

随机序列步进频率信号及其处理¹

刘宏伟 沈福民 张守宏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 本文讨论了步进频率信号的设计问题, 针对顺序步进频率信号有速度-距离耦合的缺点, 提出了随机序列步进频率信号形式及其多组频率捷变相参处理方法, 该信号形式具有较好的速度、距离分辨能力和杂波抑制能力。

关键词 步进频率信号, 杂波抑制, 高距离分辨率

中图分类号 TN951

1 引 言

提高雷达的分辨率是现代雷达的一个重要发展方向。步进频率信号^[1]通过发射一组单频信号, 以窄带发射机、接收机的处理方式实现了宽带信号所能达到的距离分辨率, 避免了常规宽带信号所面临的工程实现方面的困难, 因而受到广泛重视。然而, 步进频率体制也存在着一些缺点。首先, 对运动目标, 采用步进频率体制时其综合距离像存在着距离走动^[1], 当其速度未知时, 不能准确测距, 即存在着距离和速度的耦合, 从而影响到测距精度和多目标分辨能力。其次, 步进频率信号的杂波抑制能力较差, 尚无理想的杂波抑制方法; 文献[2]中所述的杂波抑制方法只能在运动目标的距离像不存在距离模糊的情况下适用; 实际上, 这是不切实际的, 当目标像存在“目标分裂”^[3]现象时, 该法则不适用。

本文针对步进频率信号的以上缺点讨论了步进频率信号的设计问题。在第 2 节, 扩展了步进频率信号的定义, 提出了随机序列步进频率信号; 在第 3 节, 给出随机序列步进频率信号的相干处理方法; 最后给出了相应的仿真结果。

2 随机序列步进频率信号

定义 N 个元素的频率集合 f 为

$$f = \{f_i | f_i = f_0 + i\Delta f, i = 0, 1, \dots, N-1\}, \quad (1)$$

其中 f_0 为信号载频, Δf 为步进频率带宽。

以集合 f 中的元素为载频的 N 个脉冲, 以间隔 T_1 向外发送。如果脉冲的载频是将 f 中的元素由小到大顺序排列, 即为通常的步进频率信号, 本文称其为顺序步进频率信号。如果脉冲的载频是将 f 中的元素随机排序, 本文称其为随机序列步进频率信号。

对一速度为 v , 距离为 R 的点目标, 第 i 个脉冲的回波信号采样值为

$$m_i = \exp \left\{ j2\pi f_i \left[\frac{2R}{c} - (iT_1 + \frac{T_2}{2} + \frac{2R}{c}) \frac{2v}{c} \right] \right\}, \quad (2)$$

其中 T_2 为脉冲宽度, c 为光速, f_i 为实际发射的第 i 个脉冲的载频。

¹ 1997-12-02 收到, 1998-10-14 定稿
国防预研基金资助项目

目标的距离像可由下式得到:

$$H_l = \sum_{i=1}^N m_i \exp \left\{ -j2\pi f_i \frac{2\Delta R}{c} l \right\}, \quad l = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

其中 $\Delta R = c/(2N\Delta f)$ 为信号的距离分辨率。注意, 这里距离像的综合方法和顺序步进频率信号距离像的综合方法 (IFFT) 不同, 是按相位匹配的方法得到的, 即当第 l 个距离分辨单元的理论相位值和回波相位匹配时信号就会相干叠加, 输出峰值。当发射信号为顺序步进频率信号时, (3) 式就等同于 IFFT 处理。因此, (3) 式的综合方法更具一般性, 其物理概念也更明显。

由前文知, 对顺序步进频率信号, 有

$$f_i = f_0 + i\Delta f, \quad i = 0, 1, \dots, N-1,$$

而对随机序列步进频率信号, 有

$$f_i = f_0 + j_i\Delta f, \quad i = 0, 1, \dots, N-1,$$

其中 j_i 为整数集 $\{0, 1, \dots, N-1\}$ 全部元素的一次随机排序序列中的第 i 个值。由 (2), (3) 式可知, 当 $v = 0$ 时, 顺序步进频率信号与随机序列步进频率信号的脉冲综合结果是相同的。当 $v \neq 0$ 时, (2) 式中相位项中的线性项会导致综合脉冲结果产生距离走动, 二次项和非线性项则会导致综合脉冲结果波形失真^[4]。

不考虑常数项, 来分析 (2) 式中的相位项, 可得顺序步进频率信号和随机序列步进频率信号与速度有关的相位分量分别如 (4)、(5) 式所示。

$$\Delta\psi_{Li} = -2\pi \left[f_0 \frac{2v}{c} T_1 + \Delta f \frac{2v}{c} \left(\frac{T_2}{2} + \frac{2R}{c} \right) \right] i - 2\pi \Delta f \frac{2v}{c} T_1 i^2, \quad (4)$$

$$\Delta\psi_{Ni} = -2\pi \Delta f \left[\frac{T_2}{2} + \frac{2R}{c} \right] \frac{2v}{c} j_i - 2\pi \left[f_0 T_1 \frac{2v}{c} + T_1 \Delta f \frac{2v}{c} j_i \right] i. \quad (5)$$

考虑到 (3) 式, 由 (4), (5) 式可以看出, 脉冲回波相位项分量 $2\pi f_0 T_1 (2v/c) i$ 对顺序步进频率信号而言是线性项, 而对随机序列步进频率信号则是非线性项。故当 $v \neq 0$ 时, 随机序列步进频率信号的波形失真要比顺序步进频率信号严重, 从多目标分辨的角度而言, 希望与目标速度不同的回波信号失真越大越好, 故随机序列步进频率信号的多目标分辨性能要优于顺序步进频率信号。对点目标, 不同速度下两种信号的综合脉冲结果如图 1 所示。

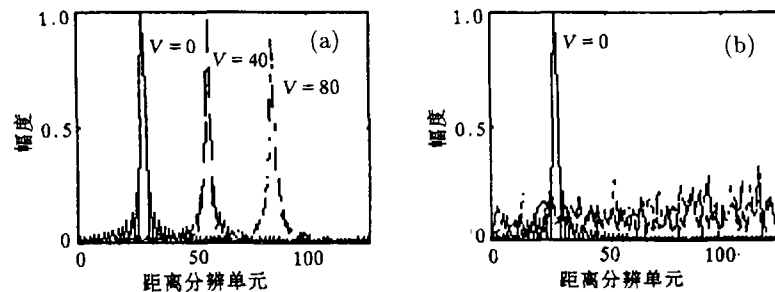


图 1 不同速度点目标脉冲综合波形
(a) 顺序步进频率 (b) 随机序列步进频率

由图中可以看出, 当速度不为零时随机序列步进频率信号的脉冲综合波形失真严重, 这说明随机序列步进频率信号的速度与距离耦合较小, 用于多目标分辨时可获得比顺序步进频率信号好的性能。从图中还可以看出, 速度不为零时随机序列步进频率信号的脉冲综合结果在距离维上得到很大展宽, 分布于不模糊距离内的各个距离分辨单元, 我们称其为随机旁瓣。如果有多个目标或杂波回波存在于同一个距离单元, 随机旁瓣会影响到目标检测性能, 为此, 下文提出了一种脉组频率捷变相干处理方法来抑制杂波。

3 脉组频率捷变相干处理方法

对顺序步进频率信号, 综合脉冲的距离旁瓣是固定的, 采用多组脉冲综合结果相干积累的方法对信杂比改善没有好处。而对随机序列步进频率信号, 只有速度为零的目标回波综合波形的距离旁瓣是相同的, 等同于顺序步进频率信号的脉冲综合结果, 对速度不为零的目标回波, 不同频率顺序下其综合脉冲的旁瓣是不同的, 故可以通过多组不同频率顺序的脉冲回波综合结果相干积累的方法来改善信杂比。具体方法如下: 顺序发射 K 组随机序列步进频率信号, 各组脉冲的频率顺序随机选定, 然后分别对 K 组脉冲回波进行综合, 将综合结果按相同距离分辨单元相干相加, 即得到最终综合结果, 如下式所示:

$$H_l = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K H_{lk} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N m_{ik} \exp \left\{ -j2\pi f_{ik} \frac{2\Delta R}{c} l \right\}, \quad l = 0, 1, \dots, N-1, \quad (6)$$

其中 m_{ik} 为第 k 组脉冲中第 i 个脉冲的回波采样值, f_{ik} 为第 k 组脉冲中第 i 个脉冲的频率, H_{lk} 为第 k 组脉冲回波综合结果第 l 个分辨单元的值。当目标速度为零时, 由 (2)、(3) 式知相干处理结果和单组综合结果相同。当目标速度不为零时, 对不同脉冲组, 由于脉冲频率序列的选取是相互独立的, 因此, $H_{lk} (k = 1, 2, \dots, K)$ 可近似为独立同分布的随机变量, 则相干处理后 H_l 的方差是 H_{lk} 方差的 $1/K$, 也即相干处理结果的功率是相干处理前的 $1/K$ 。在实际应用中, 如果将目标速度加以补偿, 则相干处理后与目标速度不同的杂波功率将被衰减 $1/K$ 倍, 即有 $10 \lg K$ dB 的信杂比得益 (统计意义下的信杂比改善)。需要说明的是, (6) 式成立的条件是在相干积累期间目标运动没有穿过一个距离分辨单元 ΔR , 否则, 应先进行包络对齐, 将其运动距离加以补偿, 然后再用 (6) 式相干积累。

4 仿真结果

除非另有说明, 本文采用系统参数如下: $f_0 = 20\text{GHz}$, $\Delta f = 10\text{MHz}$, $N = 64$, $T_1 = 40\mu\text{s}$, $T_2 = 0.1\mu\text{s}$ 。

4.1 多目标分辨

两个或多个速度不同的目标位于同一个距离单元时, 有可能利用速度差将其分开。但顺序步进频率信号由于存在速度与距离的耦合, 对于此类情况无能为力。利用随机序列步进频率信号则可以通过对不同速度的补偿来达到区分不同目标的目的。

假定有两个目标位于同一距离单元, 速度分别为 5m/s 和 15m/s 。针对不同的信号和处理方法 (顺序步进频率、随机序列步进频率单次处理和多次相干积累) 分别对 -20m/s 到 20m/s 的速度范围进行补偿, 补偿的方法见文献 [1], 得到的脉冲综合结果如图 2 所示。

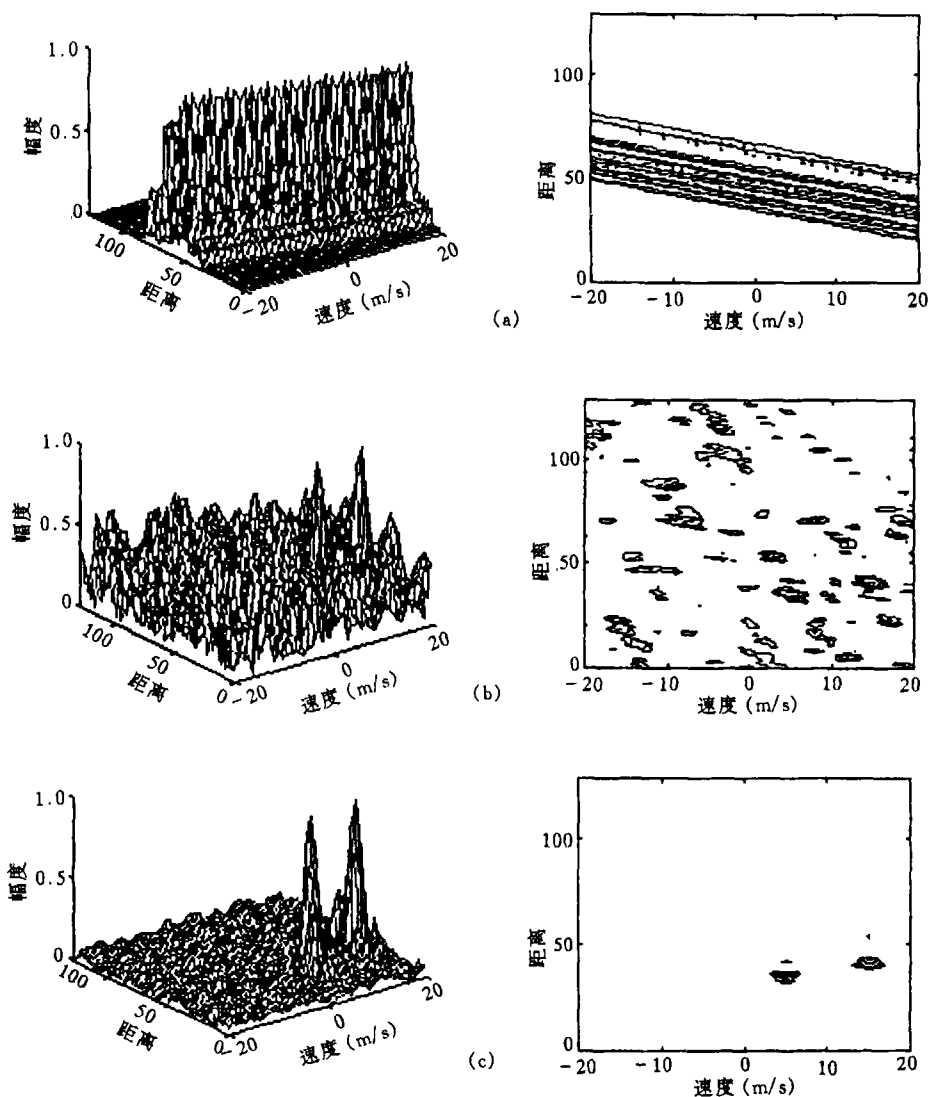


图 2 多目标分辨仿真结果

(a) 顺序步进频率 (b) 随机序列步进频率 $K=1$ (c) 随机序列步进频率 $K=20$

从图中可以看出,采用顺序步进频率信号时,两个目标的综合结果,在速度-距离平面上,没有得到分辨(图 2(a));采用随机序列步进频率信号,则大致可以将两个目标分辨(图 2(b)),由于前文所述的随机旁瓣的影响,分辨结果较差;而采用随机序列步进频率信号多组相干处理的方法,则可以明显分辨两个目标(图 2(c))。

4.2 杂波抑制

强杂波背景下的目标检测问题是雷达信号处理所关注的一个重要问题。本文所提出的随机序列步进频率信号脉组频率捷变相干处理方法可以达到抑制杂波的目的。假定杂波速度为 0,目标速度为 10m/s,在一个距离单元(发射脉冲宽度对应的纵向距离,非信号距离分辨单元)内的信杂比为 -20 dB,采用不同方法处理结果如图 3 所示,仍如前所述分别对 -20m/s

到 20 m/s 的速度进行补偿, 其中图 3(c) 的结果是采用相关法包络对齐得到。

从图 3 可以看出, 采用顺序步进频率信号时, 目标被杂波淹没, 得不到有效检测; 采用单组随机序列步进频率信号时, 由于存在随机旁瓣, 而此时的信杂比又较低, 仍检测不到目标; 通过多组相干处理方法, 背景杂波得到了有效抑制, 可以明显分离开目标和杂波。另外从本节的仿真结果看, 采用多组随机序列步进频率信号相干处理的方法在检测目标的同时, 可以对目标测速。

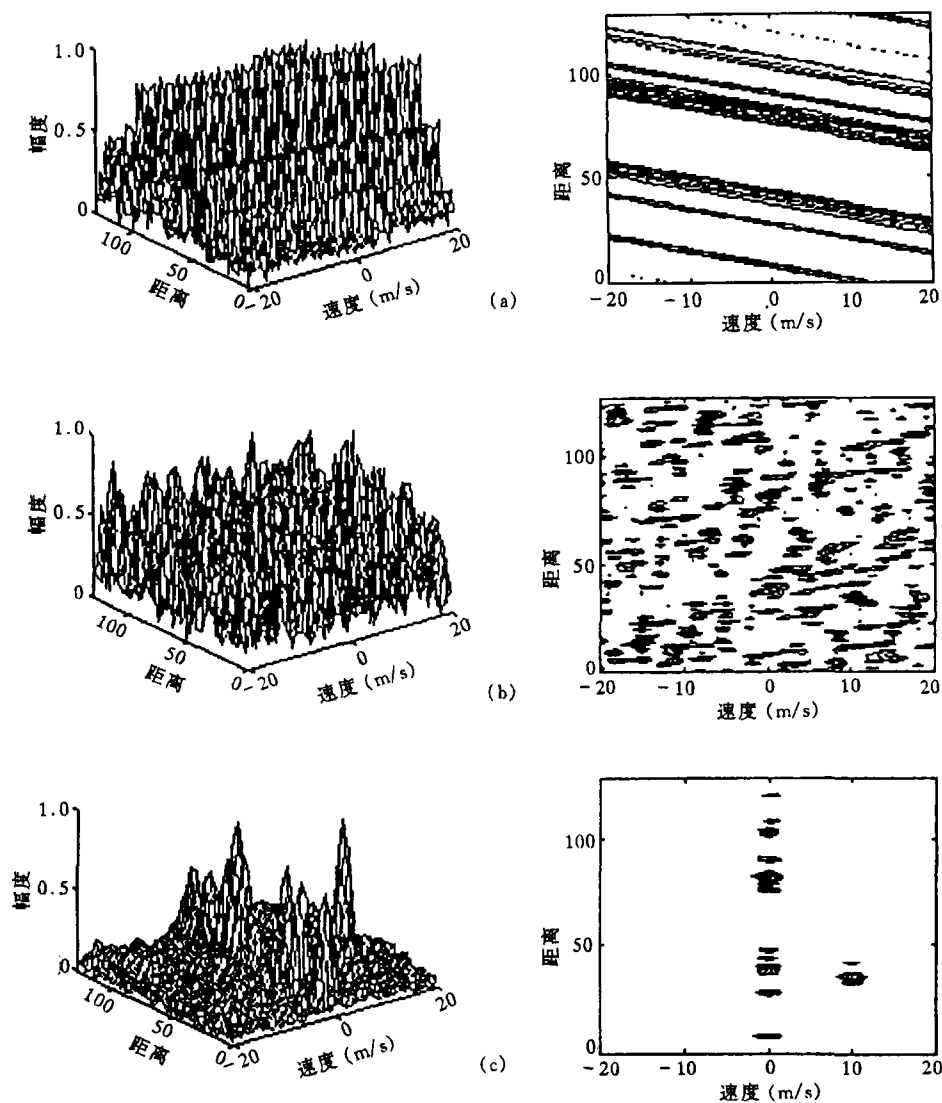


图 3 杂波抑制仿真结果

(a) 顺序步进频率 (b) 随机序列步进频率 $K=1$ (c) 随机序列步进频率 $K=20$

5 结束语

本文提出了随机序列步进频率信号形式及其多组频率捷变相干处理方法,该信号形式可以克服顺序步进频率信号距离-速度耦合的缺点,有较好的目标分辨能力,采用多组相干处理可以有效地抑制杂波,并给出了相应的计算机仿真结果。需要指出的是,如果目标速度未知,文中的速度补偿就要在可能的目标速度范围内进行,这会带来相当大的运算量。实际上,在某些应用背景下,目标速度虽然不能精确已知,但其大概值往往可以得到,这就降低了本文方法的运算量。而本文方法运算量的增加带来的一个好处是可以进一步精确测速。对随机序列步进频率信号的优化问题尚需进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar. Boston London: Artech House, 1985, 133-237.
- [2] Gill G S. Step frequency waveform design and processing for detection of moving targets in clutter. IEEE Radar'95, Alexandria: 1995, 573-579.
- [3] 刘宏伟, 王俊, 张守宏. 运动目标环境下步进频率信号设计及处理, 西安: 西安电子科技大学学报, 1997, 24(增刊): 75-82.
- [4] Long Teng, *et al.* High resolution performance of frequency stepped radar signal, IEEE ICR'96, Beijing: 1996, 242-245.

DESIGNING AND PROCESSING FOR STOCHASTIC SEQUENCE STEP FREQUENCY SIGNAL

Liu Hongwei Shen Fumin Zhang Shouhong

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract The designing of step frequency signal is concerned. Stochastic sequence step frequency signal is advanced to overcome the ordered step frequency signal's default of range-velocity coupling. The advanced signal is better than the ordered step frequency in clutter rejection and range-velocity resolution.

Key words Step frequency signal, Clutter rejection, High range resolution

刘宏伟: 男, 1971 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理等。

沈福民: 男, 1945 年生, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理及工程实现。

张守宏: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、自适应信号处理及信号检测等。