Chirplet 字典;调频斜率

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

New method for SAR narrowband interference suppression

Kong Shuya¹ Wu Yanhong² Yu Daobin¹

(1. Department of Graduate Management, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Department of Optical and Electronic Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Synthetic aperture radar is susceptible to electromagnetic interference by television networks, communication networks and other wireless devices, which seriously damages the image quality. Under the premise of the analysis of the characteristics of interference and signal model, a method of SAR narrowband interference suppression based on compressed sensing was proposed. According to the difference of the FM slope of the SAR echo signal and the narrowband interference signals in the Chirplet dictionary, interference signal was filtrated and suppressed in the reconstruction of the SAR echo signal, and then use the conventional method to achieve the SAR image with the compressed data in which the disturbance is removed away. The simulation results show that the method not only can effectively suppresses narrowband interference, but also greatly reduces the amount of data in SAR imaging processing system, which demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: synthetic aperture radar; narrowband interference suppression; compressed sensing; Chirplet dictionary; FM slope

1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种主动式微波成像传感器,它在距离向利用脉冲压缩技术,方位向利用合成孔径技术进行高效的数据处理,能够获得较高的处理增益,具有穿透能力强和全天时、全天候工作的能力,在资源勘测和军事侦察等方面发挥着越来越重要的作用^[1]。然而在 SAR 系统工作的同一频段通常会存在各类地面通信信号、电视网和无线电广播等窄带干扰(narrowband interference, NBI),对 SAR 的成像造成严重影响^[2];强

的窄带干扰会在 SAR 图像上形成亮线,降低对弱目标的识别能力,甚至完全覆盖目标场景。因此,研究如何检测并抑制窄带干扰,对 SAR 成像具有十分重要的意义。

现有的 NBI 抑制方法可分为参数化方法和非参数化方法两类^[3]。参数化方法的主要思想是对 NBI 进行建模,将 NBI 看作多个幅度恒定的单频信号进行叠加的模型或符合 AR 模型的随机过程^[4],利用最小均方误差(LMS)或者最大似然(maximum likelihood, ML)准则等方法估计出信号模型的频率、幅度和相位,然后利用估计-相减结构从原始数据中滤除估计得到的 NBI^[5]。理论上,如果考虑到模型参数

收稿日期:2015-12

足够完备,估计精度足够高,参数化 NBI 抑制方法能够得到最优解,但实际上,在 NBI 高度密集的情况下建模会比较复杂,会产生模型参数误差和计算量大等问题^[6]。非参数化方法通常是根据 NBI 的信号特征,利用谱估计的方法对干扰和信号进行识别,然后在时频域用滤波的方法进行 NBI 的抑制。非参数化方法主要有频域滤波法、子空间滤波法及成像相减法等^[5]。频域陷波法是通过将 NBI 在频域的位置置零的方式来抑制干扰。这种方法操作简单,且不用复杂的 NBI 建模和参数估计;然而频域陷波在抑制干扰的同时,也会把相同位置的信号滤除,造成信号能量损失,引起主瓣展宽和旁瓣抬高^[7]。子空间滤波法是把干扰和信号分别投影,然后对干扰对应的子空间进行滤除,这种方法对平稳 NBI 的抑制效果较好,并可以抑制方位时变的 NBI,而对距离时变的干扰进行抑制时会产生较大的信号损失^[7]。成像相减法通过一个旁听通道来获取不含信号的 NBI,然后在图像数据中直接滤除;但是该方法需要单独的旁听通道,且还要考虑旁听通道中的 NBI 与信号中的 NBI 的配准问题^[8]。

综上,现有 NBI 抑制方法虽然都能实现较好的 NBI 抑制效果,但是存在能量损失、计算量大以及建模复杂度高等问题。线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号具有大的时宽带宽积,是目前 SAR 系统普遍采用的信号波形,其特点是在信号持续期间频率连续变化,即调频斜率不为零。研究表明,LFM 信号和 NBI 在 chirplet 字典上都具有稀疏性^[9],但 NBI 的调频斜率为零,根据这个特点,可利用压缩感知(compressed sensing, CS)技术对 SAR 回波信号进行压缩测量和重构,在重构过程中将调频斜率为零的原子对应系数置零,即可抑制掉 NBI 分量,再把去除干扰后的回波数据进行常规 SAR 成像。这种方法不仅能减少信号能量损失,由于是在压缩域进行,还能降低 LFM 信号大的带宽带来的计算量,减轻 SAR 数据处理系统负担。

2 SAR 窄带干扰特点与信号模型

虽然 SAR 的二维匹配滤波过程在一定程度上能够抑制干扰,但 NBI 的功率一般高于 SAR 的系统噪声,对 SAR 成像仍会造成未知的影响,NBI 通常具有以下特点:1)功率高,窄带干扰一般由地面的通信网和雷达产生,这些设备往往具有很高的发射功率,并且 NBI 是单程传播,相对于 SAR 发射信号的双程传播能量损失较小,所以回波中干扰功率大于信号功率;2)带宽窄,电视信号、各种无线电通信网的带宽都有明确的规定,它们都被限制在较窄的带宽内,在频域具有明显的窄带特性,在 SAR 信号带宽内表现为尖峰,而 SAR 的回波具有较为平坦的功率谱。

在某一方位时刻,被干扰的 SAR 回波信号 $r = \{r_k | k = 1, \dots, N_f\}$ 可以写成以下形式:

$$r = s + j + w \quad (1)$$

式中: $s = \{s_k | k = 1, \dots, N_f\}$, $j = \{j_k | k = 1, \dots, N_f\}$,

$w = \{w_k | k = 1, \dots, N_f\}$ 分别是不含干扰的回波信号、窄带干扰和系统噪声, N_f 为距离向回波采样点个数。在 SAR 的接收机频带内, w_k 可以视为同分布的零均值复高斯白噪声。在 SAR 的成像场景中,沿距离向的目标是随机分布的,目标回波信号 s 的功率谱较为平坦,并且 SAR 接收机的采样频率仅略大于系统带宽,所以可把 s 和 w 看成高斯白噪声序列。

令 $z = j + w$, 则(1)式可写为:

$$r = s + z \quad (2)$$

式中: $z = \{z_k\}$ 近似为平均功率为 σ_z^2 的同分布的高斯白噪声。

根据 NBI 的特点,一个方位向接收到的 NBI 可视为 n 个单频信号的叠加,在时域就是 n 个复正弦信号的和,如式(3)所示:

$$j_k = \sum_{n=1}^n A_n e^{j(2\pi f_n k + \varphi_n)} \quad (3)$$

式中: A_n 、 f_n 、 φ_n 分别代表第 n 个复正弦信号的振幅、中心频率和相位。

3 压缩感知基本理论

若某长度为 $N \times 1$ 的信号 $x(x \in \mathbb{R}^{N \times 1})$ 在 $N \times N$ 维的基矩阵 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i, \dots, \psi_N\}$ ($\psi_i \in \mathbb{R}^N$ 为 N 维列向量)上的投影系数只有 $K(K \leq N)$ 个值不为零,那么就称 x 在基矩阵 Ψ 上是稀疏的,其稀疏系数 α 可由 x 与 Ψ 的内积获得,即 $\alpha_i = \langle x, \psi_i \rangle$ 。则信号 x 可表示为:

$$x = \sum_{i=1}^N \alpha_i \psi_i \text{ or } x = \Psi \alpha \quad (4)$$

令 Φ 是一个 $M \times N$ 维测量矩阵,其行向量与稀疏基 Ψ 的列向量必须满足非相干特性,即 Φ 的行向量不能用 Ψ 的有限个列向量线性组合表示,反之亦然。则信号 x 经过 Φ 压缩测量后便得到 $M \times 1$ 维的降采样数据 y , 即

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \alpha = \Theta \alpha \quad (5)$$

式中: $\Theta = \Phi \Psi$ 是一个大小为 $M \times N$ 的感知矩阵。

然后利用重构算法对 y 进行重构便可恢复出信号 x , 若感知矩阵 Θ 满 RIP 准则^[10], 即 $1 - \epsilon \leq \Theta x_2^2 / x_2^2 \leq 1 + \epsilon$, $\epsilon > 0$, 可通过求解 l_0 范数问题对信号进行重构。即

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmin}_{\alpha} \|\alpha\|_0 \text{ s. t. } y = \Theta \alpha \quad (6)$$

式中: $\|\alpha\|_0$ 表示 l_0 范数,即向量 α 中非零元素的个数。

常用的重构算法主要有贪婪算法和凸优化算法^[11], 折中考虑算法复杂度和重构精度,本文采用改进的 OMP 算法来重构信号。

4 基于压缩感知的 SAR 窄带干扰抑制

4.1 理论分析

为了用尽可能少的原子稀疏表示信号,就要求所构造的冗余字典原子的结构和形状尽可能与信号特征相似。LFM 信号是一种非平稳信号,所以构建的字典在时域和频域应同时具有较高的分辨率, Mann 和 Mihovilovic 等把

Gauss 函数经时移、频移、频率倾斜和伸缩变换等操作,构造出高度冗余的 Chirplet 字典,其原子相比 Gabor 字典多了一个调频分量,频率成分随时间做线性变化,与 LFM 信号结构具有极大相似性。Chirplet 原子的表达式为:

$$g_\gamma(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}g\left(\frac{t-u}{s}\right)e^{j\left[\xi(t-u)+\frac{c}{2}(t-u)^2\right]} \quad (7)$$

$$g(t) = 2^{1/4}e^{-\pi t^2}$$

式中: $g(t)$ 为高斯包络函数。Chirplet 原子共有 4 个参数:尺度变换 s , 平移变换 u , 频率调制 $\xi(\xi = 2\pi f)$ 和调频斜率 c 。

假设成像场景中强散射点有 P 个,则在某一方位时刻接收到的去载频后回波信号为:

$$x(\tau, t) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \text{rect}\left(\frac{t-\tau_p}{T}\right) \exp[j2\pi k_r(t-\tau_p)^2] \cdot$$

$$w_a(\eta) \exp\left[-\frac{4\pi}{\lambda}\tau_p\right] + z_x(t) \quad (8)$$

式中: σ_p 是散射点 p 的后向散射系数,这里令 $\sigma_p = 1$, $\tau_p = 2R_p(\tau)/c$ 是发射信号走双程距离的时延, R_p 是强散射点到雷达的距离, $w_a(\eta)$ 是方位方向的窗函数。若不考虑系统噪声 w_x 的影响,则 $z_x(t) = j_x + w_x = \sum_{n=1}^n A_n e^{j(2\pi f_n t + \varphi_n)}$, j_x 为该方位时刻回波中包含的窄带干扰。

从式(7)和(8)可以看出,SAR 回波信号参数 $x = (T, \tau, k_r)$ 与 Chirplet 原子的参数 $\gamma = (s, u, c)$ 相一致,另外,相位项 $\exp\left[-\frac{4\pi}{\lambda}\tau_p\right]$ 在任一方位时刻是一确定常数,并不会对信号的稀疏性和原子的选择造成影响,它仅是对原子系数做了加权处理。因此 Chirplet 字典能够稀疏表示 SAR 回波信号。稀疏表示的实质是用一组任意倾斜的直线进行逼近。

当 $c = 0$ 时,Chirplet 字典变为

$$gr(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}g\left(\frac{t-\mu}{s}\right) \cdot e^{j2\pi ft} \quad (10)$$

它相当于在复正弦信号上加了一个高斯窗,因此能够稀疏表示窄带干扰。

经上分析,Chirplet 字典对 LFM 信号和 NBI 均能够稀疏表示,但它们的调频斜率不同,因此,对每个方位向的回波在重构过程中要把调频斜率为零的原子对应的系数置零,即可恢复出干扰抑制后的信号。然后对每个方位向的回波信号进行重构,再利用传统 SAR 成像算法便能得到抑制干扰后的图像。

4.2 算法流程

4.1 节分析的抑制 NBI 的方法,可通过改进的 OMP 算法实现,具体算法流程如下:

输入:测量矩阵 Φ 、Chirplet 字典 Ψ 、信号和干扰稀疏度之和 K

输出:去除干扰后的信号

步骤:

1)初始化:初始化残差 $r_n = y$, 增量矩阵 $Aug_t =$

Φ , 系数向量 $hat_y = \phi$, 迭代次数 $time = 1$;

2)遍历感知矩阵 $\Theta = \Phi\Psi$, 搜索与残差相关性最大的列,即 $\lambda_{time} = \max_{1 \leq n \leq N} |r_n \cdot \psi_{time}|$;

3)扩充增量矩阵 $Aug_t = [Aug_t, \psi_{time}]$;

4)估计最小二乘系数 $aug_y, aug_y = (Aug_t^T \cdot Aug_t)^{-1} \cdot Aug_t^T \cdot y$;

5)判断步骤 4)估计出的系数所对应原子调频斜率参数 k_r 是否为零,若为零,将该系数置零;

6)更新残差 $r_n = y - Aug_t \cdot aug_y$;

7)判断算法执行次数 $time < K$ 是否成立,若不成立,返回步骤 2);若成立,执行步骤 8)

8)利用重构出的系数乘以对应原子恢复出信号。

改进的 OMP 算法主要是在步骤 5)加入了一个判别过程,把调频斜率为零的原子对应的系数置零,从而在步骤 8)中只能重构有用信号;然后把得到的重构数据进行成像处理。

5 仿真实验

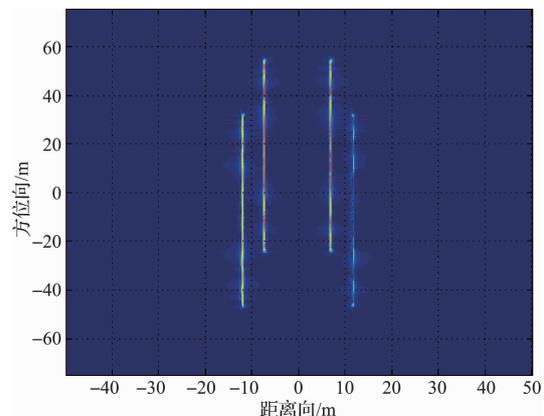
假设大小为 $150 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的成像场景有 4 个强散射点,即目标稀疏度为 4。

仿真中正侧视机载 SAR 中心频率为 3 GHz,其具体参数如表 1 所示。距离向有 $N = 512$ 个采样点,分别在 2.955 GHz、2.985 GHz、3.055 GHz 和 3.070 GHz 频点处加入 NBI 信号。定义压缩率 $M = \text{实际采样点数} / \text{奈奎斯特采样点数}$,仿真中设 $M = 2$,即降采样后有 256 个采样点。

表 1 正侧视 SAR 数据参数

载频	3 GHz
脉宽	1.5 μs
带宽	150 MHz
采样频率	180 MHz
脉冲重复频率	188 MHz
成像时间	1.4 s

当回波中没有干扰时,基于压缩感知的 SAR 成像方法能够较好的重构出场景目标,如图 1 所示。



(a)无干扰时,距离压缩后成像结果

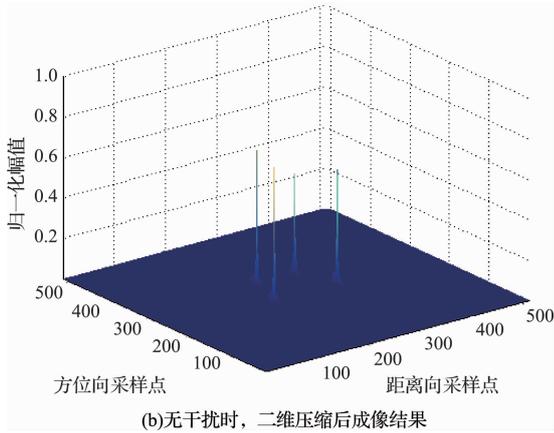


图1 无干扰时,基于CS的SAR成像结果

当加入 $JSR=30$ dB 的 NBI 后,目标场景稀疏性被破坏,无法有效恢复出场景目标,如图2所示。

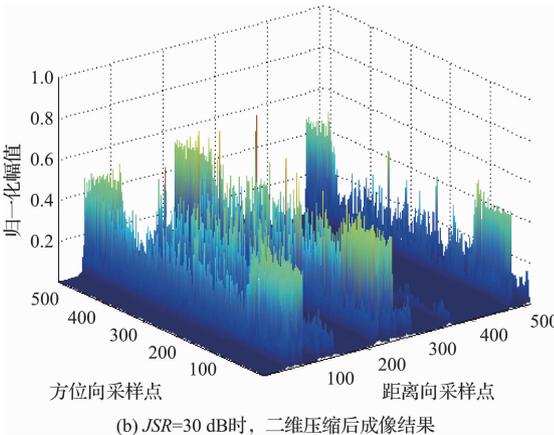
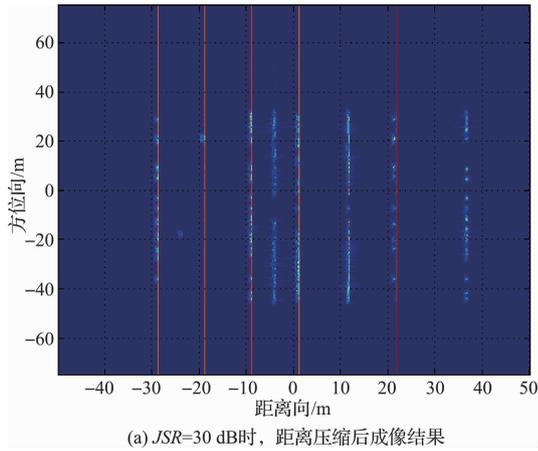


图2 $JSR=30$ dB时,基于CS的SAR成像结果

由仿真实验得知,在 $JSR=17$ dB 时,基于压缩感知的 SAR 成像方法已经无法正常成像,而本文提出的方法在 $JSR=30$ dB 时依然能达到较好的成像效果,如图3所示。

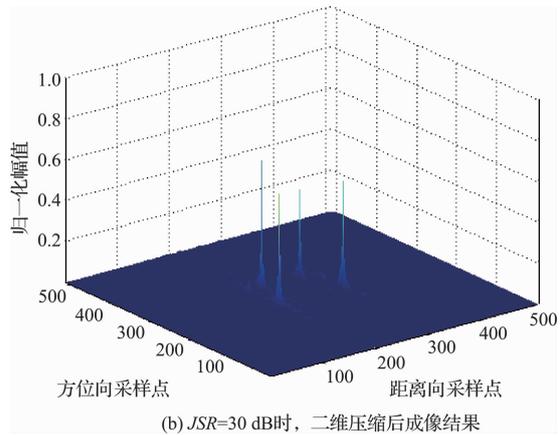
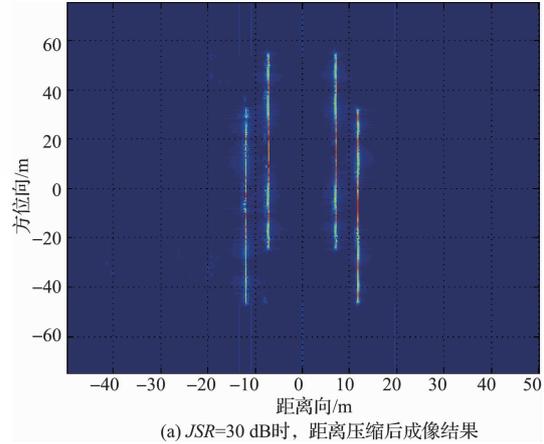


图3 $JSR=30$ dB时,基于CS的SAR成像结果

不同干信比条件下,恢复出目标的峰值旁瓣比和积分旁瓣比如表2所示。

表2 点目标的图像质量指标

干信比/dB	PSLR/dB		ISLR/dB	
	距离向	方位向	距离向	方位向
无干扰	17.268	16.155	-9.841	-9.689
10	16.646	16.174	-8.955	-8.716
20	16.633	15.542	-8.632	-8.494
30	16.874	15.109	-8.792	-8.091

从表2可以看出,不同干信比条件下,经干扰抑制处理后,点目标的峰值旁瓣比和积分旁瓣比都与不含干扰的回波信号非常相近,这也说明了本文方法的有效性。

6 结论

本文首先分析了 NBI 的特点及信号模型,进而分析了 SAR 回波信号和 NBI 信号在 Chirplet 字典上的稀疏性,在此基础上,提出了一种基于 CS 的 NBI 抑制方法,根据它们在 Chirplet 字典上调频斜率参数不同,在重构过程中将 NBI 信号系数剔除,有效的抑制了 NBI 对 SAR 成像质量的影响,并且大大减少了 SAR 系统处

理的数据量。但该方法要求已知干扰的稀疏度,但实际上 NBI 稀疏度通常是未知的,下一步将研究稀疏度未知的 NBI 抑制方法。

参考文献

- [1] 盖旭刚,陈晋汶,韩俊,等. 合成孔径雷达的现状与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2011(3): 82-86.
- [2] 王康,叶伟,劳国超,等. 一种基于压缩感知的宽带 SAR 信号侦察方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 40-43.
- [3] 龚辉. 基于压缩信道感知的超宽带混合信道估计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 135-139.
- [4] YANG L, ZHENG H, FENG J, et al. Detection and suppression of narrow band RFI for synthetic aperture radar imaging [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 1189-1198.
- [5] ZHAO N, TAN L, GE J. P Band SAR narrow band RFI suppression methods research: P band SAR narrow band RFI suppression methods research [C]. IEEE International Conference on Radar, 2011: 1086-1089.
- [6] 查正兴,鲁昌华,陶志颖,等. 增强型 Shearlet 域 SAR 图像去噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 644-649.
- [7] 郑慧芳,杨淋,冯锦. SAR 窄带干扰抑制的子带子空间滤波技术研究[J]. 电子与信息学报, 2013(12): 2836-2842.
- [8] ZHU J, WANG J, LI J Q. An improved method of multi-narrowband interference suppression; an improved method of multi-narrowband interference suppression[C]. 2011 IEEE International Conference on Information Theory and Information Security, 2011: 1023-1027.
- [9] 史洪印,赵欣悦. 基于 CS 的 SAR 旋转微动目标检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6): 1342-1349.
- [10] 石光明,刘丹华,高大化,等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [11] 刘记红,徐少坤,高勋章,等. 压缩感知雷达成像技术综述[J]. 信号处理, 2011, 27(2): 251-260.

作者简介

孔舒亚(通讯作者), 1987 年出生, 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为电子对抗技术。

E-mail: 494926081@qq.com

吴彦鸿, 1971 年出生, 男, 甘肃靖远人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为电子对抗、信息处理。

是德科技施行精英大学伙伴计划

清华大学成为首所精英伙伴大学, 双方将共建 EDA 软件实验室

2016 年 1 月 12 日, 是德科技公司(NYSE:KEYS)近日宣布施行是德科技精英大学伙伴计划, 以发掘能够为行业提供精英工程师的出色教育资源。是德科技将为参加该计划的大学提供大力支持并开展深入合作, 共同探索建立吸引高校学生深度参与和学习最新技术的机制和方法。

清华大学是中国久负盛名的的高等学府, 清华大学在工程师教育和培养方面一直处于领先地位并拥有卓越的创新能力。作为是德科技的第一所精英伙伴, 清华大学电子工程系将建立清华—是德科技 EDA 软件实验室, 用于培养信息和通信系统设计的高端人才。同时, 清华大学电子工程系将以 Keysight EEsof EDA 软件为基础设立课程培养学生的设计、仿真和验证能力。在不远的将来, 清华大学电子工程系还会考虑与是德科技共同发起与赞助行业论坛以及实施是德科技大学生行业认证计划等活动。

精英大学计划是 Keysight EEsof EDA 大学教育支持计划的一部分。在成为是德科技精英大学之后, 是德科技将向清华大学电子工程系捐赠软件, 以帮助增强信息与通信系统领域的系统级设计和射频/微波设计的教学水平, 清华大学

电子工程系也会基于 Keysight EDA 系统级设计与仿真软件开发实验室课程。同时, 清华大学电子工程系承诺将软件用作学术以及技术文章和实例编写用途。是德科技与清华大学于 1 月 12 日举行了捐赠仪式, 清华大学副校长薛其坤院士和是德科技全球副总裁/大中华区总经理严中毅先生出席仪式并分别致词。

是德科技副总裁兼大中华区总经理严中毅表示:“是德科技是推动技术发展的重要力量, 我们非常希望能够通过与清华大学的合作延续这一传统。系统级和射频与微波研究是中国在信息通信领域占据领先地位的基础。是德科技与清华大学电子工程系将共同努力, 为中国信息通信行业的发展奠定更坚实的基础。”

清华大学副校长薛其坤院士在致辞中积极肯定了是德科技与清华大学“携手共赢”的合作理念, 感谢是德科技为电子工程系捐赠软件, 希望“EDA 软件联合实验室”的建立促进学校的科研工作和人才培养, 同时也有利于是德科技的发展。

深入了解是德科技 EEsof EDA 大学教育支持计划, 请访问 www.keysight.com/find/eesof-university。