

基于认知系统的编码调制体系研究*

唐菁敏^{1,2}, 冯思泉³, 龙华¹, 邵玉斌¹

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;

2. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876;

3. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要: 利用 NMSK(N 重最小频移键控)的旁瓣快速衰减特性,提出了一种新型 OFDM-NMSK 编码调制体系用于降低 OFDM 认知无线电系统的带外干扰。该方法仅通过关闭干扰频段上的相应 NMSK 子载波,能够快速生成符合要求的频谱凹槽深度,从而实现与其地窄带系统的共存。理论与仿真表明,与传统的相邻频带编码(AFC)方法相比,OFDM-NMSK 编码效果更佳。

关键词: 频谱凹槽; 认知无线电; OFDM-NMSK; 相邻频带编码

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 0258-7998(2012)09-0110-04

Research of coded modulation schemes based on cognitive radio systems

Tang Jingmin^{1,2}, Feng Siqun³, Long Hua¹, Shao Yubin¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: Based on the fast roll-off sidelobe spectral property of N minimum-shift keying (NMSK), a novel OFDM-NMSK coded modulation scheme for cognitive radio (CR) OFDM systems is proposed to mitigate the out-of-band interference. By closing NMSK sub-carriers in the interfering frequency bands, it can create the required frequency notch rapidly. Therefore, the coexistence with other narrow band radio services can be realized. Theoretic analysis and simulation results show that the OFDM-NMSK coding effect outperforms that of the traditional adjacent frequency coding (AFC).

Key words: frequency notch; cognitive radio; OFDM-NMSK; adjacent frequency coding

伴随着无线通信技术的迅猛发展,频谱资源日益紧张与频谱利用率低两大问题日益严重。在这种情况下,认知无线电技术因其能灵活动态地利用频谱资源而受到了越来越多的关注。认知无线电系统通常基于软频谱机制,通过对周边无线环境的感知,采取探测及避开策略(DAA),生成对应频谱模板,在发现冲突的窄带业务频段上产生频谱凹槽以降低在该频段上的发送功率,从而保证系统在充分利用频谱资源的同时也能够实现与其他窄带无线业务的共存^[1]。就传统的 OFDM 认知系统而言,由于其子载波功率谱带外衰减缓慢,因此当系统在干扰频段上检测到存在其他窄带业务,若仅关闭此干扰

频段上覆盖的相应子载波,则与之相邻的其他子载波在此干扰频段上所产生的泄露功率依然较强,无法产生满足要求的频谱凹槽,容易对其他系统造成严重干扰。为此,参考文献[2]提出一种干扰消除机制,即在关闭干扰频段上的对应子载波后,在频段两侧插入主动干扰消除(AIC)子通道,以便产生符合要求的频谱凹槽,但其缺陷在于计算量大,实现较为复杂。参考文献[3]利用相邻子载波相关性大的特点,对子载波进行相邻频带编码(AFC 编码),即以 2 个或 4 个相邻子载波为 1 组实施编码调制,从而加快系统带外衰减,增大频谱凹槽深度。但另一方面,对子载波分组编码也造成了频谱调度粒度的增大,即系统关闭相关子载波时必须以子载波组为基本

* 基金项目: 云南省社会发展科技计划(2009CA027)

通信与网络 Communication and Network

单位,这在某种程度上降低了频谱利用率。本文从子载波编码调制方式着手,将具有快速旁瓣衰减特性的NMSK引入OFDM系统中,在保证系统灵活性及复杂性的前提下大大降低了带外干扰。虽然参考文献[4]对OFDM-NMSK进行了性能分析,但与之相比,本文通过引入NMSK编码调制体系,提出了一种新颖的OFDM-NMSK编码调制体系,并详细论述了OFDM-NMSK信号收发方案,同时利用其NMSK子载波功率谱特性将其应用在无线认知领域。

1 OFDM-NMSK 编码调制体系

1.1 NMSK 信号模型

NMSK 信号由 N 个具有不同幅度的 MSK 信号叠加而成,其一般表达式如式(1)所示^[5]:

$$s_{\text{NMSK}}(t, \alpha_n^{(1)}, \alpha_n^{(2)}, \dots, \alpha_n^{(N)}) = A \sum_{i=1}^N 2^{i-1} S(t, \alpha_n^{(i)}) \quad (1)$$

$$A = \sqrt{2E/T} \left(\sum_{i=1}^N 2^{2(i-1)} \right)^{-1/2}$$

其中 E 表示每比特信号平均能量; T 表示信号码元间隔; $S(t, \alpha_n^{(i)})$ 表示 NMSK 信号中的第 i 路 MSK 信号分量,其复信号表达式如式(2)所示:

$$S(t, \alpha_n^{(i)}) = e^{j(2\pi f_c t + \frac{\pi \alpha_n^{(i)}(t-(n-1)T)}{2T} + \phi_n^{(i)})}, \quad (n-1)T \leq t < nT \quad (2)$$

$$\phi_n^{(i)} = \frac{\pi}{2} \sum_{j=0}^{n-1} \alpha_n^{(i)} + \phi(0)$$

其中, $\alpha_n^{(i)}$ 表示第 i 路 MSK 信号分量第 n 时刻的输入数据且 $\alpha_n^{(i)} \in \{+1, -1\}$; $\phi(0)$ 表示初相位,为不失一般性,令 $\phi(0)=0$ 。为了便于 NMSK 与 OFDM 技术的结合,本文引入了 NMSK 编码调制模型,其第 i 路 MSK 信号的编码调制模型如图 1 所示。该模型包含以下两个部分的级联:卷积编码单元(CPE)和无记忆的波形映射单元^[6]。



图 1 MSK 编码调制模型

其中, γ_n 表示第 n 时刻的输入数据,且 $\gamma_n \in \{0,1\}$ 。MSK 波形映射单元中的输入输出对应关系如式(3)所示^[6]:

$$S(t, \gamma_n^{(i)}) = (U_{1,n}^{(i)} e^{j2\pi f_1 t} + U_{2,n}^{(i)} e^{j2\pi f_2 t}) g(t-nT) \quad (3)$$

$$(U_{1,n}^{(i)}, U_{2,n}^{(i)}) = \begin{cases} (1,0), & a_n^{(i)}=0, b_n^{(i)}=0 \\ (-1,0), & a_n^{(i)}=0, b_n^{(i)}=1 \\ (0,1), & a_n^{(i)}=1, b_n^{(i)}=0 \\ (0,-1), & a_n^{(i)}=1, b_n^{(i)}=1 \end{cases} \quad (4)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f_2-f_1=1/2T$ 且 $f_1=f_c-1/4T$ 。由此可见,在 MSK 编码调

制模型的波形生成单元中,其两路载频使得等价后的 MSK 信号易于与 OFDM 相结合,且实现方便。

令 γ 表示 NMSK 输入信号,即 $\gamma = [\gamma_n^{(0)}, \gamma_n^{(1)}, \dots, \gamma_n^{(N-1)}]$, 这里 $\gamma_n^{(i)}$ 表示第 i 路 MSK 分量第 n 时刻的输入数据。基于 MSK 编码调制模型, NMSK 表达式可以表示为:

$$X(t) = (W_{1,n} e^{j2\pi f_1 t} + W_{2,n} e^{j2\pi f_2 t}) g(t-nT) \quad (6)$$

$$(W_{1,n}, W_{2,n}) = A (\sum_{i=1}^N 2^{i-1} U_{1,n}^{(i)}, \sum_{i=1}^N 2^{i-1} U_{2,n}^{(i)}) \quad (7)$$

假设信道状况理想并忽略噪声,则 NMSK 接收端根据 $(W_{1,n}, W_{2,n})$ 就可以快速恢复发送端输入信号 γ 。就 NMSK 信号中任一路 MSK 分量而言(此处以第 i 路 MSK 分量为例),其输入信号 $\gamma_n^{(i)}$ 与其对应的 $(U_{1,n-1}^{(i)}, U_{2,n-1}^{(i)})$ 及 $(U_{1,n}^{(i)}, U_{2,n}^{(i)})$ 存在如下关系:

$$\begin{cases} \text{若 } \gamma_n^{(i)}=0, & \text{则 } (U_{1,n-1}^{(i)} + U_{1,n}^{(i)}) - (U_{2,n-1}^{(i)} - U_{2,n}^{(i)}) = 2 \\ \text{若 } \gamma_n^{(i)}=2, & \text{则 } (U_{1,n-1}^{(i)} + U_{1,n}^{(i)}) - (U_{2,n-1}^{(i)} - U_{2,n}^{(i)}) = -2 \end{cases} \quad (8)$$

因此,对 NMSK 信号而言,

$$\Delta W_n = (W_{1,n-1} + W_{1,n}) - (W_{2,n-1} + W_{2,n}) = A \sum_{i=1}^N 2^{i-1} ((U_{1,n-1}^{(i)} + U_{1,n}^{(i)}) - (U_{2,n-1}^{(i)} - U_{2,n}^{(i)})) \quad (9)$$

由此可见,在 NMSK 输入信号 γ 与 ΔW_n 之间存在着——对应的关系。为了简便,令 $A=1$,则由式(6)可知, ΔW 的可能取值为 $\pm 2, \pm 2 \times 3, \dots, \pm 2 \times (2^N - 1)$ 。基于最大似然准则,将抽样判决器的门限电平选择值设为 $0, \pm 2 \times 2, \dots, \pm 2 \times (2^N - 2)$ 即可还原出 NMSK 的输入信号 γ 。由此, NMSK 接收端判决信号模型如图 2 所示。与参考文献[4]中所提及的 NMSK 信号接收模型相比,该方法具有明显优势且实现简单。

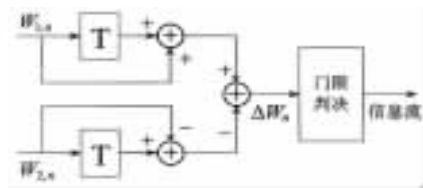


图 2 NMSK 译码判决模型

1.2 OFDM-NMSK 信号模型

依据 NMSK 信号模型, OFDM-NMSK 的复信号表达式如下所示:

$$\begin{cases} S_{\text{OFDM-NMSK}}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k(t) \\ X_k(t) = (W_{1,n}^{(k)} e^{j2\pi f_1 t} + W_{2,n}^{(k)} e^{j2\pi f_2 t}) e^{j2\pi k t / T} g(t-nT) \end{cases} \quad (10)$$

其中 $X_k(t)$ 表示第 k 路 NMSK 子载波。可以证明该系统内各 NMSK 子载波在实数域上相互正交,即:

$$\text{Re} \left\{ \int_{nT}^{(n+1)T} X_k(t) \times X_l^*(t) dt \right\} = 0, \quad 0 \leq k, l < N \text{ 且 } k \neq l \quad (11)$$

通信与网络 Communication and Network

令式(10)中 $f_1=0$, 则 OFDM-NMSK 信号模型可以进一步表示为:

$$S_{\text{OFDM-NMSK}}(t) = \sum_{v=0}^{2N-1} V_{v,n} g(t-nT) e^{\frac{j2\pi vt}{2T}} \quad (12)$$

$$k = \lfloor v/2 \rfloor \text{ 且 } (V_{2k,n}, V_{2k+1,n}) = (W_{1,n}^{(k)}, W_{2,n}^{(k)})$$

其中 v 表示 OFDM 扩展子载波的索引号(注:OFDM 系统中任意两路相邻扩展子载波的频率间隔为 $1/2T$), k 表示 NMSK 子载波的索引号, $V_{v,n}$ 表示第 n 时刻第 v 路 OFDM 扩展子载波的输入信号。根据式(12), OFDM-NMSK 的离散信号模型 $S(i)$ 可以表示为:

$$S(i) = \sum_{v=0}^{2N-1} V_{v,n} \times e^{j\frac{2\pi vi}{2N}}, \quad 0 \leq i < N \quad (13)$$

设接收端信号为: $r(t) = S_{\text{OFDM-NMSK}}(t) + n(t)$, 其中 $n(t)$ 为接收噪声。设 $R(i)$ 为接收信号 $r(t)$ 的抽样离散信号, 根据式(13), 可以获得发送端 OFDM-NMSK 各扩展子载波的输入信号 $\hat{V}_{v,n}$, 即:

$$\hat{V}_{v,n} = \frac{1}{N} \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} R(i) \times e^{j\frac{2\pi vi}{2N}} \right\}, \quad 0 \leq v < 2N-1 \quad (14)$$

依据 1.1 节中 NMSK 信号解码模型, 可以由 $\hat{V}_{v,n}$ 恢复各 NMSK 子载波的输入信号。

2 基于 OFDM-NMSK 的 CR-OFDM 功率谱密度

本章节将从功率谱特性方面对 OFDM-NMSK 编码调制系统进行详细分析。为了便于比较, 引入其他两种系统(即未编码 OFDM 系统和 AFC-OFDM 编码系统)与 OFDM-NMSK 编码调制系统一起进行分析对比。

2.1 三种编码方案子载波功率谱密度分析比较

AFC(相邻频带编码)是 CR-OFDM 中常用的一种编码方案, 它可以有效消除带外干扰, 其编码规则如下: 将待发送数据分别调制到一对子载波上(此处设该对子载波数为 2), 使该对子载波上的数据呈现如下关系:

$$a_{2k,i} = -a_{2k+1,i} \quad (15)$$

假设 OFDM 符号间隔为 T 时, 通过 AFC 编码之后, 则 AFC 子载波对的频谱密度函数如下所示^[3]:

$$G_{\text{AFC}}(f) = \left(\frac{\sin \pi (f-f_c) T}{\pi (f-f_c)^2 T^2 - \pi (f-f_c) T} \right)^2 \quad (16)$$

依据参考文献[5], NMSK 与未编码系统子载波的归一化闭合功率谱密度表达式如式(17)所示:

$$\begin{cases} G_{\text{NMSK}}(f) = \left(\frac{\cos 2\pi (f-f_c) T}{1 - 16(f-f_c)^2 T^2} \right)^2 \\ G_{\text{UnEncode}}(f) = \left(\frac{\sin \pi (f-f_c) T}{\pi (f-f_c) T} \right)^2 \end{cases} \quad (17)$$

在式(16)、(17)中, f_c 表示调制频率。随着 $(f-f_c) \times T$ 的增大, NMSK 编码调制信号均以 $(1/256) \times ((f-f_c) \times T)^{-4}$ 的速率衰减, AFC 编码信号的带外功率谱则约以 $(1/\pi^2) \times ((f-f_c) \times T)^{-4}$ 的速率衰减, 而未编码信号的带外功率谱仅以 $(1/\pi^2) \times ((f-f_c) \times T)^{-2}$ 的速率衰减, 因此在带外衰减方面, AFC 编码和 NMSK 编码均明显优于未编码系统。另外, 由于 $(1/256) \ll (1/\pi^2)$, 因此相比 AFC 编码, NMSK 编码具有更优的带外衰减功能。

图 3 展示了三种编码方式下的归一化功率谱密度, 由图中可得, 相比其他两种情况, NMSK 编码调制方式显示了良好的功率谱旁瓣快速衰减功能。

2.2 三种编码方案下系统频谱凹槽功率谱仿真

针对未编码、AFC 编码、NMSK 编码 3 种 CR-OFDM 系统进行频谱凹槽功率谱特性仿真分析比较。在整个仿真场景中, 假定各系统占用频宽一致, 数据传输速率不变, 且设定各系统子载波数均为 64(对 OFDM-NMSK 系统而言, NMSK 子载波数为 64; 对 AFC-OFDM 系统而言, AFC 子载波对为 32)。

首先考虑仅关闭少量子载波(此处选定从第 9 子载波开始的连续 6 个子载波), 这三个系统生成的频谱凹槽模板如图 4 所示。可以看到, 未编码 OFDM 系统的性能是最差的, 其频谱凹槽最深处仅为 -13dB 。而另两种编码系统性能上则有明显改善, 对于 AFC-OFDM 而言, 其频谱凹槽大约有 30% 部分处于 -30dB 之下; 相比 AFC-OFDM 系统, OFDM-NMSK 系统性能改善更为明显, 其整个频谱凹槽约有 80% 都处于 -30dB 之下。

关闭较多子载波(此处选定从第 9 子载波开始的连续 12 个子载波), 这三个系统生成的频谱凹槽模板如图 5 所示。可以看到, 未编码 OFDM 系统性能依旧是最差, 其频谱凹槽依然在 -20dB 之上, 与另两种编码系统在性能上仍有明显差距。对于 AFC-OFDM 编码系统而言, 其频谱

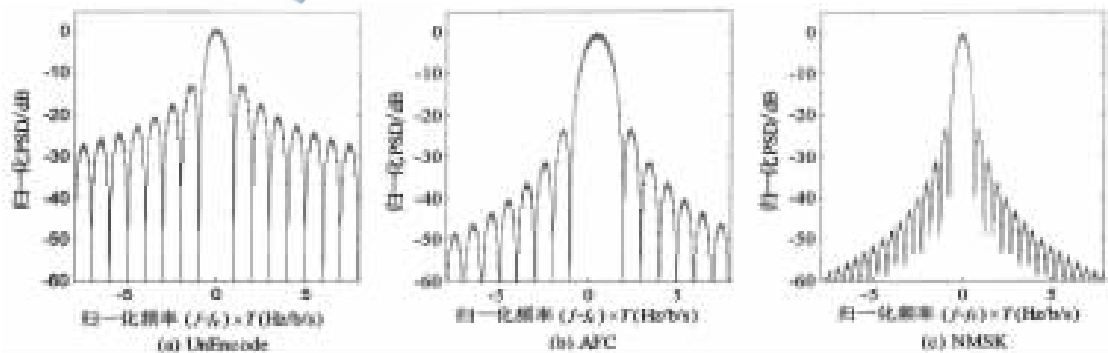


图 3 三种编码方式下归一化功率谱密度

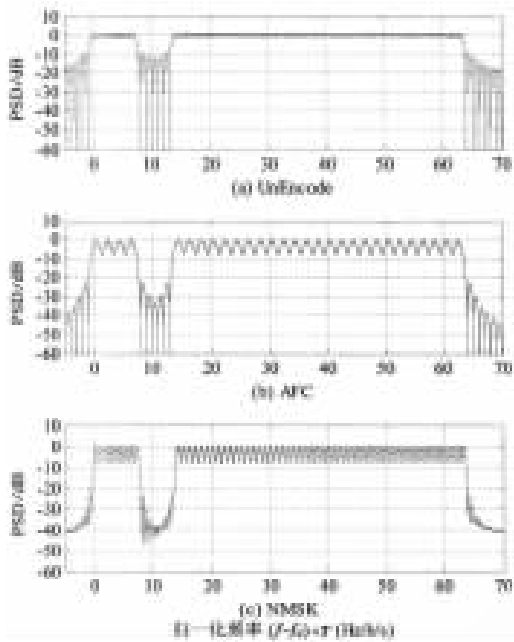


图4 关闭少量子载波(6个子载波)后三种系统归一化功率谱密度对比

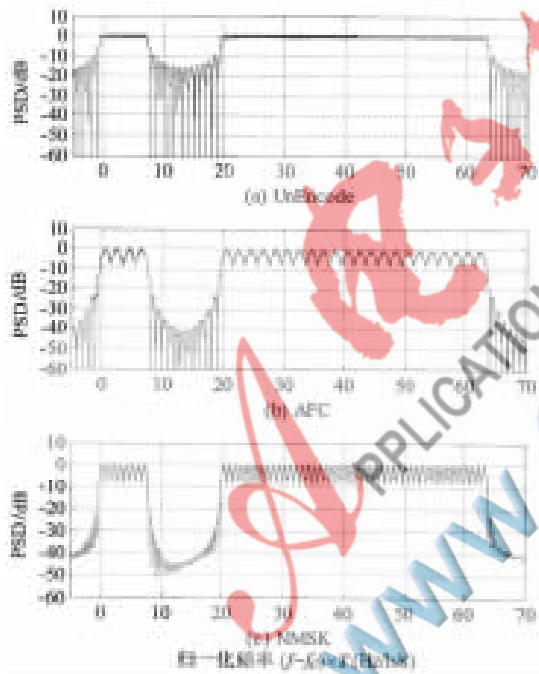


图5 关闭较多子载波(12个子载波)后三种系统归一化功率谱密度对比

凹槽部分有25%低于-40dB;与之相比,OFDM-NMSK编码系统依然保持了其优越性能,其频谱凹槽部分有将近70%低于-40dB。

由此可见,相比传统的减弱带外干扰方式,OFDM-NMSK编码系统具备较大优势。

本文提出了一种用以降低OFDM认知无线系统带外干扰的OFDM-NMSK编码调制方法。由于在OFDM-NMSK编码调制体系中NMSK子载波具有快速旁瓣衰减特性,因此当认知系统通过探测获知某些频段已不再可用时,系统只需直接关闭与该授权频段相关的NMSK子载波而无需借助其他措施即可有效避免对其产生干扰,从而能够动态适应周围无线频谱环境,相比传统的AFC编码方式而言,这种方式消除带外干扰的效果更好。

参考文献

- [1] REISENFELD S, MAGGIO G M. Detect and avoid for UWB-WiMedia: performance bounds of signal sensing[C]. ATC 2008, 2008:33-36.
- [2] HUANG S G, HWANG C H. Low complexity active interference cancellation for OFDM cognitive radios[C]. WCNC 2008, 2008:1279-1283.
- [3] 杨程,翁玮文,周正.降低MB-OFDM认知无线电带外干扰的编码调制方法及其性能分析[J].电子与信息学报,2009,31(4):878-881.
- [4] ELTHOLTH A A, MIKHAIL A R, ELSHERBINI A, et al. Performance of multiamplitude minimum shift keying (N-MSK) with orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). EUROCON 2007, 2007:1057-1060.
- [5] GRONEMEYER S, MCBRIDE A. MSK and offset QPSK modulation[J]. IEEE Trans. Commun., 1976(24):809-820.
- [6] BRANKA V, JINHONG Y. Space-time coding[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2003:49-89.

(收稿日期:2012-02-10)

作者简介:

唐菁敏,男,1979年生,博士,讲师,主要研究方向:通信与信息系统。

冯思泉,男,1974年生,硕士,讲师,主要研究方向:通信与信息系统。

龙华,女,1963年生,教授,主要研究方向:通信与信息系统。