

# 新型多相结构 MWC 宽带数字接收机设计\*

陈涛,蔡兴鹏,潘大鹏

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出一种基于多相调制宽带转换器结构的新型压缩采样数字接收机,可对宽带中频信号进行截获。新型接收机结构包括:串并转换、并行相乘、多相滤波三个模块。在用相同乘法器资源的条件下,新型接收机结构的整体数据速率远低于现有的调制宽带转换器结构,并且通过仿真验证了其正确性。该新型结构为调制宽带转换器离散压缩采样数字接收机在现场可编程门阵列上的物理实现奠定了基础,使整个接收机结构更具有实际工程应用价值。

**关键词:**信号处理;宽带数字接收机;压缩采样;调制带宽转换器;多相结构

**中图分类号:**TN957.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)01-145-05

## Design of a novel MWC wideband digital receiver based on the polyphase structure

CHEN Tao, CAI Xingpeng, PAN Dapeng

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new compressed sampling digital receiver based on polyphase MWC structure was proposed to intercept wideband IF (intermediate frequency) signal. The new receiver structure includes three modules: serial parallel conversion, parallel multiplication and polyphase filtering. With the same multiplier resources, the working rate of the new receiver structure is much lower than that of the existing MWC structure. Simulation result verifies the correctness of this new structure. The design lays a foundation for the physical realization of the MWC discrete compressed sampling digital receiver on the FPGA (field programmable gate array) and makes the whole receiver structure more practical in engineering application.

**Keywords:** signal processing; wideband digital receiver; compressed sampling; modulated wideband converter; polyphase structure

随着高速模/数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 的不断发展,现代电子战对宽带数字接收机的需求越来越大<sup>[1-5]</sup>。然而,随着电磁环境的不断复杂化,雷达普遍开始采用大带宽的低截获率雷达信号<sup>[6]</sup>,这对传统信道化宽带数字接收机提出了非常严峻的考验。传统信道化宽带数字接收机大多采用均匀信道化结构,其信道一经划分,各信道监测带宽就不可改变<sup>[7]</sup>,在接收大带宽信号的时候会产生严重的跨信道问题,导致信道判决出错,生成错误的脉冲描述字信息,对后续的信号处理产生严重的影响<sup>[8-11]</sup>。

针对上述传统数字接收机亟待解决的问题,压缩采样理论给出了新的解决方案。Chen 等<sup>[12-13]</sup>提出的基于压缩采样的调制宽带转换器构造 (Modulation Wideband Converter, MWC) 结构可对频域稀疏多带信号进行欠奈奎斯特 (sub-

Nyquist) 采样,并推导出了基于 MWC 结构的压缩采样信号检测方法。Chen 等<sup>[14]</sup>将 MWC 结构从模拟域扩展到离散域,推导得出了基于 MWC 结构的新型数字宽带接收机。Chen 等<sup>[15]</sup>进一步通过 MWC 结构对欠奈奎斯特采样信号进行了频谱估计。文献[16]扩展了 MWC 结构的能力,提出了一个完整的欠采样雷达数字接收机。文献[17]利用 MWC 离散压缩采样数据,完成了基于压缩采样宽带数字接收机的脉内调制类型识别。文献[18]进一步提出了 MWC 均匀线阵结构,提高了 MWC 的灵敏度和重构精度。文献[19-21]分别研究了不同的 MWC 均匀线阵结构,完成了信号载频和到达角的联合重构。Rani 等<sup>[22]</sup>从概念、原理、实现和应用等不同角度对现有的基于 MWC 结构的压缩感知系统进行了整体综述。

但是上述文献均采用了对 ADC 采样得到的

\* 收稿日期:2018-08-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61571146);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCFP201808)

作者简介:陈涛(1974—),男,沈阳铁岭人,教授,博士,博士生导师,E-mail:chentao@hrbeu.edu.cn

离散数据,先混频再滤波最后抽取的 MWC 结构。在实际工程应用中,ADC 的随路时钟往往处在一个很高的频率,导致现有 MWC 结构整体工作在较高的数据速率下。受限与现有现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片的工作速率,现有的 MWC 数字接收机结构无法在 FPGA 端进行工程上的物理实现。

## 1 MWC 数字接收机原理

文献[23]指出,电子侦察环境中的非合作信号通常在时频二维平面上是稀疏分布的,且现如今电子战战场中雷达发射信号均为脉冲形式,信号频谱不会充满整个监测频段,因此电子战接收机接收信号可以被视为频域稀疏信号,故可以使用 MWC 结构的宽带数字接收机对信号进行欠采样,再利用信号重构算法对原始信号进行恢复。

原型 MWC 结构离散压缩采样数字宽带接收机的总体结构如图 1 所示。该接收机处理信号为经过 ADC 采样后的数字信号,在各支路上离散数字信号经过伪随机序列(Pseudo-Random Sequence, PRS)混频后,其频谱被混频到所有子带上,选用低通滤波器进行滤波,再对滤波后的信号进行抽取,便可以得到 MWC 数字接收机输出的压缩采样信号。

假设 MWC 压缩采样宽带数字接收机接收到的一个脉冲信号的离散数字模型如式(1)所示:

$$\mathbf{x}[n] = \mathbf{s}[n] + \boldsymbol{\eta}[n], 0 \leq n < N \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{x}[n]$  为接收机处理的采样信号,  $\mathbf{s}[n]$  为采样信号中的有用信号,  $\boldsymbol{\eta}[n]$  表示信号中的噪声,  $N$  为原始信号采样点数。则  $\mathbf{x}[n]$  的离散时间傅立叶变换为:

$$X(e^{j2\pi f T_{\text{NYQ}}}) = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}[n] e^{-j2\pi f n T_{\text{NYQ}}} \quad (2)$$

式中,  $T_{\text{NYQ}}$  表示 ADC 采样时间间隔。

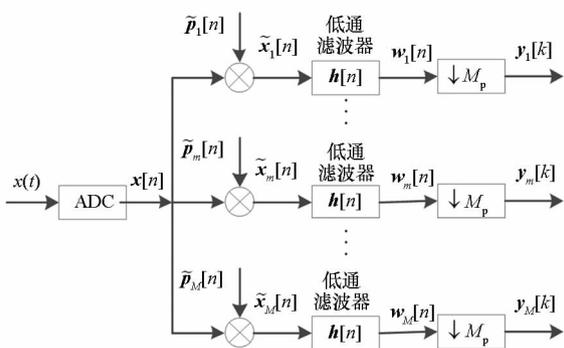


图 1 现有 MWC 数字接收机总体框图

Fig. 1 Existing MWC digital receiver general block diagram

文献[14]提出的离散 MWC 数字接收机结构所采用的混频信号为循环移位的周期性 PRS,其第  $m$  路的主值序列  $\mathbf{p}_m[n]$  与第 1 路的主值序列  $\mathbf{p}_1[n]$  之间存在如下关系:

$$\mathbf{p}_m[n] = \mathbf{p}_1[n - m + 1]_{M_p} \mathbf{R}_{M_p}[n] \quad (3)$$

式中:  $M_p = T_p f_{\text{NYQ}}$  为每个周期包含的元素个数,  $\mathbf{R}_{M_p}[n]$  为矩形函数,在  $0 \leq n \leq M_p - 1$  时取值为 1。进而可以得出第  $m$  路序列  $\tilde{\mathbf{p}}_m[n]$  的离散傅立叶级数为:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{p}}_m[n] &= \frac{1}{M_p} \sum_{l=0}^{M_p-1} P_m(l) e^{j\frac{2\pi}{M_p}nl} \\ &= \frac{1}{M_p} \sum_{l=0}^{M_p-1} P_1(l) e^{j\frac{2\pi}{M_p}(n-m+1)l} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $l$  代表子带索引号。

根据 MWC 结构中伪随机序列  $\tilde{\mathbf{p}}_m[n]$  的混频特性, MWC 压缩采样宽带数字接收机的处理频带被划分为  $M_p$  个子带,各子带带宽为  $f_p = f_{\text{NYQ}}/M_p$ ,其中  $f_{\text{NYQ}}$  为奈奎斯特采样频率。通过式(2)和式(4)可以得到混频后信号的离散傅立叶变换为:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_m(e^{j2\pi f T_{\text{NYQ}}}) &= \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}[n] \cdot \tilde{\mathbf{p}}_m[n] e^{-j2\pi f n T_{\text{NYQ}}} \\ &= \frac{1}{M_p} \sum_{l=0}^{M_p-1} P_m(l) X(e^{j2\pi f T_{\text{NYQ}}(f - f_p)}) \\ &= \frac{1}{M_p} \sum_{l=0}^{M_p-1} P_1(l) X(e^{j2\pi f T_{\text{NYQ}}(f - f_p)}) e^{-j\frac{2\pi}{M_p}(m-1)l} \end{aligned} \quad (5)$$

之后对混频后的信号进行低通滤波,并对滤波后的信号进行  $M_p$  倍抽取操作,最终得到 MWC 一个支路输出。假设使用低通滤波器进行滤波,根据文献[16]可知,最终推导得到第  $m$  路输出为:

$$\begin{aligned} Y_m(e^{j2\pi f T_s}) &= \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{y}_m[k] e^{-j2\pi f k T_s} \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} \{ \mathbf{w}_m[n] \} \downarrow_{M_p} e^{-j2\pi f k T_s} \\ &= \frac{1}{M_p} \sum_{l=0}^{M_p-1} P_m(l) X(e^{j2\pi f T_{\text{NYQ}}(f - f_p)}) \\ &= \frac{1}{M_p} \sum_{l=0}^{M_p-1} P_1(l) X(e^{j2\pi f T_{\text{NYQ}}(f - f_p)}) e^{-j\frac{2\pi}{M_p}(m-1)l} \end{aligned} \quad (6)$$

为了保证后续压缩采样信号的完整重构, MWC 压缩采样宽带数字接收机支路数需要满足如式(7)所示条件<sup>[24]</sup>。

$$M \geq CK \lg(M_p/K) \quad (7)$$

式中:  $K$  为信号的频域稀疏度,  $M$  为支路个数,  $C$  为一个独立的正整数。

## 2 新型 MWC 数字接收机结构推导

从图 1 中可以看出,现有 MWC 压缩采样数字宽带接收机的混频模块和低通滤波模块均工作在高速奈奎斯特采样频率下。这使得现有 MWC 数字压缩接收机虽然为后续数字信号处理节省了大量的冗余采样数据,但是整体接收机结构仍然工作在高速数据速率下。

本节将在现有 MWC 数字压缩接收机的基础上,利用低通滤波器抽取前移定理和混频伪随机序列的周期特性,推导得到多相 MWC 结构的压缩采样宽带数字接收机。与原型接收机结构相比,在消耗相同乘法器资源的情况下,可以大幅降低接收机工作时的数据速率,使其可以在 FPGA 端进行物理实现。

### 2.1 多相滤波抽取前移

假设 MWC 结构中低通滤波器单位脉冲响应为  $h[n]$ , 则其  $Z$  变换可以表示为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^N h[n]z^{-n} \quad (8)$$

对式(8)进行  $M_p$  倍的抽取可以得到其多相形式如式(9)所示。

$$H(z) = \sum_{l=0}^{M_p-1} z^{-l} \sum_{n=0}^N h[M_p n + l]z^{-M_p n} \quad (9)$$

记

$$E_l(z) = \sum_{n=0}^N h[M_p n + l]z^{-n} \quad (10)$$

则可将式(9)变换为式(11)的形式。

$$H(z) = \sum_{l=0}^{M_p-1} z^{-l} E_l(z^{M_p}) \quad (11)$$

若将  $M$  倍的抽取器前移到滤波器之前,则滤波器的变量  $z$  的幂会减少  $M$  倍<sup>[25]</sup>。因此,将现有 MWC 结构中的  $M_p$  倍抽取器前移到多相形式的低通滤波器之前,则可以得到抽取前移后滤波器单位脉冲响应的  $Z$  变换为:

$$H(z) = \sum_{l=0}^{M_p-1} z^{-l} E_l(z) \quad (12)$$

因此,得到单支路的多相 MWC 滤波抽取前移结构图如图 2 所示。

### 2.2 新型多相结构

由于原型 MWC 压缩采样接收机中,混频序列具有周期性,其周期为  $M_p$ 。这说明,对于该接收机某一支路来说,信号每隔  $M_p$  个点所乘的数是相同的,即为该支路混频序列主值序列中的第  $i$  个元素。所以将 MWC 结构中各支路 PRS 的主值序列所有  $M_p$  个元素与多相低通滤波器中的对应项并

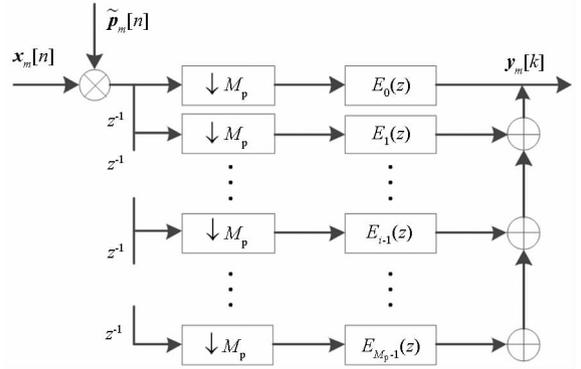


图 2 单支路多相滤波抽取前移示意图

Fig. 2 Single polyphase filter extraction forward shift diagram

行排列,即可构成新的多相 MWC 结构。新多相结构的单位脉冲响应的  $Z$  变换如式(13)所示。

$$H'(z) = \sum_{l=0}^{M_p-1} z^{-l} \sum_{n=0}^N \tilde{p}_m[l] h(M_p n + l) z^{-M_p n} \quad (13)$$

式中,  $\tilde{p}_m[l]$  为该支路混频序列主值元素中的第  $l$  个元素。

若定义:

$$E'_l(z) = \sum_{n=0}^N \tilde{p}_m[l] h(M_p n + l) z^{-n} \quad (14)$$

则仍可以将多相结构的单位脉冲响应的  $Z$  变换表示成式(12)的形式。从而得到如图 3 所示的新多相结构。

从图 3 中可以看出,原结构中的混频模块实现方式变为输入信号各点与该路 PRS 的主值序列各点并行相乘,而主值序列中元素均为已知常数,因此,根据数乘的交换律,可以再次将抽取模块提前到混频模块之前,最终得到如图 4 所示的单路压缩采样宽带数字接收机的多相结构形式。

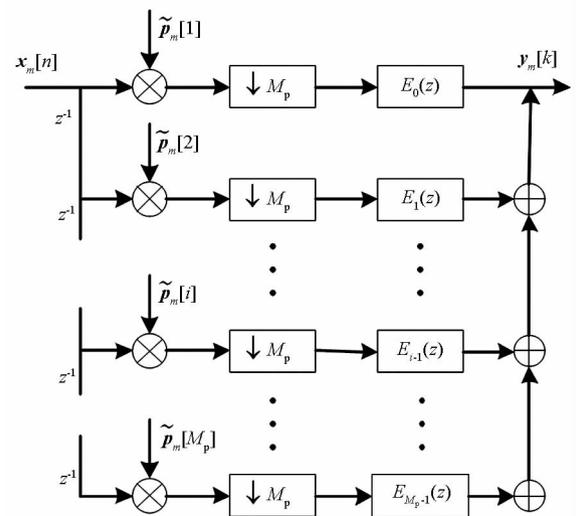


图 3 新型多相结构框图

Fig. 3 Diagram of the new polyphase structure

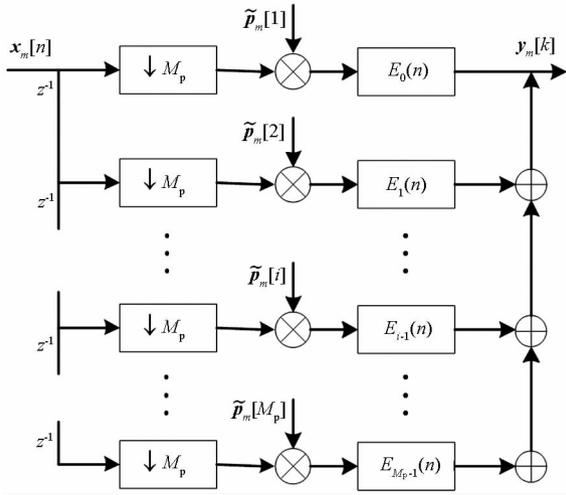


图 4 单路新型多相 MWC 接收机支路框图

Fig. 4 Single branch diagram of new polyphase

MWC receiver

考虑到接收机输出数据需要  $M$  个支路来进行信号重构,因此考虑  $M$  路结构模型,推导出  $M$  路新型 MWC 压缩采样接收机如图 5 所示。

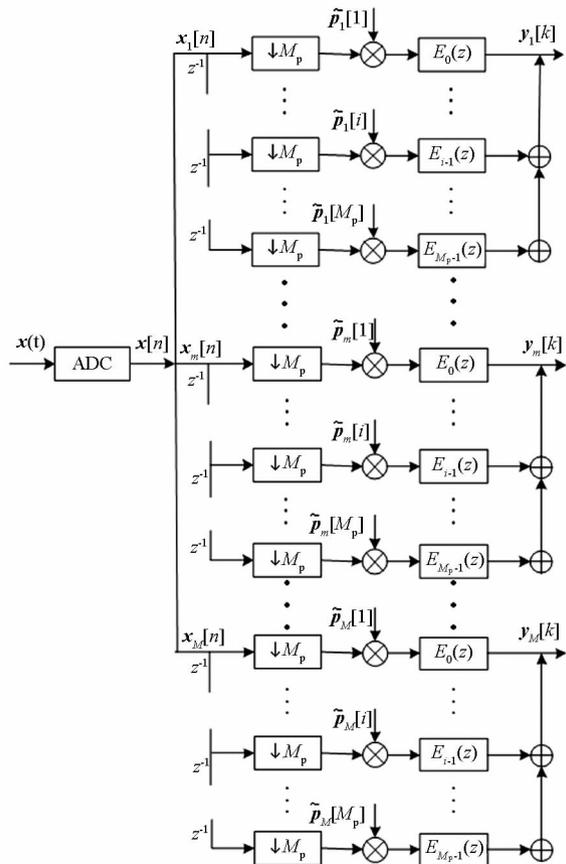


图 5 新型多相 MWC 接收机整体框图

Fig. 5 Global diagram of new polyphase MWC receiver

从图 5 可以看出,与图 1 的现有 MWC 宽带数字接收机结构相比较,本文提出的多相 MWC 结构宽带数字接收机使用的乘法器资源相同,但各支路的工作数据速率下降到原结构工作速率的

$1/M_p$  倍,因此本文接收机结构更易于在 FPGA 端进行实现。

### 3 仿真实验及分析

本节利用 MATLAB 对第 2 节中推导得到的新型多相 MWC 压缩采样宽带数字接收机结构进行仿真,将其输出与现有 MWC 压缩采样数字接收机的输出进行对比,从而验证新结构的正确性。

仿真采用  $f_s = 2.24$  GHz 的采样频率对载频为 720 MHz 的常规单载频雷达信号进行采样。将采样得到的离散化数据分别输入抽取倍数  $M_p = 128$  的现有 MWC 宽带数字接收机和新型多相 MWC 宽带数字接收机中,得到的输出结果如图 6 所示。

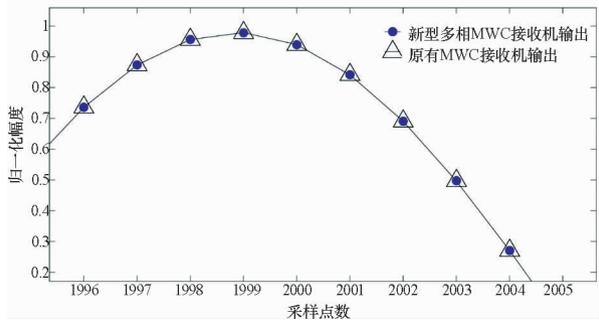


图 6 两种数字接收机输出结果对比

Fig. 6 Comparison of two digital receivers' output results

图 6 给出了改进后的新型 MWC 结构宽带数字接收机单路输出和原始 MWC 结构宽带数字接收机单路输出的对比。其中用三角形表示输出数值点的黑色曲线为原始 MWC 压缩采样数字接收机的输出,用实心圆表示输出数值点的蓝色曲线为基于多相结构的新型 MWC 压缩采样数字接收机的输出。从图 6 可以看出,两者的输出完全相同,从而验证了改进后的基于多相结构的新型 MWC 结构宽带数字接收机的正确性。

### 4 结论

相比原型 MWC 压缩采样宽带数字接收机结构,本文推导出的多相 MWC 压缩采样宽带数字接收机结构,可以有效地降低整体工作数据速率,更易于在 FPGA 上进行实现。

本文提出的多相 MWC 结构的数字宽带接收机结构更具有实际工程应用价值。利用将现有 MWC 数字接收机结构抽取模块不断前移的改进方法,在整体结构最前端将高速串行数据转换为低速并行数据,使结构从理论推导扩展到物理可

实现,提供了新型宽带数字接收机的设计理念。

## 参考文献 (References)

- [1] 蔡兴鹏. 自适应宽带数字接收机技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2019.  
CAI Xingpeng. Research on adaptive wideband digital receiver technology [D]. Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [2] Kim J S, Utomo D R, Dissanayake A, et al. The evolution of channelization receiver architecture: principles and design challenges [J]. IEEE Access, 2017 (99): 25385 – 25395.
- [3] Wang Q W, Shibata H, Liscidini A, et al. A digital filtering ADC with programmable blocker cancellation for wireless receivers [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(3): 681 – 691.
- [4] Babakpur E, Namgoong W. A dual-path 4-phase nonuniform wideband receiver with digital MMSE harmonic rejection equalizer [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2017, 65(2): 386 – 395.
- [5] Bing D, Luan J B. Study of reconnaissance reception algorithm of wide-band channelization in the fractional Fourier domain [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(6): 1040 – 1045.
- [6] Darak S J, Palicot J, Zhang H, et al. Reconfigurable filter bank with complete control over subband bandwidths for multistandard wireless communication receivers [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2015, 23(9): 1772 – 1782.
- [7] Liu X, Li W, Wei J B, et al. Adaptable hybrid filter bank analog-to-digital converters for simplifying wideband receivers [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7): 1525 – 1528.
- [8] Sapio A, Li L, Wu J H, et al. Reconfigurable digital channelizer design using factored Markov decision processes [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2017, 90(10): 1329 – 1343.
- [9] 吕晨阳, 武明西. 数字信道化接收机的设计与实现 [J]. 雷达与对抗, 2017, 37(2): 41 – 44.  
LYU Chenyang, WU Mingxi. Design and implementation of digital channelized receiver [J]. Radar & ECM, 2017, 37(2): 41 – 44. (in Chinese)
- [10] Shin H, Harjani R. Low-power wideband analog channelization filter bank using passive polyphase-FFT techniques [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(7): 1753 – 1767.
- [11] 刘小蒙, 邵高平, 汪洋, 等. 基于双门限的动态信道化子带频谱检测方法 [J]. 信息工程大学学报, 2017, 18(2): 176 – 180.  
LIU Xiaomeng, SHAO Gaoping, WANG Yang, et al. Subband spectrum sensing of dynamic channelization based on double thresholds [J]. Journal of Information Engineering University, 2017, 18(2): 176 – 180. (in Chinese)
- [12] Chen T, Liu L Z, Zhao Z K. Compressed sampling signal detection method based on modulated wideband converter [C]//Proceedings of IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2016: 223 – 227.
- [13] Chen T, Liu L Z, Guo L M. Wideband signal detection based on MWC discrete compressed sampling structure [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(2): 105 – 114.
- [14] Chen T, Liu L Z, Zhao Z K. A frequency estimation method based on MWC discrete compressed sampling structure [C]//Proceedings of Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2016: 274 – 278.
- [15] Chen T, Liu L Z, Guo M R, et al. Frequency spectrum analysis of compressed sampling datum based on modulated wideband converter [C]//Proceedings of IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, 2016: 996 – 1000.
- [16] Park J, Jang J, Im S, et al. A sub-Nyquist radar electronic surveillance system [J]. IEEE Access, 2018, 6: 10080 – 10091.
- [17] 陈涛, 柳立志, 郭立民. 基于 MWC 压缩采样宽带接收机的雷达信号脉内调制识别 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 867 – 874.  
CHEN Tao, LIU Lizhi, GUO Limin. Intra-pulse modulation recognition of radar signals based on MWC compressed sampling wideband receiver [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(4): 867 – 874. (in Chinese)
- [18] Chen T, Liu L Z, Pan D P. A ULA based MWC discrete compressed sampling structure for carrier frequency and AOA estimation [J]. IEEE Access, 2017, 5: 14154 – 14164.
- [19] Cui C, Wu W, Wang W Q. Carrier frequency and DOA estimation of sub-nyquist sampling multi-band sensor signals [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(22): 7470 – 7478.
- [20] Ioushua S S, Yair O, Cohen D, et al. CaSCADE: compressed carrier and DOA estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 65(10): 2645 – 2658.
- [21] Liu L, Wei P. Joint DOA and frequency estimation with sub-nyquist sampling for more sources than sensors [J]. LET Radar Sonar & Navigation, 2017, 11(12): 1798 – 1801.
- [22] Rani M, Dhok S B, Deshmukh R B. A systematic review of compressive sensing: concepts, implementations and applications [J]. IEEE Access, 2018, 6: 4875 – 4894.
- [23] 闫浩. 宽带高速信号检测与频域测量技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.  
YAN Hao. Research on wideband high speed signal detection and frequency domain measurement technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2016. (in Chinese)
- [24] Mishali M, Eldar Y C. From theory to practice: sub-nyquist sampling of sparse wideband analog signals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 375 – 391.
- [25] 吕卫祥, 徐鹏, 曹元将. 一种改进的数字信道化结构设计及检测方法 [J]. 现代防御技术, 2018, 46(3): 73 – 79.  
LYU Weixiang, XU Peng, CAO Yuanjiang. Modified design of digital channelized structure and detection method [J]. Modern Defense Technology, 2018, 46(3): 73 – 79. (in Chinese)