

一种延迟偏移的二进制正交线性调频信号调制方法

黄世盼, 郑霖, 杨超, 蒋相, 黄智昌

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 在低时间带宽积条件下, 二进制正交键控(BOK)匹配检测存在正负调频斜率互干扰和自匹配旁瓣幅度大的问题。为此, 提出一种新的延迟偏移 Chirp-BOK 调制方法。通过在正负调频斜率符号间加入延迟偏移量, 减少正负调频斜率信号间的互干扰, 从而抑制旁瓣, 提高峰值旁瓣比。对该调制方法的最佳延迟偏移量进行工程求解和仿真分析, 结果表明, 与窗函数加权旁瓣抑制方法相比, 该方法在低时间带宽积条件下不改变 Chirp 匹配脉压滤波器的结构和带宽, 大幅提高了系统检测性能。

关键词: 线性调频信号; 互干扰; 旁瓣抑制; 时间带宽积; 延迟偏移

中文引用格式: 黄世盼, 郑霖, 杨超, 等. 一种延迟偏移的二进制正交线性调频信号调制方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(3): 115-119, 125.

英文引用格式: Huang Shipan, Zheng Lin, Yang Chao, et al. A Binary Orthogonal Chirp Signal Modulation Method with Delay Offset[J]. Computer Engineering, 2017, 43(3): 115-119, 125.

A Binary Orthogonal Chirp Signal Modulation Method with Delay Offset

HUANG Shipan, ZHENG Lin, YANG Chao, JIANG Xiang, HUANG Zhichang

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

[Abstract] In the case of low Time-Bandwidth(TB) product, there are two problems in the Binary Orthogonal Keying (BOK) matching detection, the mutual interference between the positive and negative frequency modulation slope and the large amplitude of the self-matching sidelobe. In order to solve these problems, a new modulation method of delay offset Chirp-BOK is proposed. It reduces the mutual interference between the positive and negative frequency modulation slope signals by adding delay offset between the positive and negative frequency modulation slope symbols, so as to suppress the sidelobe and improve the Peak-to-Side-Lobes Ratio (PSLR). Through the engineering solution and simulation analysis for the best delay offset of this method, results show that, when compared with the commonly used side-lobe suppression method by the weighted window function, this method can dramatically improve the system detection performance without changing the structure of the Chirp matched filter and bandwidth under the condition of low TB product.

[Key words] Chirp signal; mutual interference; sidelobe suppression; Time-Bandwidth(TB) product; delay offset

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.03.021

0 概述

线性调频(Chirp)信号是一种常用的雷达信号, 也是一种有效的通信信号。Chirp 信号作为多普勒宽容信号^[1], 其幅值是恒定的, 利于提高峰值功率受限系统的发射效率^[2], 并具有良好的抗干扰能力和脉冲压缩特性^[3]。因为它同时具有探测和通信能力, 所以近年来获得了广泛的关注。

由最佳接收原理可知, 使用匹配滤波器可以实现 Chirp 的脉冲压缩。Chirp 信号经过匹配滤波器后, 输出压缩脉冲的包络近似为 sinc 函数, Chirp 经过匹配滤波器后有较高的旁瓣^[4-5]。当输出信号旁瓣幅度较高时, 会使能量分散, 降低发射效率, 影响较弱主瓣的检测和分辨, 并降低检测误码性能和抗干扰能力。

常规的旁瓣抑制方法是窗函数加权处理^[6-7]。

基金项目: 国家自然科学基金(61362006, 61371107); 广西自然科学基金(2014GXNSFBA118288); 省部共建教育部重点实验室认知无线电基金(2013ZR08); 桂林电子科技大学研究生教育计划项目(YJXCS201517)。

作者简介: 黄世盼(1989—), 男, 硕士研究生, 主研方向为 Chirp 通信一体化; 郑霖, 教授、博士; 杨超, 博士研究生; 蒋相、黄智昌, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-02-01 **修回日期:** 2016-04-05 **E-mail:** h900210112@163.com

引入窗函数加权实质上是进行信号失配处理,加权处理在抑制旁瓣的同时也会使输出信号包络的主瓣幅度降低和宽度展宽,使得分辨率降低^[8],即加权处理的方法是以牺牲信号的信噪比以及分辨率为代价使得旁瓣得到抑制。在 ChirpBOK 系统中,由于正负斜率在时域上不是理想的正交信号,因此会造成“0”和“1”调制符号的互相关干扰^[9]。在带宽较小时,斜率调频间的互干扰不能忽略不计。分数傅里叶(FrFT)检测^[10]、Chirp 信号正交编码^[11]、非线性斜率调频^[12]均可减小符号间互干扰,但同时会对调制和解调的带宽、精度及运算复杂性等带来负面影响。为能同时抑制旁瓣和减小符号间的互干扰,本文提出一种能提高检测性能的调制方法。

1 Chirp-BOK 调制解调与互干扰

二进制正交键控(Binary Orthogonal Keying, BOK)是一种常用的线性调频扩展频谱(Chirp Spread Spectrum, CSS)调制技术,BOK 使用正负斜率的 Chirp 信号来表示不同的码元信息,系统复杂度低,抗多普勒频移并且抗频移能力强。

图 1 是常规线性调频信号的系统框图,分为调制和解调两部分。Chirp-BOK 系统的调制分为 UD (U:正斜率支路,D:负斜率支路)两路 OOK 线性调制信号,分别采用负斜率调频(表示二进制信息码元“0”)和正斜率调频(表示二进制信息码元“1”),当输入的信息码元互异时(若不是互异的信息码元,则为两路独立的 OOK 调制信号),调制信号输出为 BOK 调制信号。在调制端,当码元为“1”时进行正斜率调制,当码元为“0”时进行负斜率调制,经调制后的信号输出合成 BOK。根据 Chirp 信号通过匹配滤波器后的时域压缩特性和傅里叶变换的线性特性以及最佳接收原理^[13],可通过对正负斜率 Chirp 信号反演共轭获得解调器匹配脉压的输出。

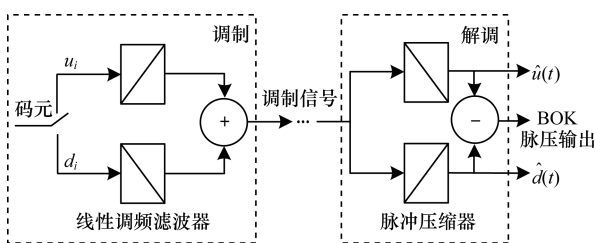


图 1 常规线性调频信号调制与解调框图

设一符号周期内 Chirp 信号为 $s(t)$, 其匹配滤波器的冲击响应 $h(t)$ 为:

$$h(t) = s^*(-t) = s(-t) \quad (1)$$

时间反演等价于调频斜率取反,即负斜率 Chirp 信号的匹配滤波器的冲击响应为正斜率 Chirp 信号,正斜率 Chirp(UpChirp)信号的匹配滤波器的冲击响

应为负斜率 Chirp(DnChirp)信号,匹配滤波器的输出为^[14]:

$$s_o(t) = h(t) * s(t) = \sqrt{TB} \frac{\sin[\pi Bt(1 - |t|/T)]}{\pi Bt} \times e^{j2\pi f_0 t} \quad (2)$$

其中, f_0 为信号中心频率; $B = \mu T$ 为信号带宽, T 为符号时长; μ 为调频斜率。

在解调器中,当接收信号与匹配滤波器不匹配时,即输出为互相关干扰,则^[15]:

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{\sqrt{TB}} [C(\frac{\pi}{2} \sqrt{TB} - |t| \sqrt{\mu})^2 + jS(\frac{\pi}{2} \sqrt{TB} - |t| \sqrt{\mu})^2] e^{j\pi \mu t^2} \quad (3)$$

$$C(x) = \int_0^x \cos \frac{\pi v^2}{2} dv \quad (4)$$

$$S(x) = \int_0^x \sin \frac{\pi v^2}{2} dv \quad (5)$$

其中, $C(x)$ 和 $S(x)$ 分别为菲涅耳余弦、正弦积分函数。式(2)随 \sqrt{TB} 线性增大,时间宽带(Time-Bandwidth, TB)积越大,正负斜率调频信号越接近正交,反之正交性越差。当 TB 积较小时,匹配输出的峰值会减小,而对不匹配输出相对会增加。所以,在低 TB 积时,不可忽略互干扰。

2 O-BOK 调制解调原理

2.1 O-BOK 调制与解调

在系统中 UD 两路线性调频波形并非完全正交^[15],尤其在带宽较小的情况下,互干扰不能忽略不计,否则会造成解调器性能的下降。在 UD 两路 OOK 调制符号之间加入延迟偏移量 τ_ω 的方法称为偏移 BOK(Offset-Bi-OOK, O-BOK)调制,对应表达式为:

$$\text{UpChirp}: c_1(t) = e^{j\pi \mu t^2}, t_1 \in [0, T]$$

$$\text{DnChirp}: c_2(t) = e^{j\pi \mu (t_2 - t_\omega)^2}, t_2 \in [T, 0] \quad (6)$$

本文使用的 UpChirp 信号周期从 0 到 T , DnChirp 信号通过 UpChirp 进行时间反演得到。图 2 是 O-BOK 调制与解调框图,在调制端,符号间加入延迟偏移量 t_ω 。

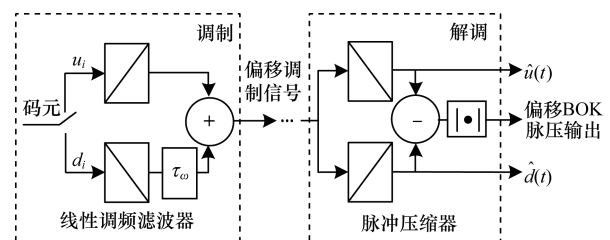


图 2 O-BOK 调制与解调框图

设解调器中接收到的信号为 $x(t)$, 则脉压输出为:

$$MF_{out}(t) = |x(t) * c_1(t)|^2 - |x(t) * c_2(t)|^2 \quad (7)$$

图 3 是产生的信号时频示意图, 在负斜率调频中加入延时后与正斜率调频信号相加组成 O-BOK 调制输出。

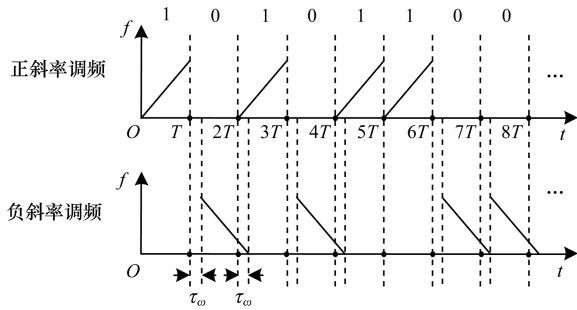


图 3 O-BOK 信号时频图

窗函数加权处理方法要求 TB 积相对较大, 当 TB 积特别小 (TB 积小于 10) 时, 窗函数加权处理方法不适用。O-BOK 可在 TB 积小于 10 时减小它们之间的互干扰, 有效抑制旁瓣, 提高峰值旁瓣比 (Peak-to-Side-Lobes Ratio, PSLR)。

图 4 为匹配滤波器中自相关和互相关干扰波形, 根据式 (7), 脉冲输出为自相关输出与互相关输出相减所得, 对于图中的 O-BOK 调制解调, 在 D 路信号时域上加入偏移量使得互相关输出进行位移, 移至相对的位置后进行相减处理, 使解调输出旁瓣得以部分抵消, UD 两路信号间的互干扰减小, 从而提高脉冲压缩信号 PSLR。如图 4 中将互相关输出进行位移, 使其最大波峰移至自相关输出旁瓣的最大波峰处, 相减进行抵消, 使得旁瓣减小, 得到最优脉冲压缩输出。由于只是进行了位移, 因此对于系统解调器的结构没有改变, 而且对于脉冲压缩输出信号的主瓣宽度也没有任何展宽。

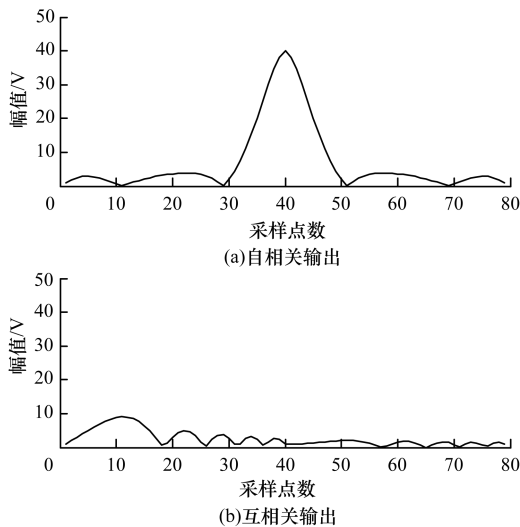


图 4 匹配滤波器中的自相关和互相关输出

由于本文提出方法从数学表达式上进行推导是极其复杂的, 因此从波形分析说明该方法对信号互干扰和旁瓣的抑制是有效的。图 5 给出了码元为“01”时有无偏移量情况下的脉冲压缩输出波形。通过对比分析, 解调器中无论是与 DnChirp 或 UpChirp 信号进行匹配, 还是 UD 两路脉冲输出相减 (为简便分析, 图中 BOK, O-BOK 输出进行取模处理) 得到的 BOK, O-BOK 脉冲输出, O-BOK 匹配输出主瓣峰值均比 BOK 匹配输出主瓣峰值要高, 而其匹配输出旁瓣峰值均比无偏移调制信号的匹配输出旁瓣峰值要小, 因此, O-BOK 的 PSLR 比 BOK 的大, 说明信号的互相关和旁瓣得到了抑制。

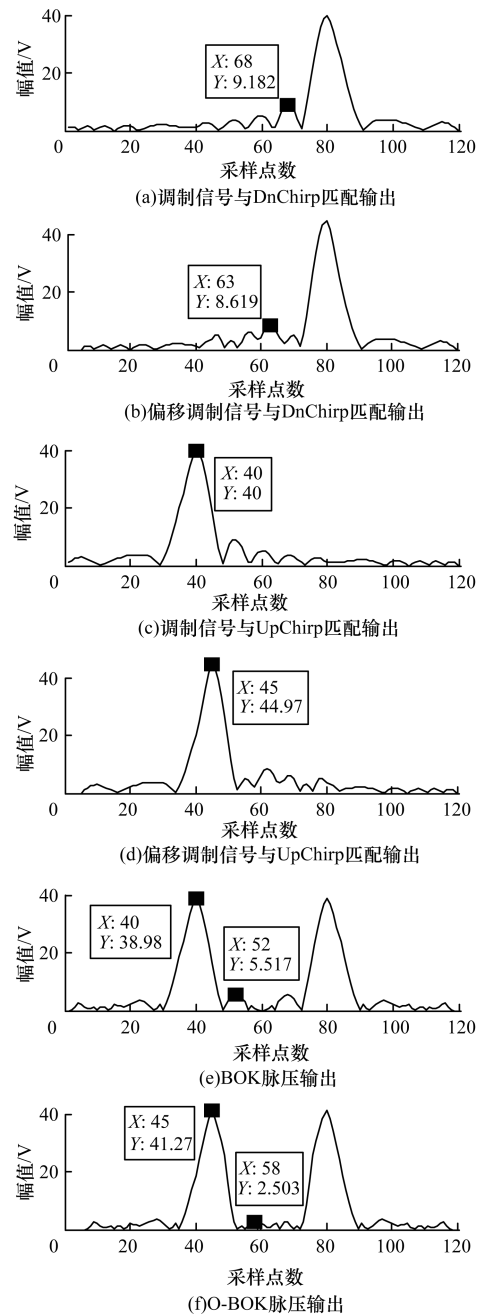


图 5 码元为“01”时 BOK 和 O-BOK 的脉冲输出

2.2 O-BOK 最佳延迟偏移量的求解

为获取最佳偏移量 τ_ω , 本文中取 TB 为 5, 带宽为 2.5 MHz, 码元速率为 0.5 MHz, 采样频率为带宽的 8 倍, 即 20 MHz。当信息码元全为“1”或者全为“0”时, 对于系统而言, 相当于整体加了一个延时器, 因此, 码元为连“0”或连“1”时脉冲压缩信号并无变化, 在此不作分析, 本文主要分析输入码元为“10”和“01”2 种情况。图 6、图 7 是用搜索法搜索不同偏移量时脉冲压缩输出的主旁瓣值, 对应偏移量脉冲压缩输出的最小主瓣值为 $\min_i V_i(t_\omega)$, $V_i(t_\omega)$ 为对应偏移量时的主瓣值; 对应偏移量脉冲压缩输出的最大旁瓣值为 $\max_i V_i(t_\omega)$, $V_i(t_\omega)$ 为对应偏移量时的旁瓣值, 可得最小主瓣值与最大旁瓣值的比值:

$$h(t_\omega) = \frac{\min_i V_i(t_\omega)}{\max_i V_i(t_\omega)} \quad (8)$$

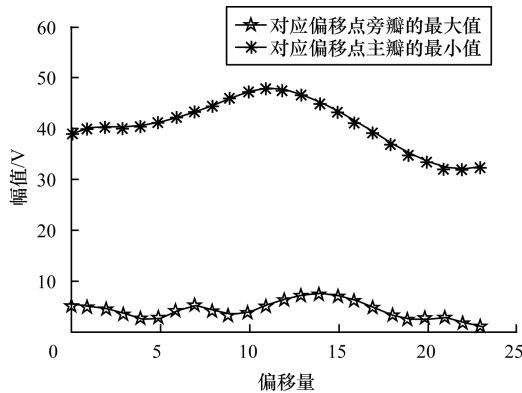


图 6 信息码元为“01”时脉冲输出的主瓣与旁瓣极值

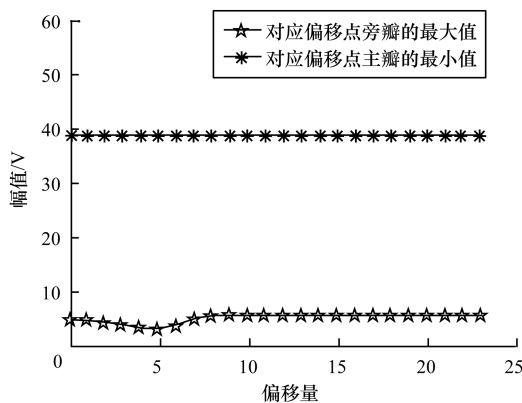


图 7 信息码元为“10”时脉冲输出的主瓣与旁瓣极值

由图 6 可得, 当输入码元为“01”时, 最小主瓣值和最大旁瓣值均随着偏移量的变化而变化。由图 7 可得, 当输入码元为“10”时, 随着偏移量的增加, 最小主瓣值保持不变, 而最大旁瓣值在 8 个偏移量后也保持不变。图 8、图 9 为 h 分布图, h 越大表明信号的互干扰和旁瓣的抑制越有效。从图 8、图 9 的 h

分布观察到不同偏移量时峰值旁瓣比的大小, 可得出以上 2 种情况各自的最佳偏移量。

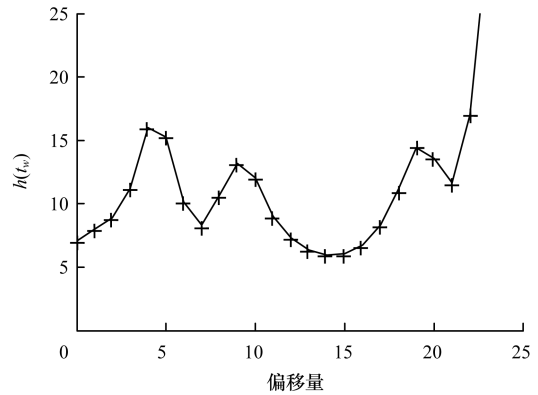


图 8 信息码元为“01”时的峰值旁瓣比分布

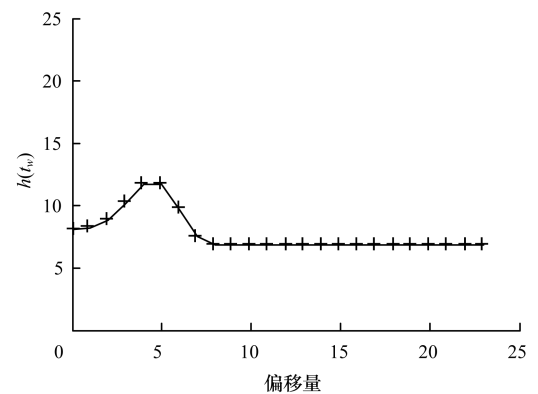


图 9 信息码元为“10”时的峰值旁瓣比分布

对于当前码元, 要同时考虑到前后码元对其的影响, 即考虑输入码元的互相关。因此, 输入码元“010”和“101”可以适用于不同情况的码元输入。从图 10、图 11 对比得出, 输入码元“010”和“101”在不同偏移量时脉冲压缩输出的主瓣最大值和旁瓣最小值均一样: 主瓣最小值在一定偏移前均保持不变, 之后开始逐渐减小; 旁瓣最大值随偏移量不同而变化。因此, 输入码元“010”和“101”的 h 分布一致, 如图 12 所示。

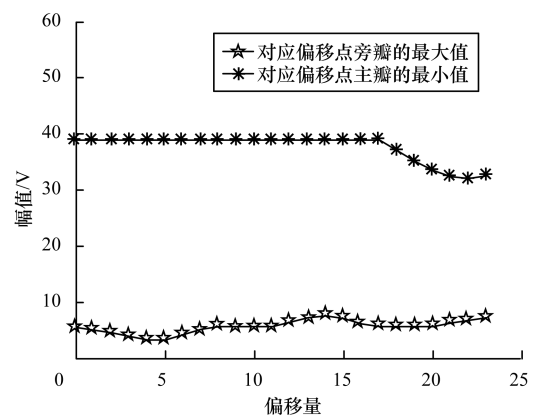


图 10 信息码元为“010”时脉冲输出的主瓣和旁瓣极值

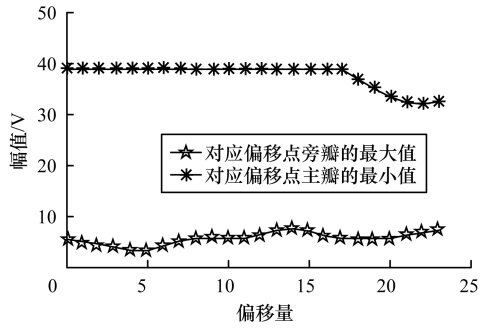


图 11 信息码元为“101”时脉压输出的主瓣和旁瓣极值

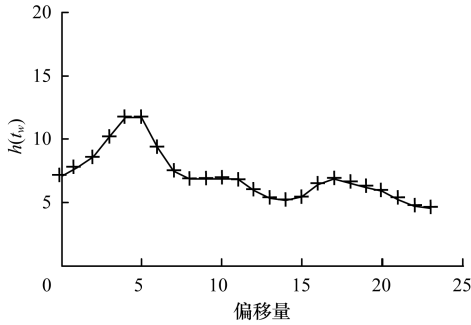


图 12 信息码元为“010”和“101”时的峰值旁瓣比分布

3 仿真结果与分析

通过对搜索法得到的 h 分布进行分析, 可以得出各自对应的最佳偏移量的集合, 对所有集合取并集获得最佳偏移量 τ_{opt} 为 4 个采样点时延。图 13 为发送任意一串码元时 BOK (无偏移量) 和 O-BOK (取偏移量为 4 个采样点时延) 的脉压输出波形。对比图 13 中 BOK 和 O-BOK 的脉压输出, 在输入码元非连续“0”或“1”时, O-BOK 的旁瓣峰值比 BOK 的要低, 并可观测到 O-BOK 的主瓣峰值比 BOK 的主瓣峰值有所增加, 主瓣峰值的提高有利于信号的检测。图 14 为 TB 为 5、发送码元数为 10^4 时 O-BOK 和 BOK 在 AWGN 信道中的性能分析。从图 14 可以得到, O-BOK 的误码率随着信噪比的增加而减小; 在大信噪比的情况下, O-BOK 的误码率远低于 BOK 的误码率。

本文通过搜索法获得 O-BOK 调制信号的最佳时延偏移, 虽然精度有限, 但能够满足调制和解调的要求, 对于不同情况的多个输入码元均适用。通过计算机仿真验证了本文方法的有效性并获得了最佳偏移量。

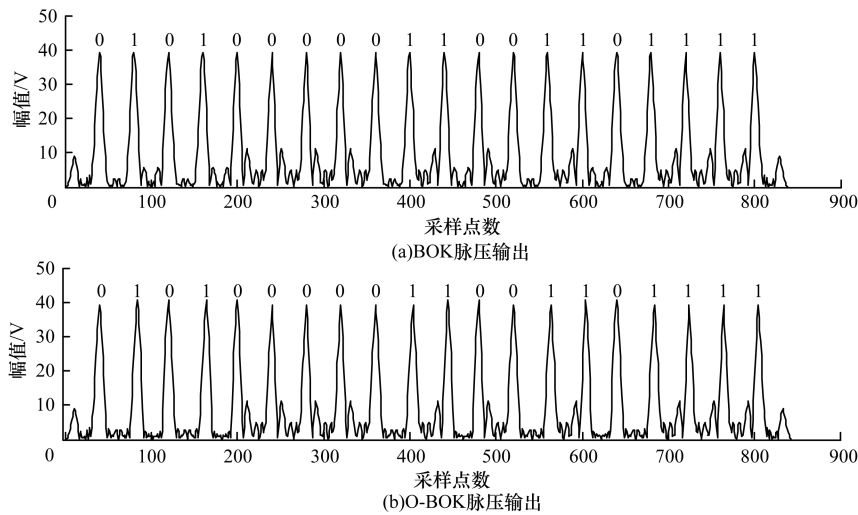


图 13 BOK 和 O-BOK 脉压输出

4 结束语

本文提出一种提高检测性能的调制方法并将其在 AWGN 信道中进行性能分析。该方法沿用线性斜率调频, 在负调频斜率信号中加入偏移量, 使解调输出的脉冲旁瓣减小, 并通过搜索法求解最佳偏移量。仿真结果表明, O-BOK 脉压输出的旁瓣得到了抑制; O-BOK 系统性能随着信噪比的增加而减小; 在大信噪比的情况下, O-BOK 系统性能远高于 BOK 的系统性能。下一步将对时延偏移 Chirp-BOK 调制信号的解调输出旁瓣抑制理论进行深入分析, 从而明确具体应用中的时偏调制参数设置方法。

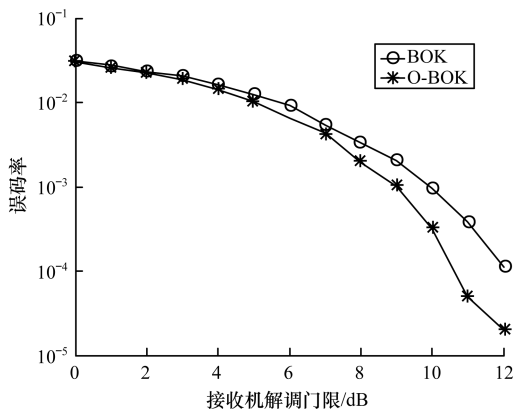


图 14 O-BOK 和 BOK 在 AWGN 信道中的性能比较

参考文献

- [1] 刘熙,刘开华,马永涛,等.多径环境下无源超高频RFID定位算法研究[J].计算机工程,2014,40(8):33-37.
- [2] Park S, Lee H. Self-recognition of Vehicle Position Using UHF Passive RFID Tags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):226-234.
- [3] 施竣严,秦小麟,王宁.基于梯度博弈的RFID室内定位算法[J].计算机科学,2015,42(11):138-143.
- [4] Digiampaolo E, Martinelli F. A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3961-3970.
- [5] Liu Jing, Yang Po. A Localization Algorithm for Mobile Robots in RFID System [C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communication, Network Mobile Computing. Shanghai, China: [s. n.], 2007:2109-2112.
- [6] Lim H, Choi B, Lee J. An Efficient Localization Algorithm for Mobile Robots Based on RFID System [C]//Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, Korea; IEEE Press, 2006:5945-5950.
- [7] Montaser A, Moselhi O. RFID Indoor Location Identification for Construction Projects[J]. Automation in Construction, 2014, 39(1):167-179.
- [8] Tesoriero R, Gallud J A, Lozano M D, et al. Tracking Autonomous Entities Using RFID Technology[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(2):650-655.
- [9] Lee H J, Choi K C, Lee M C, et al. Localization of Mobile Robot Based on Radio Frequency Identification Devices[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2006, 12(1):41-46.
- [10] Park S, Hashimoto S. Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7):2366-2373.
- [11] Han S S, Lim H S, Lee J M. An Efficient Localization Scheme for a Different-driving Mobile Robot Based on RFID System [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6):3362-3369.
- [12] Gueaieb W, Miah S. An Intelligent Mobile Robot Navigation Technique Using RFID Technology [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(9):1908-1917.
- [13] Nakamori E, Tsukuda D, Fujimoto M, et al. A New Indoor Position Estimation Method of RFID Tags for Continuous Moving Navigation Systems [C]//Proceedings of 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Sydney, Australia: IEEE Press, 2012:1-8.
- [14] Boaventura A S, Carvalho N B. A Proposal for Dynamic Power Control in RFID and Passive Sensor Systems Based on RSSI [C]//Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague, Czech Republic; IEEE Press, 2012:3473-3475.
- [15] Huang C H, Lee L H, Ho C C, et al. Real-time RFID Indoor Positioning System Based on Kalman-filter Drift Removal and Heron-bilateration Location Estimation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(3):728-739.
- [16] Yang Po, Wu Wenyan. Efficient Particle Filter Localization Algorithm in Dense Passive RFID Tag Environment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10):5641-5651.

编辑 索书志

(上接第119页)

参考文献

- [1] Kim K T. Focusing of High Range Resolution Profiles of Moving Targets Using Stepped Frequency Waveforms[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2010, 4(4):564-575.
- [2] Patton L, Frost S, Rigling B. Efficient Design of Radar Waveforms for Optimized Detection in Colored Noise[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(1):21-29.
- [3] Yoon C, Lee W, Song J H, et al. New Baseband Pulse Compression for Chirp Coded Excitation [C]//Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2013:906-909.
- [4] Zhang Jian, Huang Xiaojing, Cantoni A, et al. Sidelobe Suppression with Orthogonal Projection for Multicarrier Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(2):589-599.
- [5] 姚山峰,严航,曾安军,等.线性调频信号的相关检测性能分析[J].计算机工程,2012,38(1):77-80.
- [6] 胡航. Chirp信号脉压旁瓣抑制方法研究[J].火控雷达技术,2004,33(3):1-4.
- [7] 李海涨.超宽带脉冲波形设计及调制技术研究[D].成都:电子科技大学,2010.
- [8] 张静.脉冲压缩及其旁瓣抑制技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2005.
- [9] 李晓彤.基于Chirp函数的超宽带系统干扰抑制设计与研究[D].济南:山东大学,2011.
- [10] 李靖,王数勋,汪飞.基于分数阶傅里叶变换的Chirp信号时频分析[J].系统工程与电子技术,2005,27(6):988-990.
- [11] 程胜娟.大时间-带宽积OFDM Chirp波形设计与仿真研究[D].成都:电子科技大学,2015.
- [12] 尉宇.线性调频和非线性调频信号的检测与参数估计[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [13] 贺鹏飞.超宽带无线通信关键技术研究[D].北京:北京邮电大学,2007.
- [14] Pinkney J. Low Complexity Indoor Wireless Data Links Using Chirp Spread Spectrum [D]. Calgary, Canada: University of Calgary, 2004.
- [15] Deng Bing, Cui Shiqi, Li Xiaochen. Analysis of Bandwidth Efficiency and Modulation Parameter for Chirp-rate Modulation [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Measurement. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:394-398.

编辑 陆燕菲