

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.003

引用格式:孙慧霞,邱峰,刘申顺,等.运动目标循环移位舍弃像拼接算法[J].电讯技术,2014,54(5):541-546.[SUN Hui-xia,QIU Feng,LIU Shen-shun,et al.Cyclic Shift Discard Profile Splicing Algorithm for Moving Targets[J].Telecommunication Engineering,2014,54(5):541-546.]

运动目标循环移位舍弃像拼接算法*

孙慧霞^{1,**},邱峰²,刘申顺¹,王焱¹

(1.运城学院物理与电子工程系,山西运城 044000;2.中航工业第一飞机设计研究院航电所,西安 710089)

摘要:雷达目标一维高分辨距离像拼接是一维高分辨距离像用于雷达目标识别的前提。当目标运动时,距离像发生循环移位,采用传统的目标抽取算法如同距离舍弃法和同距离选大法将导致目标抽取结果产生像缺损。分析了目标运动对步进频率一维高分辨距离像的影响,提出了可避免抽取损失的循环移位舍弃像拼接算法。该算法基于幅度最强像修正抽取范围,将抽取范围与距离像同步移动,克服了目标运动对传统的距离像拼接算法的影响,同时避免了精确运动补偿计算量大的问题,具有工程应用价值。仿真实验验证了该算法的有效性。

关键词:雷达目标识别;运动目标;高分辨距离像;步进频率;像拼接算法;循环移位

中图分类号:TN957.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)05-0541-06

Cyclic Shift Discard Profile Splicing Algorithm for Moving Targets

SUN Hui-xia¹, QIU Feng², LIU Shen-shun¹, WANG Yi¹

(1. Department of Physics and Electronics Engineering, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;
2. Avionics Institute, The First Aircraft Institute of Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Radar target high range resolution profile splicing is a premise for the application of one-dimensional high range resolution profile in radar target recognition. The velocity of moving target will produce cyclic shift of the range profile, which may cause losing target on range profile with traditional redundancy removal algorithms like discard method or method of selecting the large with same distance. The influence of target motion on high range resolution profile of stepped frequency radar is analyzed, while cyclic shift discard profile splicing algorithm which avoids extracting loss is proposed. The algorithm makes selected range move with range profile by modifying the pick-up scope based on the offset of the most powerful scatterer, which overcomes the effects of target motion on traditional range profile splicing algorithm while avoiding large computation of accurate motion compensation, thus showing engineering application value. Computer simulation validates the correctness of theoretical analysis.

Key words: radar target recognition; moving target; high range resolution profiles; stepped frequency; profile splicing algorithm; cyclic shift

1 引言

在雷达系统中,采用高距离分辨率信号具有很多优越性,步进频率信号即是一种重要的高距离分

辨率信号,它具有在获得距离高分辨的同时降低对数字信号处理机瞬时带宽要求的优点,因此得到了广泛的应用^[1]。

* 收稿日期:2014-01-02;修回日期:2014-04-01 Received date:2014-01-02;Revised date:2014-04-01
基金项目:运城学院院级项目(YQ-2013017);运城学院大学生创新创业训练项目
Foundation Item: School Project of Yuncheng University(YQ-2013017); Training Project of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates of Yuncheng University

** 通讯作者:hxsun@mail.xidian.edu.cn Corresponding author:hxsun@mail.xidian.edu.cn

步进频率信号通过将大带宽信号分成多次进行发射,从而降低了系统的瞬时带宽,进而减轻了数字信号处理机的负担。然而,这种优点所付出的代价是需要多个脉冲才能得到一次结果,使得步进频率信号的数据率较低,从而成为多普勒敏感信号^[2]。步进频率信号在参数设计时通常使单个采样点的IFFT 结果有一定的冗余,这就需要像拼接算法从冗余信息中抽取完备的一维距离像,拼接成与真实情况相符的最优的一维距离像。由于步进频率信号是多普勒敏感信号,目标运动将导致一维距离像走动和展宽,进而影响距离像拼接算法形成一维高分辨距离像,因此必须对运动目标进行精确补偿,从而利用静止目标距离像拼接算法对补偿后的一维距离像进行拼接。目前,常用的静止目标距离像拼接算法有同距离舍弃法和同距离选大法^[3-5],其中同距离舍弃法对各个采样点的重叠信息进行简单舍弃,存在信噪比低的问题,而同距离选大法则是对重叠信息进行选大运算,计算量较同距离舍弃法大,当目标静止时,采用同距离舍弃法和同距离选大法均能获得完备的一维距离像。然而,当速度估计误差较大时,采用传统的距离像拼接算法如同距离舍弃法、同距离选大法^[3-5]得到的距离像可能出现像缺损、错位等问题。因此,如何在速度估计误差存在时形成完备真实的一维高分辨距离像是运动目标环境下步进频率信号面临的主要问题。

速度估计误差是指粗速度补偿后的残留项,已基本解决了幅度衰减和距离像发散问题,其主要影响在于目标距离像偏离了静止情况下的目标抽取范围^[6]。本文提出了可避免抽取损失的循环移位舍弃像拼接算法,将抽取窗与距离像同步循环移位,通过搜索幅度最强的像确定该像的偏移量,从而修正循环移位范围。该算法一方面避免了同距离舍弃法信噪比低的问题,另一方面又解决了同距离选大法计算量大的问题。最后利用仿真实验对算法的有效性进行了验证。

2 步进频率信号及其处理

2.1 信号形式

设步进频率信号的脉冲宽度为 τ , 脉冲重复周期为 T_r , 载频起始频率为 f_0 , 频率步进数为 N , 频率步进值为 Δf , 采样频率为 f_s , 光速为 c , 则发射信号为

$$u(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\text{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2}{\tau}\right)e^{j2\pi f_it}\tag{1}$$

$$\text{其中,}\text{rect}(t/\tau)=\begin{cases}1,&-\tau/2<t<\tau/2\\0,&\text{其他}\end{cases}\quad f_i=f_0+i\Delta f。$$

距离为 R 的目标回波信号为

$$y(t)=\sum_{i=0}^{N-1}\text{rect}\left(\frac{t-iT_r-\tau/2}{\tau}\right)e^{j2\pi f_i(t-2R/c)}\tag{2}$$

将回波信号与本振信号进行混频,对混频后的回波信号作 IFFT 处理,则归一化的综合脉冲输出为

$$|H_l|=\left|\frac{\sin\left[\pi(l-2NR\Delta f/c)\right]}{N\sin\left[\pi(l-2NR\Delta f/c)/N\right]}\right|,\tag{3}$$
$$l=0,1,\cdots N-1$$

至此,在 $l=2NR\Delta f/c$ 处综合处理得到宽度为 $1/N\Delta f$ 的窄脉冲,从而可以确定目标的精确距离^[5]。其物理意义为:将步进频率信号的频谱看成是以 Δf 为采样间隔的离散频率谱线,总带宽为 $B=N\Delta f$, 因此进行逆傅里叶变换后具有距离高分辨的效果,其距离分辨率为 $\Delta r=c/2N\Delta f$, 比单脉冲距离分辨率提高了 N 倍。

2.2 目标运动对一维距离像的影响

由于步进频率信号需要 N 个脉冲才能合成一次结果,故其数据率较低,为多普勒敏感信号。当目标相对于雷达的径向速度为 v 时,目标回波延迟为

$$\tau'=2(R-vt)/c\tag{4}$$

目标运动对一维距离像的影响是使成像结果相对于静止时的像产生循环移位。

令 $\phi_i=j4\pi f_it/c$, 将 $t=iT_r+\tau/2+2R/c$ 代入可得

$$\phi_i=j4\pi(f_0+i\Delta f)v(iT_r+\tau/2+2R/c)/c\approx j2\pi\cdot 2v/c\cdot if_0T_r\tag{5}$$

由式(5)可得目标运动导致合成的距离像相对于静止时的距离像产生偏移^[7], 偏移的距离单元数为

$$n=N(2v/c\cdot f_0T_r)=2vf_0NT_r/c\tag{6}$$

由式(6)可以看出在速度 v 一定时,载频越高,脉冲数越多,脉冲重复周期越长,则偏移的距离单元数越多。

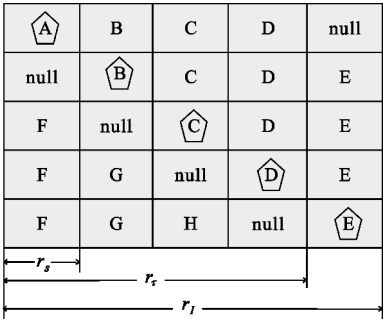
3 静止目标距离像拼接算法

步进频率雷达在参数设计时通常会有一定的冗余,当 IFFT 后的单点不模糊距离大于单脉冲距离分辨率时,会产生距离失配冗余,距离失配冗余使成像结果在一定程度上克服了目标运动对成像的影响,因其会在不模糊距离窗中产生一段冗余区来克服成像结果的循环移位;为避免采样损失,通常会过采样,对应的冗余为过采样冗余,过采样冗余会使同一

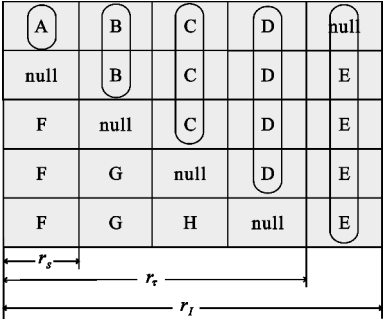
段距离的像出现在连续多个成像结果中。距离像拼接算法即是通过一定的算法对冗余的、乱序的一维距离像信息进行抽取、拼接,从而获得完备真实的一维高分辨距离像。

传统的静止目标距离像拼接算法首先将第 i 个采样点 IFFT 后的结果进行周期延拓,然后提取该采样序列中 $-T_a/2+iT_s \sim T_a/2+iT_s$ 之间的部分,其中 T_a 为单个采样点的抽取时间长度,且通常有 $T_a>T_s$ 。这样,相邻的两个采样点的抽取结果有部分重叠的,如果对重叠信息进行简单的舍弃,对应的抽取算法为舍弃法;若对重叠信息进行选大处理,则对应同距离选大法。

以相邻 5 组采样点 IFFT 后的结果为例,假设存在 4 倍过采样冗余,图 1 为静止目标距离像拼接算法,图中 r_l 为模糊距离窗长度, r_r 为单脉冲距离分辨率, r_s 为每组 IFFT 结果提供的距离新息。字母 A~H 代表实际目标模型,每个字母表示的距离范围为 r_s ,每一行代表一副子距离像,4 个由字母表示的区域为成像有效区, null 为距离失配冗余,代表成像无效区,相邻两幅距离像有 3 个重复区域,为过采样冗余区。



(a) 舍弃法



(b) 同距离选大法

图 1 静止目标距离像拼接算法

Fig. 1 Range profile splicing algorithm for static target

舍弃法的结果如图 1(a) 所示,即从每一组采样

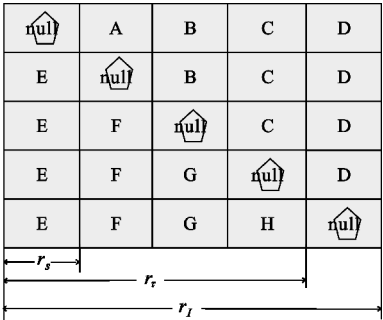
点的结果中提取出 r_s 的长度并舍弃其他点,续接起来就构成了完备的一维高分辨距离像;同距离选大法的结果如图 1(b) 所示,即从每一组采样点的结果中对重叠信息进行取大,取出最大的值拼接起来就得到完备的一维高分辨距离像。

舍弃法是将当前采样点 IFFT 结果的起始部分作为距离新息保留下来,由于目标刚刚进入采样点,其幅度通常较小,从而降低了提取后的信噪比,这是其最主要的缺点;同距离选大法不仅对有用信息进行了选大,也同时对噪声进行了选大,这是其主要缺点。

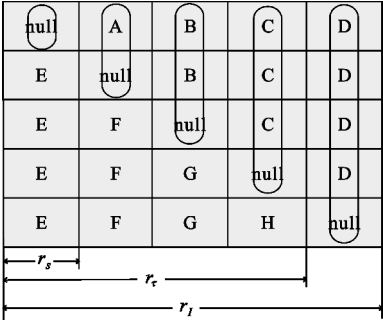
4 运动目标距离像拼接算法

4.1 目标运动对静止目标距离像拼接算法的影响

目标运动会使距离像产生偏移,若目标速度得不到精确补偿,则速度估计误差项将导致目标距离像偏离抽取范围。假设速度估计误差项导致目标距离像向时间轴正向偏移 r_s ,如图 2 所示,舍弃法的拼接结果如图 2(a) 所示,同距离选大法的拼接结果如图 2(b) 所示。



(a) 舍弃法



(b) 同距离选大法

图 2 速度估计误差存在时的像拼接算法

Fig. 2 Range profile splicing algorithm with velocity error

由图 2 可以看出,当运动目标的速度不能精确补偿时,利用静止目标抽取算法将产生像缺损,从而导致测距不准,并且不利于后续基于一维高分辨距

离像的目标识别。目前解决像缺损问题的方法主要是进行精确的速度补偿,如最小熵法等,但这些方法通常计算量较大,离实际工程应用尚有距离。

4.2 循环移位舍弃像拼接算法

当速度估计误差项存在时,距离像将产生循环移位,直接利用静止目标距离像拼接算法可能产生像缺损,从而得不到完备且真实的一维高分辨距离像。解决此问题的一种方法是将抽取窗与距离像同步循环移位,为了避免抽取损失,通过搜索幅度最大的像确定抽取窗的循环移位置,将幅度最大像的位置确定为抽取窗的中心位置,计算移位置,并以同样的移位置修正各个采样点的抽取范围,舍弃掉冗余信息量,将抽取的距离像进行拼接即可得到完备真实且没有抽取损失的一维高分辨距离像,即循环移位舍弃像拼接算法,其流程图如图 3 所示。该算法一方面避免了静止目标舍弃法存在的抽取损失问题,另一方面又避免了同距离选大法的同距离信息比大的运算,算法效率较高。

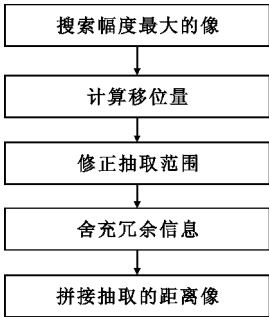


图 3 循环移位舍弃像拼接算法流程图
Fig. 3 The flow chart of cyclic shift discard profile splicing algorithm

循环移位舍弃像拼接算法如图 4 所示,可以看出,通过修正抽取窗范围,可以得到完备真实的一维高分辨距离像。

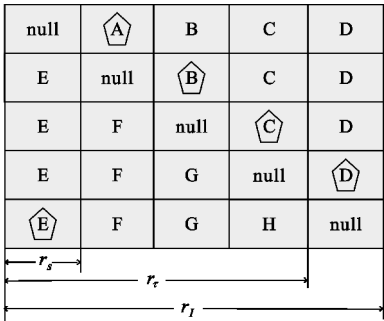


图 4 循环移位舍弃像拼接算法
Fig. 4 Cyclic shift discard profile splicing algorithm

循环移位舍弃像拼接算法在确定抽取窗的移位置时,将幅度最大像的位置确定为抽取窗的中心位置,可能产生的最大误差为 $\lfloor r_s/2 \rfloor$,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算。该误差导致各散射点同步移位 $\lfloor r_s/2 \rfloor$,但并不影响各散射点之间的相对位置关系,从而不会影响到后续基于一维高分辨距离像的目标识别。

5 仿真实验与分析

根据频率步进信号的参数匹配准则^[2],设计参数需保证存在距离失配冗余和过采样冗余,仿真参数设置如下:雷达发射频率为 $f_0=35\text{ GHz}$,脉冲宽度为 $\tau=0.2\text{ }\mu\text{s}$,频率步进值为 $\Delta f=4\text{ MHz}$,频率步进数为 $N=64$,脉冲重复周期为 $T_r=25\text{ }\mu\text{s}$ 。 $\tau\Delta f=4/5$ 且 4 倍过采样,对应的不模糊距离窗为 $r_l=c/2\Delta f=37.5\text{ m}$,单脉冲距离分辨率为 $r_r=c\tau/2=30\text{ m}$ 。该参数设计符合实际工程背景,能够模拟真实情况。

假设目标模型如图 5 所示,速度估计误差为 $\Delta v=67\text{ m/s}$ 。图 6(a) 为相邻 5 组采样点所成的距离像依次排列的结果,图 6(b) 为舍弃法拼接结果,图 6(c) 为同距离选大法拼接结果,图 6(d) 为循环移位舍弃像拼接结果,可以看出,舍弃法和同距离选大法均出现了严重的像缺损,而本文提出的循环移位舍弃像拼接算法能够有效避免像缺损问题。由于采用 4 倍过采样,则采样带来的距离新息为 $r_s=r_r/4=7.5\text{ m}$,故将幅度最大像的位置确定为抽取窗的中心位置时所产生的最大误差为 $r_s/2=3.75\text{ m}$ 。该误差使得目标整体最大偏移 3.75 m ,并不影响各散射点的相对位置关系,由于抽取的是幅度最强的像,故不存在抽取损失,因而不会影响到后续的检测与跟踪。

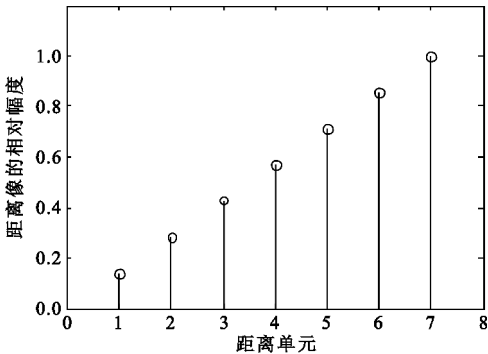
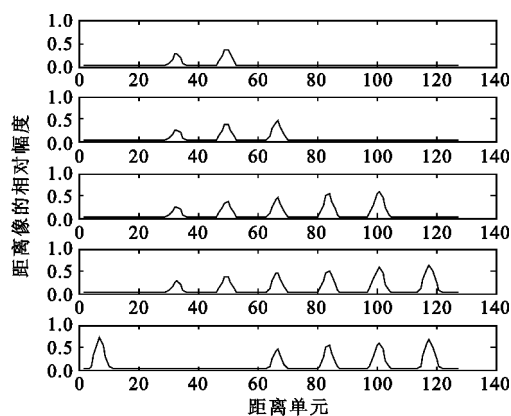
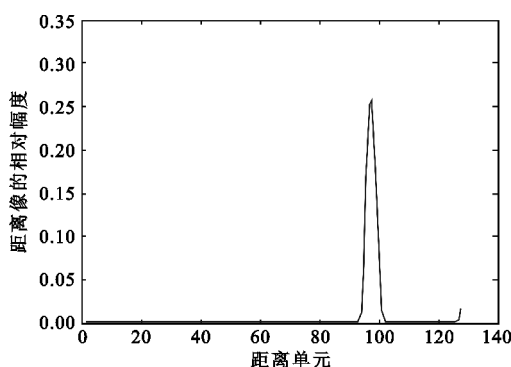


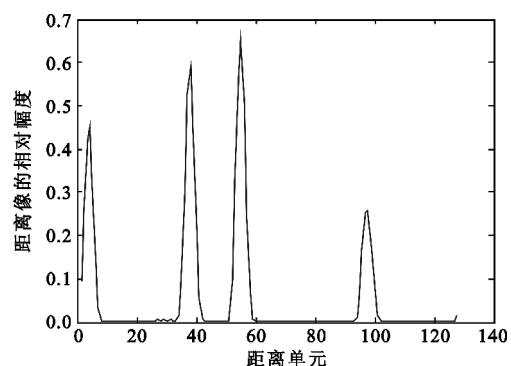
图 5 目标散射点模型
Fig. 5 Target scatter point model



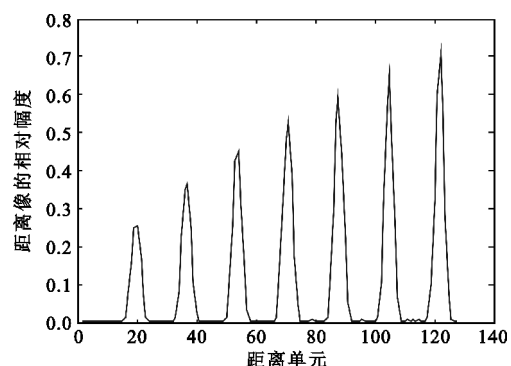
(a) 相邻 5 组采样点所成的像



(b) 舍弃法拼接结果



(c) 同距离选大法拼接结果



(d) 循环移位舍弃法拼接结果

图 6 距离像拼接结果

Fig. 6 Splicing results of range profile

6 结束语

本文基于毫米波频率步进体制雷达首先研究了目标运动对一维高分辨距离像的影响,即目标运动导致距离像产生循环移位,并对静止目标一维高分辨距离像拼接算法进行了分析,给出了舍弃法和同距离选大法的原理及特点;其次,分析了目标运动对静止目标距离像拼接算法的影响,并在此基础上提出了能避免像缺损和抽取损失的循环移位舍弃像拼接算法,该算法与传统的舍弃法^[3]相比,解决了速度估计误差项存在时可能导致的像缺损问题,同时,又避免了同距离选大法^[4-5]的比较取大运算,提高了算法效率;最后利用仿真实验验证了本文所提方法的有效性。

本文所提算法是基于粗速度得到补偿的运动目标一维高分辨距离像拼接算法,粗速度补偿已基本解决了距离像衰减甚至失真的问题,故仅考虑了残留的速度估计误差项导致的距离像移位问题,如何实现粗速度估计与距离像拼接算法的有效统一是下一步工作研究的重点。

参考文献:

- [1] 刘峥,刘宏伟,张守宏. 步进频率信号分析[J]. 西安电子科技大学学报,1999,26(1):71-74.
LIU Zheng,LIU Hong-wei,ZHANG Shou-hong. Analysis of the step frequency signal[J]. Journal of Xidian University,1999,26(1):71-74. (in Chinese)
- [2] 毛二可,龙腾,韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报,2001,22:16-25.
MAO Er-ke, LONG Teng, HAN Yue-qiu. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2001,22:16-25. (in Chinese)
- [3] 李耽,龙腾. 步进频率雷达目标去冗余算法[J]. 电子学报,2000,28(6):60-67.
LI Dan, LONG Teng. Target's redundance removed algorithm of step frequency radar[J]. Acta Electronica Sinica,2000,28(6):60-67. (in Chinese)
- [4] 龙腾,李耽,吴琼之. 频率步进雷达参数设计与目标抽取算法[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(6):26-31.
LONG Teng, LI Dan, WU Qiong-zhi. Design methods for step frequency waveform and the target pick-up algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics,2001,23(6):26-31. (in Chinese)
- [5] 张娟,刘峥,孙慧霞. 一种步进频率雷达目标高分辨距离像拼接算法[J]. 火控雷达技术,2010,39(4):42-46.
ZHANG Juan, LIU Zheng, SUN Hui-xia. An algorithm of splicing target high resolution range profile for stepped frequency radars [J]. Fire Control Radar Technology,

2010,89(4): 42-46. (in Chinese)

[6] 苏宏艳,龙腾,何培琨,等. 运动目标环境下的调频步进信号目标抽取算法[J]. 电子与信息学报,2006,28(5):915-918.

SU Hong-yan, LONG Teng, HE Pei-kun, et al. Target's redundancy removed algorithm for modulated frequency stepped pulse radar signal echoed by moving target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(5): 915-918. (in Chinese)

[7] 孙慧霞,邱峰,苏世栋. 基于一维距离像序列的雷达目标微动参数估计[J]. 电讯技术,2013,53(4):85-90.

SUN Hui-xia, QIU Feng, SU Shi-dong. Micro-motion parameter estimation of radar target based on high range resolution profile [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(4): 85-90. (in Chinese)

作者简介:



孙慧霞(1983—),女,山西运城人,2011年于西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室获博士学位,现为讲师,主要研究方向为雷达目标识别;

SUN Hui-xia was born in Yuncheng, Shanxi Province, in 1983. She received the Ph. D. degree from National Key Lab of Radar

Signal Processing, Xidian University, in 2011. She is now a lecturer. Her research concerns radar target recognition.

Email:hxsun@mail.xidian.edu.cn

邱峰(1982—),男,陕西西安人,2008年于西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为雷达信号与信息处理;

QIU Feng was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1982. He received the M. S. degree from National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, in 2008. He is now an engineer. His research concerns radar signal and information processing.

刘申顺(1992—),男,山西吕梁人,运城学院物理与电子工程系大四学生;

LIU Shen-shun was born in Lvliang, Shanxi Province, in 1992. He is now a senior student in Department of Physics and Electronics Engineering, Yuncheng University.

王 燚(1991—),男,山西平遥人,运城学院物理与电子工程系大四学生。

WANG Yi was born in Pingyao, Shanxi Province, in 1991. He is now a senior student in Department of Physics and Electronics Engineering, Yuncheng University.

本刊被美国《史蒂芬斯数据库(EBSCOhost)》收录

根据美国 EBSCO Publishing(史蒂芬斯出版社) Mari Bergeron(玛丽·伯杰龙)女士的电子邮件通知,经过遴选和评审,本刊《电讯技术》已经被《史蒂芬斯全文数据库(EBSCOhost)》接受并全文收录。这是本刊继被美国《剑桥科学文摘(CSA)》、《乌利希期刊指南(UPD)》,英国《科学文摘(SA)》INSPEC 数据库,波兰《哥白尼索引(IC)》列为来源期刊之后,再一次被国际著名检索系统收录。

据中国科学技术期刊编辑学会网站(www. cessp. org. cn)公布的信息,目前,中国已有 175 种期刊被 EBSCOhost 收录,其中中国大陆 81 种,中国台湾 4 种,中国香港 87 种,中国澳门 3 种。

《电讯技术》被 EBSCOhost 收录,是本刊编辑部推进期刊国际化进程中取得的又一重要成绩,充分说明本刊质量和水平得到了国外专家的肯定和认同,必将促进本刊的进一步发展。

本刊编辑部