

多发射体制下小卫星分布式雷达系统的波形设计

鲍坤超 陶海红 廖桂生

(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: 该文将大时宽带宽积的空间相位编码步进频率(PCSF)信号与 m 序列码相结合, 应用于多发单收体制下的分布式小卫星雷达系统, 获得很好的距离和多普勒分辨率。仿真结果验证了该信号模型的可行性。

关键词: 雷达系统; 相位编码步进频率; m -序列; 模糊函数

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2117-03

Waveform Design for Multi-Emitted and Distributed Space-based Radar System

Bao Kun-chao Tao Hai-hong Liao Gui-sheng

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, the combination of the phase coded stepped frequency and the m -sequences is applied to the distributed space-based radar system using the mode of multi-emitter and single-receiver, and the system achieves excellent range resolution and Doppler resolution. The simulation and performance analysis demonstrate the feasibility of this signal model.

Key words: Radar system; Phase Coded Stepped Frequency(PCSF); m -sequences; Ambiguity function

1 引言

对于X波段多发单收体制, 由于星座系统的超稀疏性, 传统的相干发射由于各发射站电波间的干涉效应, 会在照射地面形成“相干斑”, 而出现“死区”, 将会产生很多栅瓣和非常小的照射面积。为此, 每个卫星发射所需带宽中互不交叠的一部分, 即发射游标。由于每个卫星发射不同频率, 各信号的正交性保证任一方向辐射的功率(密度)均为各发射站信号功率之和, 因而不存在“相干斑”。只要各发射卫星的发射信号的频率为一组正交基, 在空间就不形成“相干斑”。为了提高距离和方位分辨率, 发射频率采用步进频率^[1]工作方式, 然而并未要求每个发射站具体采用哪个频率调制的信号进行发射, 而不同发射站之间也采用随机编码方式同时发射多个正交频率的信号。

模糊函数^[2]是对雷达信号进行分析研究和波形设计的有效工具, 它描述了发射一定的波形、在采用最优信号处理的条件下, 雷达系统所具有的分辨率、测量精度和杂波抑制等性能。波形综合与设计的基本方向就是如何使信号的模糊函数与雷达工作的目标环境、信息要求达到最优的匹配。

为了获得大的时宽带宽积, 本文采用 m 序列码的相位编码信号形式。对于 m 序列波形^[3], 每给定一个 N 位的初始寄存器, 通过反馈移位寄存器得到长度为 $2^N - 1$ 最长序列码。 m 序列是伪随机序列中比较重要的一类码, 它的模糊函数为近似的图钉状, 因而具有好的距离和多普勒分辨率, 并且从其

伪随机特性可得到 m 序列码的相关特性^[4]: m 序列码具有良好的周期自相关特性, 接近于冲激函数; 其非周期自相关函数具有起伏的旁瓣; m 序列的互相关函数具有起伏的旁瓣, 即不同的 m 序列码间不正交, 具有一定的相关性。选择适当的信号波形, 使其自相关和互相关函数具有尽可能低的旁瓣, 以满足解决方位、距离模糊, 提高其分辨率等问题。

2 空间 PCSF 信号模型

2.1 信号模型

空间相位编码步进频率(PCSF)信号是一组阵元间的载频以固定步长跳变, 子脉冲内进行相位编码的脉冲序列^[5,6]。其第 n 颗卫星发射信号复包络在一个脉冲重复周期(PRT)内的数学表达式可写为

$$x_n(t) = \sum_{k=0}^{K-1} p_{n,k} \frac{1}{\sqrt{KT_1}} \text{rect}\left(\frac{t - kT_1}{T_1}\right) \exp(j2\pi c_n \Delta f t), \quad n = 1 - Ne \quad (1)$$

式中 T_1 为编码子脉冲的宽度, K 为编码长度, $p_{n,k}$ 为第 n 个卫星发射的相位编码序列, 其中 $p_{n,k} \in \{+1, -1\}$, c_n 为频率编码, 其中 $c_n \in \{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(Ne - 1)/2\}$, Δf 为发射信号之间的步进频率间隔, 则发射信号的总带宽为 $B = Ne\Delta f$, 且 $B \leq f_0$, f_0 为信号的中心频率。编码调频信号在一个 PRT 内的脉冲宽度 $T = KT_1$ 。

假设有一点目标, 其方位、仰角为 (θ_0, φ_0) , 与天线阵列中心的距离为 R_0 , 则对于多发单收体制(如图 1 所示), 接收信号经混频至基带时的信号模型为

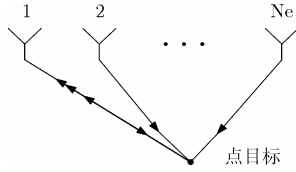


图 1 多发单收示意图

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{KT_1}} \exp(-j2\pi f_0 \tau_0) \exp(j2\pi f_0 \tau_r) \cdot \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} [\text{rect}(t - \tau_0 - kT_1) p_{n,k} \cdot \exp(j2\pi c_n \Delta f (t - \tau_0 - kT_1)) \exp(-j2\pi f_0 k T_1) \cdot \exp(j2\pi f_n \tau_{en})] \quad (2)$$

其中 $f_n = f_0 + c_n \Delta f$, τ_0 为目标与阵中心的延时, $\tau_0 = 2R_0 / c$, c 为光速; τ_r, τ_{en} 为目标与接收阵元和第 n 个发射阵元相对于阵中心的时延差。

3 空间 PCSF 信号处理及其模糊函数分析

3.1 空间 PCSF 信号处理

总和的发射信号经目标反射后由一个卫星接收, 由于总和的发射信号由已知频率的 Ne 个信号组成, 在接收端可采用快速傅氏变换处理, 将它们分离, 接着对分离后的信号根据各自到参考阵元的时延差, 作相位调整处理, 然后再将调相后的信号求和。对于多发单收体制, 各阵元所需调整的相位只需要补偿目标到各发射阵元的相位差, 若各阵元和目标的位置精确已知, 需要补偿的相位就是固定的^[7]。不难看出, 在这里调整相位与在发射端调整相位是等效的。其示意图如图 2 所示:

若各发射卫星到同一接收卫星的相位差可以精确的补偿掉, 则接收信号的复包络可表示为:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} p_{n,k} \frac{1}{\sqrt{KT_1}} \text{rect}\left(\frac{t - kT_1}{T_1}\right) \exp(j2\pi c_n \Delta f t)$$

那么, 接收端距离和多普勒的二维模糊函数可表示为

$$\begin{aligned} A(\tau, \xi) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x^*(t + \tau) \exp(j2\pi \xi t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} p_{n,k} \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t - kT_1}{T_1}\right) \exp(j2\pi c_n \Delta f t) \\ &\quad \cdot \sum_{n_2=1}^{Ne} \sum_{k_2=0}^{K-1} p_{n_2,k_2} \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t + \tau - k_2 T_1}{T_1}\right) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi c_{n_2} \Delta f (t + \tau)) \exp(j2\pi \xi t) dt \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{n_2=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} p_{n,k} p_{n_2,k_2} \exp(-j2\pi c_{n_2} \Delta f \tau) \\ &\quad \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{t - kT_1}{T_1}\right) \text{rect}\left(\frac{t + \tau - k_2 T_1}{T_1}\right) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi((c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f + \xi)t) dt \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{n_2=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} p_{n,k} p_{n_2,k_2} \exp(-j2\pi c_{n_2} \Delta f \tau) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi((c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f + \xi)((k_1 + k_2)T_1 - \tau)) \\ &\quad \cdot \frac{\sin(\pi((c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f + \xi)(T_1 - |\tau + (k_1 - k_2)T_1|))}{\pi((c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f + \xi)}, \\ &\quad |\tau + (k_1 - k_2)T_1| < T_1 \end{aligned} \quad (3)$$

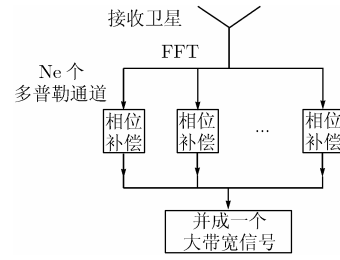


图 2 信号处理框图

下面分别讨论其距离分辨率和其多普勒分辨率特性。

当 $\xi = 0$ 时, 其距离模糊函数为

$$\begin{aligned} A(\tau, 0) &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{n_2=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} p_{n,k} p_{n_2,k_2} \exp(-j2\pi c_{n_2} \Delta f \tau) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi(c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f ((k_1 + k_2)T_1 - \tau)) \\ &\quad \cdot \frac{\sin(\pi(c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f (T_1 - |\tau + k_1 T_1 - k_2 T_2|))}{\pi(c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f} \end{aligned} \quad (4)$$

当 $n_1 = n_2 = n, k_1 = k_2 = k$ (各阵元采用相同的编码序列)时, 考虑其主瓣:

$$\begin{aligned} A(\tau, 0) &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} K \exp(-j2\pi c_n \Delta f \tau) (T_1 - |\tau|) \\ &= \frac{\sin(\pi Ne \Delta f \tau)}{\sin(\pi \Delta f \tau)} \cdot \frac{T_1 - \tau}{T_1} \end{aligned} \quad (5)$$

可见, 其距离模糊函数的主瓣宽度由 $Ne \Delta f, T_1$ 两部分决定^[8, 9]。

当 $\tau = 0$ 时, 多普勒模糊函数为

$$\begin{aligned} A(0, \xi) &= \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{Ne} \sum_{n_2=1}^{Ne} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} p_{n,k} p_{n_2,k_2} \\ &\quad \cdot \exp(j\pi(\xi + (c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f)(k_1 + k_2)T_1) \\ &\quad \cdot \sin(\pi(\xi + (c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f) |T_1 - k_1 T_1 + k_2 T_2|) \\ &\quad / [\pi \xi + (c_{n_1} - c_{n_2}) \Delta f] \end{aligned} \quad (6)$$

同样, 当 $n_1 = n_2 = n, k_1 = k_2 = k$ 时, 考虑其主瓣:

$$\begin{aligned} A(0, \xi) &= \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{K-1} K \exp(j2\pi \xi k T_1) \frac{\sin(\pi \xi T_1)}{\pi \xi} \\ &= \exp(j\pi \xi (K-1) T_1) \frac{\sin(\pi \xi K T_1)}{\pi \xi K T_1} \end{aligned} \quad (7)$$

可见, 其多普勒模糊函数的主瓣宽度只取决于信号的时宽 T 。

3.2 角度、距离、多普勒的耦合性分析

由于目标的方向位置, 在搜索检测时提供的目标方向是粗略的, 因此接收卫星和各发射卫星的延时差不能精确补偿, 从而引起测距误差。反之亦然。在多发单收体制下, 每颗卫星在不同的时间通过脉间频率编码捷变的方式发射步进频率, 而不同卫星之间也采用随机编码方式发射多个正交步进频率的信号。则在空时编码的情况下距离和多普勒的二维模糊函数可表示为

$$A(\tau, \xi) = \frac{1}{T} \sum_{n_1=1}^{N_e} \sum_{n_2=1}^{N_e} \sum_{l_1=0}^{P-1} \sum_{l_2=0}^{P-1} \sum_{k_1=0}^{K-1} \sum_{k_2=0}^{K-1} p_{n_1, k_1, l_1} p_{n_2, k_2, l_2} \cdot \exp(-j2\pi c_{n_2, l_2} \Delta f \tau) \cdot \exp(j\pi((c_{n_1, l_1} - c_{n_2, l_2}) \Delta f + \xi) \cdot ((k_1 + k_2)T_1 + (l_1 + l_2)T_r - \tau)) \cdot \frac{\sin(\pi((c_{n_1, l_1} - c_{n_2, l_2}) \Delta f + \xi)(T_1 - |\tau + (k_1 - k_2)T_1 + (l_1 - l_2)T_r|))}{\pi((c_{n_1, l_1} - c_{n_2, l_2}) \Delta f + \xi)}, \quad | \tau + (l_1 - l_2)T_r + (k_1 - k_2)T_1 | < T_1 \quad (8)$$

其中 T_r 为脉冲重复周期, c_{n_1, l_1} , c_{n_2, l_2} 为各个重复周期的频率编码。

在选择各阵元辐射信号的编码序列时, 不仅要求这些序列具有良好的自相关特性, 而且彼此间具有良好的互相关特性, 即要求自相关函数的最大旁瓣电平和最大互相关函数值比较低。拟采用多发单收阵列模型的空时编码技术和遗传算法来解决随机发射顺序编码的优化问题, 从而解决方位-距离模糊和去“耦合”问题, 提高其距离、多普勒及方位分辨率。

4 仿真试验

本文采用文献[3]利用混合遗传算法产生的码长为 1023 的优化 m 序列码, 且 $T\Delta f = 1023$ 。

仿真参数: $f_0 = 1e10\text{Hz}$; $\Delta f = 50e6\text{Hz}$; $N_e = 3$; $B = N_e \Delta f = 150e6\text{Hz}$; $T = 20.46e-6\text{s}$; $K = 1023$ 。仿真结果如图 3 所示。

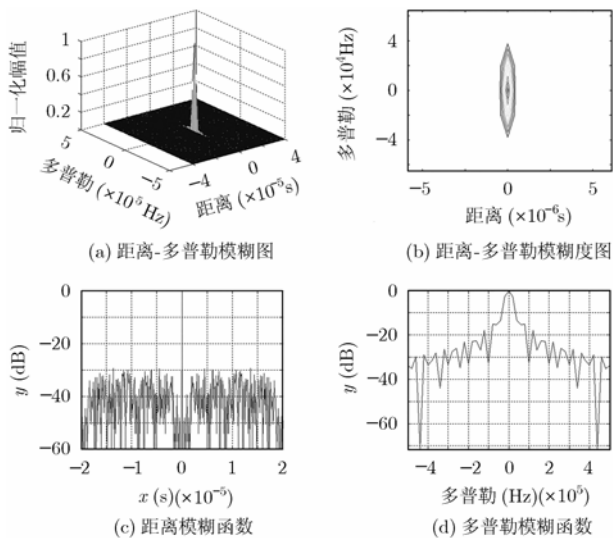


图 3 距离-多普勒模糊图与模糊度图

5 结束语

本文针对多发单收体制下的分布式小卫星雷达系统, 在采用空间 PCSF 的信号形式下, 推导其接收信号的模糊函数具体形式, 分析了其距离和多普勒的分辨特性, 仿真结果验证了该信号形式的可行性。下一步可在空时编码技术的基础上, 利用遗传算法, 构建合适的代价函数, 来解决方位和距离模糊和去“耦合”问题, 从而进一步地提高其分辨率。

参考文献

- [1] 龙腾, 毛二可, 何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报, 1998, 26(12): 84-87.
- [2] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 合肥: 国防工业出版社, 1984: 第四章.
- [3] 陶海红, 廖桂生, 王伶. 基于混合遗传算法的 m 序列波形设计[J]. 电波科学学报, 2004, 19(3): 253-257.
- [4] 傅耀先. 相位编码雷达性能与应用研究. [硕士论文], 南京: 南京理工大学, 2002.
- [5] 赵彬, 刘长羽, 权太范, 许荣庆. 高速目标的相位编码步进频率信号分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 284-287.
- [6] Jin Kai, Wang Wei-dong, and Wang Dong-jin. The study on a new radar waveform with high range resolution[J]. ICSP'04 Proceedings, 2004 7th International Conference on Volume 3, 31 Aug.-4 Sept. 2004, vol.3: 1957-1960.
- [7] 保铮, 张庆文. 一种新型的米波雷达—综合脉冲与孔径雷达[J]. 现代雷达, 1995, 17(1): 1-13.
- [8] 陈伯孝, 张守宏. 基于相位编码的稀布阵综合脉冲孔径雷达的脉冲压缩性能分析[J]. 电子科学学刊, 1998, 20(1): 50-55.
- [9] Sitler K L, Temple M A, Novack R C, and Hughes J A. High range resolution profiling using phase-coded, stepped-frequency waveforms. *Electronics Letters*, 2002, 38(1): 46-48.

鲍坤超: 男, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号波形优化设计、雷达信号与信息处理。

陶海红: 女, 1976 年生, 副教授, 主要研究方向为雷达信号与信息处理及智能方法在信号处理上的应用。

廖桂生: 男, 1963 年生, 博士教授, 博士生导师, 主要从事统计信号处理、子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究。