

基于 OFDM 的多载波调制雷达系统信号处理及检测

顾 陈 张劲东 朱晓华*

(南京理工大学电光学院 南京 210094)

摘 要: 该文首先给出了基于 OFDM 的多载波调制(OFDM-MCM)雷达系统的回波模型,在此基础上推导了系统的匹配滤波输出解析式,分析了系统的检测性能,并通过仿真对比分析了单载波调制(SCM)雷达和 OFDM-MCM 雷达的脉冲压缩输出积分旁瓣比和接收机工作特性。结果表明,与 SCM 雷达相比,在测量高速目标时,OFDM-MCM 雷达具有更优的脉冲压缩性能和更高的检测概率。

关键词: 雷达; 多载波; OFDM; 脉冲压缩; 检测概率

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1298-03

Signal Processing and Detecting for Multicarrier Modulated Radar System Based on OFDM

Gu Chen Zhang Jin-dong Zhu Xiao-hua

(Electronic Engineering Department, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The echo signal model of MultiCarrier Modulated radar system based on OFDM (OFDM-MCM) is introduced firstly, the expression of the match filtering output is deduced based on it, and the detection probability is analyzed, then simulation of the Integrated SideLobe Ratio(ISLR) of the pulse compression output and Receiver Operating Characteristic(ROC) between the Single Carrier Modulated (SCM) radar and OFDM-MCM radar is compared. The simulation results indicate the OFDM-MCM radar has the better pulse compression performance and higher detection probability for high speed target.

Key words: Radar; Multicarrier; OFDM; Pulse compression; Detection probability

1 引言

正交频分复用技术(OFDM)是一种在通信系统中受到广泛关注的多载波数字调制方式,OFDM 将数据流用多个互相正交的子载波进行调制,因此具有较强的抗衰落和抗干扰能力、较高的频谱利用率以及易于系统实现等优点。随着雷达技术的发展,OFDM 的概念被逐渐引入到雷达系统中。OFDM 将传统的单载波发射信号调制到多个子载波上进行叠加后发射,因此多载波雷达信号具有更复杂的形式,使得敌方难以进行电子侦察和干扰,具有低截获的特点。

Prasad 将 OFDM 的概念应用于雷达系统,提出了多载波雷达系统框架并对各模块进行分析和仿真,发现多载波雷达系统具有良好的抗噪声、抗干扰和探测能力^[1]。但该文献主要侧重对系统总体的描述,对信号处理和检测模块缺少定量分析。针对该问题,本文由 OFDM-MCM 雷达系统的工作原理入手,给出了回波信号表达式,并着重研究了存在目标多普勒频移时系统信号处理和检测性能,分析了参数选择对脉冲压缩输出和检测概率的影响,并与单载波雷达系统进行比较,最后进行计算机仿真和分析。结果表明 OFDM-

MCM 雷达系统对多普勒相对不敏感,脉冲压缩性能和检测性能优于单载波系统。

2 OFDM-MCM 雷达系统原理

OFDM 的基本思想是将 N 位数据调制到分别 N 个互相正交的子载波上,将 N 路调制后的信号相加后发送,接收端则利用各子载波的频率间的正交关系,将每路信号分离出来,实现解调。在发射端,OFDM-MCM 雷达系统将原始的串行信号经过串并转换,变为 N 路并行的信号,通过 IDFT 运算将信号分别调制到 N 个互相正交的子载波上,经并串转换和数模转换后,将信号上变频至射频信号,通过发射机发送出去。在接收端,首先对接收的目标回波信号进行下变频,降为视频信号;然后通过模数转换和串并变化后利用 DFT 进行解调;最后将解调后的信号通过匹配滤波器进行脉冲压缩处理,由设定的虚警概率获得门限值进行判决,从而得到结果。

考虑具有 N 个子载波的 OFDM-MCM 雷达系统,设 T 为信号持续时间, $s(n)$ 为分配给第 n 个子载波的信号,此时,发射信号可表示为

$$s_T(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} s(l) \exp(j2\pi lk / N) p(t - kT / N) \quad (1)$$

其中 $p(t)$ 为发射机内使用的成形低滤波器的冲激响应。设多普勒频移为 f_d ，此时回波信号的表达式为

$$s_R(t) = \exp[j2\pi(f_0 + f_d)t] \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} s(l) \exp(j2\pi lk/N) p(t - kT/N) \quad (2)$$

将回波信号经过下变频，采样和解调处理后的信号可示为^[2]

$$s_{R-DFT}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} a_{n-m} s(n) \quad (3)$$

其中 a_{n-m} 为第 n 路子载波对第 m 路子载波的影响，表达式为

$$a_{n-m} = \frac{1}{N} \frac{\sin[\pi(n-m+f_dT)]}{\sin[\pi(n-m+f_dT)/N]} \cdot \exp[j\pi(N-1)(n-m+f_dT)/N] \quad (4)$$

设 $i = N - \text{round}(f_dT)$ ， $\text{round}(f_dT)$ 为归一化多普勒频移最趋近的整数，则 a_i 为 a_{n-m} 中的最大值。又因为当 $n-m < 0$ 时， $a_{n-m} = a_{N+n-m}$ ，因此式(3)可改写为

$$s_{R-DFT}(m) = a_i s(m+i) + \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq i}}^{N-1} a_n s(m+n) \quad (5)$$

因此，解调后的回波信号可看成是由 a_i 加权的第 $m+i$ 路有效信号和 a_n 加权的其余子载波上信号对其干扰的总和。

3 OFDM-MCM 雷达系统信号处理与检测

在给出回波模型后，本节将详细分析信号的脉压和检测性能。3.1 节推导了信号脉冲压缩输出的表达式，分析了影响脉冲压缩输出的参数，并得出参数对输出影响的表达式。3.2 节通过与 SCM 系统的对比，得到 OFDM-MCM 系统的检测性能。

3.1 脉冲压缩输出分析

对式(5)信号进行脉冲压缩处理，此时输出结果为

$$\begin{aligned} y(k) &= E \left[\frac{1}{N} s_{R-DFT}(m) s^*(k+m) \right] \\ &= E \left[\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} a_i s(i+m) \cdot s^*(k+m) \right] \\ &\quad + E \left[\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq i}}^{N-1} a_n s(n+m) \cdot s^*(k+m) \right] \\ &= a_i \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1-|k+i-N|} s(l) s(l+|k+i-N|) \\ &\quad + \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq i}}^{N-1} a_n \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1-|k+n-N|} s(l) s(l+|k+n-N|) \\ &= y_E(k) + y_I(k) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知，对信号 $s_{R-DFT}(m)$ 匹配处理的输出结果包括两项：一项为有效信号 $s(i+m)$ 与原始信号 $s(m)$ 的互相关即 $y_E(k)$ ，另一项为干扰信号 $s(n+m)_{n \neq i}$ 与原始信号 $s(m)$ 的互相关即 $y_I(k)$ 。结合由式(4)和式(6)可以看出，除去原始信号

的自相关函数外，影响脉冲压缩输出峰值的参数即为：载波数 N 和归一化多普勒频移 f_dT 。由于当载波数大于 16 时，系数 a 趋于收敛值，载波数的增加对输出无显著影响^[3]，因此下文着重分析当载波数足够大时，参数 f_dT 对脉冲压缩输出的影响。

图 1 为 16 个载波的 OFDM-MCM 系统中加权系数与 f_dT 的变化关系图(前 4 个加权系数)。由图可知， f_dT 的变化对脉冲压缩输出的影响可分为两种情况分析：

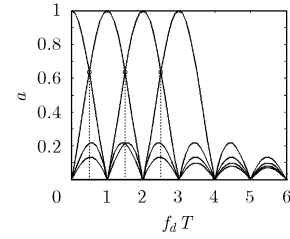


图 1 复加权系数 a 与 f_dT 的变化关系图

(1) 当 $n_1 + 0.5 < f_dT \leq n_1 + 1$ 时 (n_1 为整数)，随着 f_dT 的增加，最大加权系数 a_i 增加而其余系数 a_n 减小。当 $f_dT = n_1 + 1$ 时，最大加权系数 a_i 达到最大值 1，其余各系数降为最小值 0，此时多普勒频移为相邻子载波频率间隔的整数倍，子载波间仍能保持正交，有效信号的匹配输出 y_E 达到最大值，而干扰信号经匹配滤波器后的输出 y_I 为最小值。因此整数倍频移对脉冲压缩输出的影响仅表现在峰值的位移，而对输出幅值无影响。

(2) 当 $n_1 \leq f_dT < n_1 + 0.5$ 时，随着 f_dT 的增加，最大加权系数 a_i 减小而其余系数 a_n 增加。当 $f_dT = n_1 + 0.5$ 时， a_i 降为最小值 0.6366，其余各系数增为最大值，此时子载波的正交性遭到破坏，子载波间的干扰达到最高， y_E 达到最小值，而 y_I 为最大值。因此分数倍频移不仅对脉冲压缩输出产生位移，还对其幅度产生影响，峰值幅度关于 f_dT 的表达式为

$$\beta = \begin{cases} \left| \frac{\sin[\pi(f_dT - n_1)]}{N \sin[\pi(f_dT - n_1)/N]} \right|, & n_1 < f_dT \leq n_1 + 0.5 \\ \left| \frac{\sin[\pi(f_dT - (n_1 + 1))]}{N \sin[\pi(f_dT - (n_1 + 1))/N]} \right|, & n_1 + 0.5 < f_dT \leq n_1 + 1 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 探测性能分析

设输入噪声为高斯白噪声，则由上节分析可知，回波信号经解调及脉压处理后，输出信号峰值位于 $\alpha_{MCM} = N - \text{round}(f_dT)$ 处，峰值幅度如式(7)所示。而相同情况下，SCM 系统的回波峰值位于 $\alpha_{SCM} = N$ 处，峰值幅度为 $\left| \frac{\sin[\pi(f_dT)]}{\pi f_dT} \right|$ 。因此，在相同的虚警概率情况下，当 $f_dT \leq 0.5$ 时，OFDM-MCM 系统的检测概率与 SCM 系统基本相同；当 $f_dT > 0.5$ 时，OFDM-MCM 系统的检测概率则将大大高于 SCM 系统。

4 性能仿真

本文以 512 位 m 序列为例, 当目标存在多普勒频移时, 对 SCM 雷达系统和 OFDM-MCM 雷达系统的脉冲压缩输出和检测概率进行仿真对比。仿真条件如下: 雷达带宽 $B = 2\text{MHz}$, 信号子脉冲宽度 $t_b = 0.5\mu\text{s}$, 中心频率为 $f_c = 3000\text{MHz}$, 目标速度为 $0\sim 500\text{m/s}$, 多载波的载波数 $N = 512$ 。

图 2 为 OFDM-MCM 雷达系统和 SCM 系统的脉冲压缩输出积分旁瓣比(ISLR)与 $f_d T$ 的关系图。由图可知, OFDM-MCM 系统的脉冲压缩输出 ISLR 值以 $f_d T$ 为周期, 呈现周期变化, 在 $f_d T = n_1$ 的整数频偏时 ISLR 值最大达到 80dB, 而在 $f_d T = n_1 + 0.5$ 的分数倍频偏时, ISLR 值最小为 61dB。此外, 与 SCM 系统对比可知, 当 $f_d T \leq 0.5$ 时, OFDM-MCM 系统的 ISLR 值略小于 SCM 系统; 当 $f_d T > 0.5$ 时, OFDM-MCM 系统的 ISLR 值比 SCM 系统平均提高 43.7dB。因此 OFDM-MCM 系统在 $f_d T > 0.5$ 时优势明显, 更适用于检测高速目标。

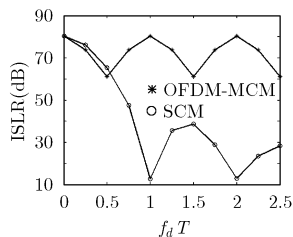


图 2 脉冲压缩输出 ISLR 与 $f_d T$ 的关系对比图

图 3 与图 4 分别为目标速度为 250m/s 即 $f_d T = 1.28$ 时, OFDM-MCM 系统和 SCM 系统的接收机工作特性(ROC)图。由图可知, 当虚警概率为 $10e-5$ 时, 信噪比为 10dB, 13dB 和 15dB 的 OFDM-MCM 系统的检测概率分别比相同情况下的 SCM 系统提高 17%, 57.34% 和 88.38%。由此验证上节结论, 当检测高速目标时, OFDM-MCM 系统的检测性能远高于 SCM 系统。

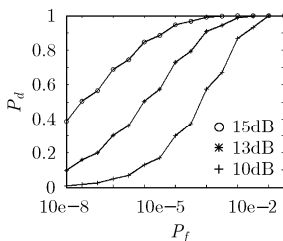


图 3 OFDM-MCM 系统的 ROC 图

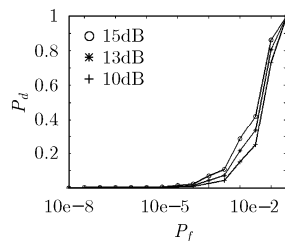


图 4 SCM 系统的 ROC 图

5 结束语

本文以 OFDM-MCM 雷达系统为背景, 研究了该系统的信号处理和检测过程, 着重分析了目标运动时, 参数 $f_d T$ 对系统匹配滤波输出和检测的影响。发射相位编码等多普勒敏感的波形时, SCM 雷达的脉冲压缩性能随多普勒频率的增加急剧恶化, 检测概率也随之下降。与 SCM 雷达相比, OFDM-MCM 雷达对多普勒频率相对不敏感, 当检测高速目标时, 该雷达系统优势明显。由仿真结果可知, 当 $f_d T > 0.5$, OFDM-MCM 雷达的脉冲压缩输出 ISLR 值相对 SCM 雷达平均提高 43.7dB; 在不同信噪比下系统的检测概率比相应的 SCM 系统有大幅提高, 因此 OFDM-MCM 系统在高速目标探测方面具有良好的应用前景。此外, 该系统的调制与解调模块可由 IFFT 和 FFT 完成, 这使其在工程使用中易于实现。

参考文献

- [1] Prasad N N S R K, Shameem V, Desai U B, and Merchant S N. Improvement in target detection performance of pulse coded Doppler radar based on multicarrier modulation with fast Fourier transform (FFT). *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2004, 151(1): 11-17.
- [2] Julia Fernandez-Getino Garcia M, Edfors Ove, and Paez-Borralló Jose M. Frequency offset correction for coherent OFDM in wireless systems. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2001, 47(1): 187-193.
- [3] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用. 北京: 人民邮电出版社, 2003, 第 4 章.
- [4] Richard M Davis, Ronald L Fante, and Richard P Perry. Phase-coded waveforms for radar. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 401-408.
- [5] Xujuan Hu, Jiahao Deng, and Huiping Sang. Pulse compression technique of radio fuze. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2006, 15(4): 401-405.
- [6] Horii Hiroyuki, Tamura Sayaka, and Fujii Masahiro. Improving detection performance of pre-coded STBC OFDM by re-generating pre-coded symbols. *Consumer Electronics, ICCE '06. 2006 digest of technical Papers*, 2006: 329-330.

顾 陈: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号分析与处理。

张劲东: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为雷达系统、信号处理。

朱晓华: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子系统与信号处理、雷达与制导信息处理。