

随机断续高频雷达波形设计和处理

位寅生,刘永坦

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 本文综合分析了几种典型高频地波超视距雷达波形的特点,针对这些波形在高频段电磁干扰严重条件下可用连续频段较窄的问题,提出了一种依据外部电磁环境监测结果来截断干扰频段的波形.这种波形能够有效地利用不连续频段,从而提高雷达的有效带宽和抗干扰能力.针对波形频谱截断后引起的距离旁瓣过高问题,本文采用一种改进的自适应目标回波重建算法来处理,达到较好的结果.

关键词: 波形设计;旁瓣抑制;频谱截断;信号处理

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0437-04

Random Interrupted HF Radar Waveform Designing and Processing

WEI Yin-sheng, LIU Yong-tan

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In this paper the characteristic of several typical HF radar waveforms are synthetically analyzed and compared. A new waveform with interrupted spectra is presented to improve the narrow continuous bandwidth usable in heavily congested electromagnetic environments. By cutting off the interference spectrum based on the result of the electromagnetic environment surveying system, HF radar could make use of the fractional silent spectra. This would greatly improve the radar's anti-jamming ability and effective bandwidth. Moreover, an improved adaptive targets echo reconstruction algorithm is used. Simulation results show that it could successfully suppress the high sidelobe with this waveform.

Key words: waveform design; sidelobe suppression; interrupted spectra; signal processing

1 引言

高频地波超视距雷达为探测视距以外的目标和满足系统分辨率的需要,采用过多种信号体制.简单脉冲信号存在着测距模糊和发射机峰值功率之间的矛盾,因而高频雷达往往采用大时宽一带宽积信号,如频率调制、相位编码来增加带宽^[1],其中典型的波形是调频连续波(FMCW).为解决单站雷达收发隔离和功率利用之间的矛盾,A W V Pool 博士仔细分析了线性调频伪码断续波^[2].在此基础上,为提高抗干扰能力和解决测距、测速模糊问题,加拿大北方雷达公司提出了一种用规则脉冲截断的线性调频连续波^[3](FMICW).此后,在FMICW波形基础上,针对高频雷达所面临的各种实际问题,一些学者提出了几种改进的信号形式.其中较典型的有如下几种:为有效提高高频雷达抑制干扰的能力,特别是周期性的干扰,文献[4]设计了一种脉冲频率编码信号;为实现同时探测飞机目标和舰船目标,文献[5]采用了一种复杂波形,通过分时实现了海空兼容;为解决高速运动所产生的距离-多普勒耦合,文献[6]提出一种用于探测飞机的多普勒预处理相位编码信号.这些信号形式同FMICW类似,系统的距离分辨率、距离旁瓣水平由一个波形周期的信号参数决定,多普勒分辨率是靠雷达积累周期内的多个波形周期的积累来实现.从雷达

所占用的频带来看,上述波形要求雷达工作在连续的频段.然而,高频雷达工作的频段(3 - 30MHz)往往存在着严重的电磁干扰,系统很难找到一段连续的、满足信号带宽要求的相对“寂静”频带,因而雷达所能获得的分辨率极为有限.不仅如此,工作在连续频段的高频雷达往往在比较窄的频带上集中很高的能量,使得敌方很容易探测到我方雷达的工作频段.

为提高高频雷达的综合电子对抗能力,增强雷达在恶劣电磁环境中的生存能力,人们对雷达波形的抗干扰性能提出了更高要求.英国学者S D Green以及俄罗斯学者V M Kutuzov等人近年发表的文章中提出一些有益的思想,其核心是:高频雷达在工作频带的选取上摆脱连续带宽的限制,使用不连续频段来满足分辨率要求^[7,8].单站的高频雷达由于工作方式是断续的,采用不连续频带的信号形式会引起脉间载频的跳变,受“寂静”频带分布不确定性的影响,不同时间段内载频跳变图案是不同的,具有随机性.综合这些分析,本文设计的波形是在比较宽的频率范围内进行干扰频谱截断来获得有效带宽,由于“寂静”频带的分布是不确定的,我们称这种信号形式为随机断续波.

载频随机跳变破坏了无模糊测距的条件,因此采用常规匹配处理得不到理想的窄脉冲,而是在主瓣周围随机分布着

一些很高的旁瓣. 多目标环境下, 强目标回波的旁瓣过高会淹没弱目标回波的主瓣, 导致系统检测目标的动态范围降低, 虚警率增大, 进而给整个雷达系统带来严重的影响. 对随机断续波的旁瓣处理一直没有比较理想的算法, 文献[9]提出了按距离单元设计最小二乘滤波器的算法, 较好地解决了目标旁瓣过高问题, 然而算法具有计算量大、信噪比有损失的缺点. 针对这些问题, 本文改进了一种自适应的目标回波重建算法来实现距离分辨和旁瓣抑制, 它提高了提取弱目标的能力, 算法具有简单、有效的特点.

2 随机断续波形分析

电磁干扰的随机性, 使得某一频段 $[f_0, f_0 + B]$ 内寂静频带的分布是不规则的, 带宽也往往很窄. 因而一个波形周期中脉内一般无频率调制, 系统的距离分辨力通过脉间相位变化的积累来获得, 速度分辨力由积累周期中的多个波形周期的积累获得.

从示意图 1 中可以看出随机截断波形频谱分布的大致情况.

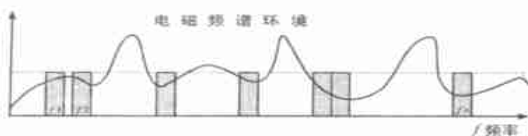


图 1 随机断续波形各个脉冲之间的频率变化示意图

根据上面对波形时间、频率的分析, 一个积累周期内的随机断续信号可表示成:

$$U_T(t) = \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} u_1(t - nT_{PP} - mT_{WP}) e^{j2f_n t + \phi_0} \quad (1)$$

$n = 0, 1, \dots, N-1, m = 0, 1, \dots, M-1$

$$\text{其中 } u_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t - T_{PW}/2}{T_{PW}}\right) \quad (2)$$

T_{PW} 为脉冲宽度, T_{PP} 为脉冲重复周期, 波形周期为 $T_{WP} = N \cdot T_{PP}$, N 为一个波形周期脉冲个数, M 为波形周期个数, f_n 为各脉冲的载频, ϕ_0 为初始相位. 为了分析的方便, 假定接收信号的幅度为 1, 则回波信号表示为:

$$U_R(t) = \sum_{n=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} u_1(t - nT_{PP} - mT_{WP}) e^{j2f_n(t - \tau) + \phi_0} \quad (3)$$

其中 $\tau = \left(\frac{2R_0}{c} - \frac{2v\tau}{c}\right)$, R_0 是初始距离, v 表示目标径向速度, c 表示光速. 解调后, 点目标在第 m 个波形周期中第 n 个脉冲的回波相位可以表示为:

$$m_n(t) = -2f_n \left(\frac{2R_0}{c} - \frac{2v\tau}{c}\right) \quad (4)$$

假定采样时间为 $t = mT_{WP} + nT_{PP} + \frac{T_{PW}}{2}$, 那么, 式(4)可以表示为:

$$m_n(t) = -2f_n \left[\frac{2R_0}{c} - \frac{2v\tau}{c} \cdot (mT_{WP} + nT_{PP} + \frac{2R_0}{c}) \right] = 0 + R + v + RV \quad (5)$$

其中

$$\text{常数项 } 0 = -2f_n \left[\frac{2R_0}{c} - \frac{vT_{PW}}{c} \right] \quad (6)$$

$$\text{速度项 } v = \frac{4f_n T_{WP}}{c} \cdot mv \quad (7)$$

$$\text{距离项 } R = -2f_n \left[\frac{2R_0}{c} - \frac{2v\tau}{c} \left(nT_{PP} + \frac{T_{PW}}{2} \right) \right] + \frac{4T_{PP}mv\tau}{c} \quad (8)$$

$$\text{交叉项 } RV = \frac{4T_{WP}}{c} \cdot mv f_n \quad (9)$$

$$\text{等效中心频率与频偏 } f_n = f_0 + f_n \quad (10)$$

从上面的表达式可以看出, 随机断续波形的距离-速度处理同 FMICW 较为相似, 目标的距离-速度提取可以分为两部分, 首先依次完成对 M 个波形周期的距离处理, 得到 M 列按距离单元划分的距离谱, 由于相邻距离谱的对应元素之间的相位差是 $4v\tau T_{WP}/c$, 因此速度信息可由同一距离单元的对应元素做 M 点 FFT 获得, 从而得到回波信号的距离-速度谱.

3 随机断续波形处理

从上面的分析我们可以得到提取距离-速度信息的表达式:

假定原始单元分为 L 个距离单元^[9], 那么距离谱可以由下式得到

$$Y_R(l, m) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi f_n/c \cdot nT_{PP} \cdot l} e^{j2\pi f_n/c \cdot mT_{WP} \cdot l}, l = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

速度谱可由对同一距离单元作傅立叶变换得到:

$$Y_V(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} Y_R(l, m) e^{-j2\pi km/M}, m, k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (12)$$

3.1 距离旁瓣处理

我们知道, 模糊旁瓣是由波形的周期性重复引起的, 尽管由于随机断续波形各个脉冲载频的随机性破坏了这些模糊旁瓣, 然而频谱的不连续引起的旁瓣还是很高、且分布不均匀. 数据加窗处理几乎不能改善旁瓣水平, 文献[9]提出的算法对目标的旁瓣抑制比较理想, 但计算量大, 且有信噪比损失.

高频雷达需要经过较长时间的积累才能达到检测的要求, 因此经过二维处理后, 尽管旁瓣很高, 但最强目标的距离-速度谱峰值清晰可见, 其幅度和距离可以精确估计. 由于弱目标主要受强目标的旁瓣干扰, 因此如能通过信号重构的方法从回波中去除强目标回波信号, 那么强目标的旁瓣响应就可以大大降低, 甚至接近零.

基于此, 本文改进了一种自适应目标回波重构算法^[10], 利用该自适应算法精确估计回波中最强目标的幅度和时延. 具体的步骤如下:

- (1) 对回波信号进行距离-速度匹配处理, 获得二维谱.
- (2) 在距离-速度门中搜索最大目标峰值, 获得目标的幅度和距离.
- (3) 利用步骤(2)的初始值, 采用一维自适应技术精确估计最大目标的幅度和距离.
- (4) 根据步骤(3)的结果构造最大目标回波信号, 并从回波中减去该信号.
- (5) 重复步骤(1)~(4), 直到所有超过门限的大目标旁瓣

都去除完毕。

(6)对所有的结果进行处理,得到最终的合成谱。

本文采用简单的固定门限来判定目标。

3.2 回波重建算法

首先对回波进行距离-速度处理,沿着某一速度单元搜索最大目标的幅度 A_0 和距离 R_0 ,记录下来作为算法的初始值,接着采用自适应算法精确估计目标的幅度、距离。设下角标 k 表示迭代次数, R_k 表示第 k 次估计的目标距离, A_k 表示估计的目标幅度, μ_R 表示迭代步长, v_R 表示目标速度。

自适应时间延迟(距离)估计器的表达式:

$$M_n(k) = e^{j(4/c) \cdot f_n \cdot (R_k + \mu_R \cdot R_k - m_R T_{PP})} \quad (13)$$

回波经过估计器的点匹配输出:

$$Y_k = \left| \sum_{n=0}^{N-1} M_n(k) \cdot e^{o(n)} \right| \quad (14)$$

目标的幅度估计 $A_{k+1} = \max |A_k, Y_k|$ (15)

目标初始距离估计值最多偏离真实值半个距离门,因此目标幅度的最大输出应该在 $[R_0 - R/2, R_0 + R/2]$ 之间, R 为距离门长度。记 $R(k)$ 为最大幅度所对应的距离,初始化参数 $R(0) = R_0, R_0 = R$ 。

迭代的基本步骤如下:

(1)当 $R_k + \mu_R \cdot R_k > R(k)$ 时,

如果 $Y_k < A_k$,那么下一次的迭代参数

$$R_{k+1} = R_k, A_{k+1} = A_k, R_{k+1} = \mu_R \cdot R_k \quad (16)$$

如果 $Y_k > A_k$,那么下一次的迭代参数

$$R_{k+1} = R(k), A_{k+1} = Y_{k+1}, R_{k+1} = R_k + R_k - R(k) \quad (17)$$

(2)当 $R_k + \mu_R \cdot R_k < R(k)$ 时,

如果 $Y_k < A_k$,那么下一次的迭代参数

$$R_{k+1} = R_k + \mu_R \cdot R_k, A_{k+1} = A_k, R_{k+1} = (1 - \mu_R) \cdot R_k \quad (18)$$

如果 $Y_k > A_k$,那么下一次的迭代参数

$$R_{k+1} = R(k), A_{k+1} = Y_{k+1}, R_{k+1} = R(k) - R_k - R_k \quad (19)$$

当误差函数

$$e_{k+1} = |A_{k+1} - Y_{k+1}| \leq \mu_0 \max |Y_{k+1}, A_{k+1}|, 0 < \mu_0 < 1 \quad (20)$$

此时认为 $A = \max |Y_{k+1}, A_{k+1}| / \sqrt{N}$ 为最强目标幅度的估计值,所对应的距离 R_k 作为目标距离的估计值,得到了第 j 个目标幅度和时间延迟,我们很容易重构该目标的回波信号 $s_i^j = A \cdot e^{-j2 \cdot f_i \cdot t}$,从回波中减去该信号后再次应用回波重建算法,直到提取到高于门限的弱目标为止。

4 仿真结果

仿真中相关波形与信号处理参数见表 1。

表 1 仿真波形参数

信号载频	f_0	8MHz	脉冲个数	N	32
脉冲宽度	T_{PW}	0.5ms	波形周期个数	M	512
脉冲重复周期	T_{PP}	3ms	距离分辨力	R	5km
波形重复周期	T_{WP}	96ms	跳频总带宽	B	200kHz
最大无模糊距离	R_{max}	450km	最大无模糊速度	v_{max}	97.6m/s

注:选取 $B > N / T_{PW}$ 保证脉冲间频谱无重叠,假定背景噪声是复高斯

白噪声。

首先考虑理想情况:假定目标速度正好落在某一个速度门上,经过速度补偿后,自适应点匹配不存在速度残余误差;非理想情况下,速度补偿后存在残余误差,当目标速度刚好处于相邻速度门之间时,测速误差最大,大小是速度分辨率的一半,即 $c / (4 \cdot M \cdot T_{WP} \cdot f_c)$,这将会影响估计的结果。

图 2(a), 2(b) 中,两目标距离分别是 30km、44km,速度 (11.4m/s) 刚好落在第 30 号速度门上;图 3(a), 3(b) 中,两目标距离分别是 36km 和 40km,速度 (8.55m/s) 刚好落在速度门 22 和 23 之间。四幅图中,上图表示匹配滤波器输出,下图表示经过目标重构处理后的结果,表 2、3 分别表示二者比较的结果。由式 (11)、(12) 知,每次剔除目标后仍采用匹配处理,因此信噪比在理想条件下没有损失。

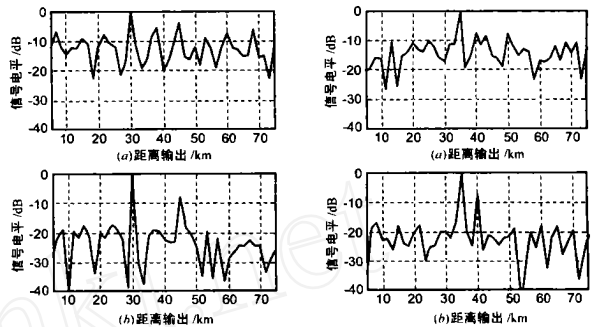


图 2 图 3

从图 2 中可以看出,强目标的旁瓣已与弱目标主瓣相差不多;图 3 中强目标的旁瓣甚至超过了弱目标主瓣,经过处理后弱目标清晰可见。

表 2 无速度误差时结果比较

评价参数		信噪比 (dB)	最大旁瓣 (dB)	平均旁瓣 (dB)
		目标 1,2		
匹配处理	目标 1,2	20.2, 14.2	- 5.53	- 11.6
重构处理	目标 1,2	20.2, 14.2	- 17.3	- 22.6
增益	目标 1,2	0.0, 0.0	+ 11.7	+ 11.0

表 3 有速度误差时结果比较

评价参数		信噪比 (dB)	最大旁瓣 (dB)	平均旁瓣 (dB)
		目标 1,2		
匹配处理	目标 1,2	21.2, 16.7	- 7.38	- 13.2
重构处理	目标 1,2	21.2, 16.7	- 16.8	- 21.6
增益	目标 1,2	0.0, 0.0	+ 11.4	+ 8.4

表 4 表示上述两种情况中目标幅度、距离估计的误差分析,结合表 2、3 可以看出,估计的误差和信噪比、目标所在的距离门、速度门有关。

表 4 目标幅度、距离估计误差分析

评价参数		无速度残差		有速度残差	
		距离	幅度	距离	幅度
比较对象					
幅度真值	目标 1,2	30, 44	1.0, 0.6	30, 44	1.0, 0.5
初始估计结果	目标 1,2	30, 45	1.26, 0.49	30, 45	1.146, 0.493
自适应估计结果	目标 1,2	30, 44	1.25, 0.50	30, 44	1.145, 0.496
误差百分比	目标 1,2	0, 0	25.%, 16.7%	0, 0	14.6%, 2.8%

5 结论

综上所述,随机断续波形通过截断干扰频段来提高雷达在恶劣电磁环境条件下的可靠工作能力,由于充分利用不连续“寂静”频带,因此提高了雷达有效工作带宽.所采用的自适应目标回波重建算法较好地消除了频谱随机截断后产生高旁瓣,增强了强目标环境下检测弱目标的能力.算法具有简单有效,信噪比无损失的优点.

参考文献:

- [1] Wehner D R. High resolution radar [M]. Boston London. Artech House,1985.
- [2] Poole A W V. On the use of pseudorandom codes for ‘Chirp’ radar [J]. IEEE Trans. 1979,AP(27):480 - 485.
- [3] Khan R H,Mitchell P K. Waveform analysis for high-frequency FMICW radar [J]. IEE Proceeding-F. 1991,138(10):411 - 419.
- [4] 沈一鹰,刘永坦.脉冲频率编码信号在高频地波超视距雷达的应用 [J].系统工程与电子技术,1997,(10):33 - 36.
- [5] Shen Yiyang,Liu Yongtan. Design of complex waveform for detection of ship and aircraft targets by a HF radar [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,1998,5(2):36 - 39.
- [6] Shen Yiyang,Liu Yongtan. Step pulse train design for high resolution range imaging with Doppler resolution processing [J]. Chinese Journal of Electronics,1999,8(2):196 - 199.

- [7] Green S D, Kingsley S P. Improving the range/ time sidelobes of large bandwidth discontinuous spectra HF radar waveforms [J]. IEE Conference Publication Proceedings of the 7th International Conference on HF Radio Systems and Techniques,1997,(7):246 - 250.
- [8] Kutuzov V M. Synthesis of non-regular multitone signals and algorithms of their processing [A]. ICSP '96 [C],Part 1 (of 2) Oct:14 - 18.
- [9] Wei Yinsheng,Liu Yongtan. New anti-jamming waveform designing and processing for HF radar [A]. CIE International Conference on Radar Proceedings [C],2001:281 - 284.
- [10] 王盛利.随机脉位信号的一种谱估计方法 [J].现代雷达,1995,17(4):26 - 31.

作者简介:



位寅生 男,1974年2月生于黑龙江.博士研究生,主要研究方向雷达信号设计和处理等.

刘永坦 男,1936年12月生于江苏南京.中国科学院院士,中国工程院院士,从事新体制雷达系统等方面的研究与教学工作.

www.cnki.net