

甚低频动态调谐天线性能

董颖辉, 柳超

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 将最小移频键控(MSK)信号分解成包含“空号”和“传号”两个频率两电平正交调幅(2QAM)信号, 推导了 MSK 信号的“空号”频率和“传号”频率分别通过甚低频发射天线固定调谐系统和动态调谐系统的功率谱表达式, 计算了不同码元速率情况下甚低频发射天线固定调谐系统和动态调谐系统的匹配系数和天线有效带宽。计算结果表明: 动态调谐方法可改善天线的匹配性能, 增加天线系统的有效带宽, 从而可提高甚低频发射天线容许的通信速率。

关键词: 天线; 甚低频; 调谐系统; MSK; 功率谱

中图分类号: TN822.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-3486(2010)05-0098-05

On characteristics of dynamic tuning VLF antenna

DONG Ying-hui, LIU Chao

(College of Electronic Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Minimum shift keying (MSK) signal can be divided into 2QAM consisting of both space and mark signal. The expression of the space and mark signal power spectrum were derived when a MSK signal passed through a fixed tuning system and a dynamic tuning system. The antenna matching coefficient and effective bandwidth were calculated respectively for two tuning systems in the state of different symbol rates. The result indicates that the dynamic tuning system can improve the matching performance and effective antenna bandwidth significantly and thus raise the symbol rate of the MSK signal passing through the VLF transmitting antenna.

Key words: antenna; very low frequency; tuning system; MSK; power spectrum

甚低频通信(3~30 kHz)主要用来对水下潜艇进行通信。甚低频通信速率较低,一般只有几十波特,主要原因是岸基甚低频发射天线的Q值高、频带窄,尤其在工作频率低端,天线带宽只有几十赫兹。如何有效提高通信速率一直是甚低频通信中的一个难题^[1-2]。要提高通信速率,就必须增加天线有效带宽,传统的方法是使天线调谐在信号载波上,通过在回路中串联电阻,降低系统效率来增加天线带宽,这将影响系统的通信能力。文献[3-5]提出了一种不同的天线调谐方法,借助该方法天线不再固定调谐在信号载波上,而是使甚低频天线实时动态调谐在调制信号的“空号”和“传号”频率上,从而可以增加天线系统的有效带宽,提高系统的通信速率。但目前还没有文献对天线动态调谐系统的有效带宽与码元速率的关系进行定量分析。

文中从最小移频键控(MSK)信号“空号”和“传号”功率谱入手,对不同调谐系统的带宽特性进行定量研究,推导甚低频 MSK 信号中“空号”和“传号”成分通过固定天线调谐系统及动态调谐系统的功率谱,研究不同码元速率下的天线效率,以证明动态调谐方式能够提高天线有效带宽、匹配性能,从而提高甚低频通信系统的通信速率。

收稿日期:2010-02-14; 修回日期:2010-05-05。

作者简介:董颖辉(1971—),女,讲师,硕士,主要研究方向为甚低频通信,E-mail: jgqdyh@sina.com。

1 甚低频发射天线固定调谐系统功率谱分析

MSK 信号数学表达式为

$$S_{\text{MSK}}(t) = \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi a_k}{2T_s} + \varphi_k), \quad (1)$$

式中: f_c 为载频; T_s 为码元宽度; $a_k = \pm 1$ 为码元; 相位常数 φ_k 的选择应保证 MSK 信号相位在码元转换时刻连续, 即相位约束条件为

$$\varphi_k = \begin{cases} \varphi_{k-1}, & a_k = a_{k-1}; \\ \varphi_{k-1} + k\pi, & a_k \neq a_{k-1}. \end{cases} \quad (2)$$

$a_k = +1$ 时, MSK 信号频率(传号)为

$$f_2 = f_c + 1/(4T_s); \quad (3)$$

$a_k = -1$ 时, MSK 信号频率(空号)为

$$f_1 = f_c - 1/(4T_s). \quad (4)$$

MSK 信号可看成是“空号”和“传号”的叠加, 其信号表达式分别可写为

$$S_{f_1}(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_k), & a_k = -1, \\ 0, & a_k = +1; \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{f_2}(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_2 t + \varphi_k), & a_k = +1, \\ 0, & a_k = -1. \end{cases} \quad (6)$$

若取 $\varphi_0 = 0$, 则 $\varphi_k = 0$ 或 π 。因此, $S_{f_1}(t)$ 、 $S_{f_2}(t)$ 又可写为

$$S_{f_{1,2}}(t) = \frac{1}{2}(u(t) \mp a_k) \cos \varphi_k \cos(2\pi f_{1,2} t), \quad (7)$$

式中: $u(t)$ 为幅度为 1 的阶跃函数。

式(7)中载波相位有四个可能的取值, $a_k = -1$ 时, $S_{f_2}(t) = 0$, 相位 $\varphi_k = 0$ 或 π ; $a_k = +1$ 时, $S_{f_1}(t)$ 值为 0, 相位 φ_k 取值为 $\pi/2$ 或 $3\pi/2$, 故可将 $S_{f_1}(t)$ 和 $S_{f_2}(t)$ 看成是载频分别为 f_1 、 f_2 的 2QAM 调制。2QAM 功率谱密度同 4PSK, 其主瓣宽度约为 MSK 主瓣宽度的 $2/3^{[6]}$, 因此 $S_{f_1}(t)$ 和 $S_{f_2}(t)$ 的功率谱可表示为

$$G_{f_{1,2}}(f) = A \left(\frac{\sin(2\pi(f - f_{1,2})T_s)}{2\pi(f - f_{1,2})T_s} \right)^2, \quad (8)$$

其中: A 为系数。

根据信号的正交性, $S_{f_1}(t)$ 和 $S_{f_2}(t)$ 合成信号的功率谱可表示为

$$G_{f_1+f_2}(f) = \frac{16A}{\pi^2} \left(\frac{\cos(2\pi(f - f_c)T_s)}{1 - 16(f - f_c)^2 T_s^2} \right)^2. \quad (9)$$

可以看出, $S_{f_1}(t)$ 和 $S_{f_2}(t)$ 的合成谱表达式与 MSK 信号谱表达式 $G_{\text{MSK}}(f)$ 相同^[7]。

甚低频发射天线固定调谐系统如图 1 所示, 在工作频带低端, 天线可等效为电容 C_a 和电阻 R_a 的串联, 调谐电感 L_1 用于抵消天线容抗。通过调节 L_1 可使天线回路谐振在 MSK 信号的载波频率 f_c 上。假设谐振在 f_c 时的天线回路的频率特性为 $H(f - f_c)$, 则 $S_{f_1}(t)$ 、 $S_{f_2}(t)$ 通过天线后的功率谱 $G_{o1}(f)$ 、 $G_{o2}(f)$ 分别为

$$G_{o1}(f) = G_{f_1}(f) H^2(f - f_c); \quad (10)$$

$$G_{o2}(f) = G_{f_2}(f) H^2(f - f_c). \quad (11)$$

合成后的 $G_o(f)$ 功率谱可表示为

$$G_o(f) = G_{f_1+f_2}(f) H^2(f - f_c). \quad (12)$$

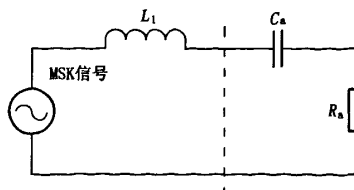


图 1 甚低频发射天线固定调谐系统等效电路

Fig. 1 Fixed VLF transmitting system

定义天线系统的匹配系数为天线的输出功率(包括辐射和损耗)与输入功率之比,即

$$\eta = \int_{f_c-f_s}^{f_c+f_s} G_o(f) df / \int_{f_c-f_s}^{f_c+f_s} G_{f_1+f_2}(f) df, \quad (13)$$

式中: f_s 为 MSK 信号的码元速率。

天线匹配系数反映调谐系统与天线的匹配程度。假设天线谐振于 20 kHz 时的 3 dB 带宽为 $B=70$ Hz, MSK 信号的码元速率 f_s 分别为 50 bit/s 和 100 bit/s 时,由式(8)~(12)计算的天线输入、输出功率谱如图 2 所示。可以看出:随码元速率的提高,载频(20 kHz)功率均可全部通过,而 MSK 信号中的传号频率 f_1 和空号频率 f_2 失配则越来越严重,有部分功率被反射回发信机,可能影响发信机的正常工作。

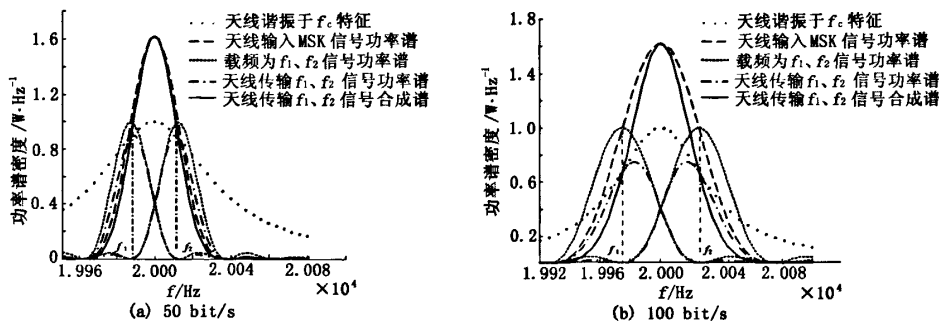


图 2 天线固定调谐系统的输入、辐射功率谱

Fig. 2 Input and radiation power spectrums of fixed antenna tuning system

天线谐振于 20 kHz 且带宽为 70 Hz 时码元速率 f_s 分别为 25, 40, 50, 60, 75, 100 bit/s 时的天线系统的匹配系数 η 分别为 0.971, 0.934, 0.906, 0.875, 0.816, 0.708。可以看出:当码元速率超过 50 bit/s 时,天线系统匹配系数小于 0.9,这意味着超过 10% 的功率由于失配而返回甚低发信机。

2 甚低频发射天线动态调谐系统功率谱分析

在天线调谐回路中加入开关 K 及小电感 ΔL 的调谐方式可使天线回路实时动态地调谐在 f_1 和 f_2 两个频率上(见图 3),即当 $a_k = -1$ 时,开关 K 打开,回路谐振于 f_1 ;当 $a_k = +1$ 时,开关 K 闭合,回路谐振在 f_2 。所以,天线动态调谐系统总是对信号 $S_{f_1}(t)$ 与 $S_{f_2}(t)$ 中的 f_1 和 f_2 有最大功率输出。

假设谐振在 f_1 和 f_2 时的天线回路的频率特性分别为 $H(f-f_1)$ 和 $H(f-f_2)$,则 $S_{f_1}(t)$ 、 $S_{f_2}(t)$ 通过天线后的功率谱 $G_{o1}(f)$ 、 $G_{o2}(f)$ 分别为

$$G_{o1}(f) = G_{f_1}(f) H^2(f-f_1); \quad (14)$$

$$G_{o2}(f) = G_{f_2}(f) H^2(f-f_2), \quad (15)$$

其合成功率谱 $G_o(f)$ 为

$$G_o(f) = A \left(\frac{\sin(2\pi(f-f_1)T_s)}{2\pi(f-f_1)T_s} H(f-f_1) + \frac{\sin(2\pi(f-f_2)T_s)}{2\pi(f-f_2)T_s} H(f-f_2) \right)^2. \quad (16)$$

假设动态调谐系统谐振于 f_1 和 f_2 时的天线带宽与谐振于中心频率 f_c 时相同。若 f_c 为 20 kHz, 天线谐振于 f_1 和 f_2 时的 3 dB 带宽为 $B=70$ Hz, 当 MSK 码元速率 f_s 分别为 50、100 bit/s 时,由式(8)(9)和(14)~(16)可计算出天线输入、输出功率谱(见图 4)。由图 4 可以看出:随码元速率的提高,MSK 信号中传号频率 f_1 和空号频率 f_2 的功率均全部输出,因此动态调谐系统输出信号功率谱不同于固定调谐系统,其功率谱中的 f_1 、 f_2 成分得到较大提高。

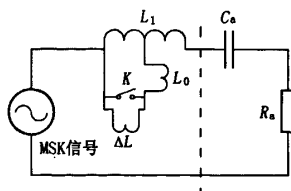


图 3 甚低频发射天线动态调谐系统等效电路

Fig. 3 Dynamic tuning system of VLF transmitting system

表 1 列出了天线动态谐振于传号频率 f_1 和空号频率 f_2 且带宽为 70 Hz 时不同码元速率的天线系统的匹配系数。可以看出:当码元速率小于 80 bti/s 时,天线系统匹配系数大于 0.9,这比固定调谐系统的容许码元速率有明显提高。

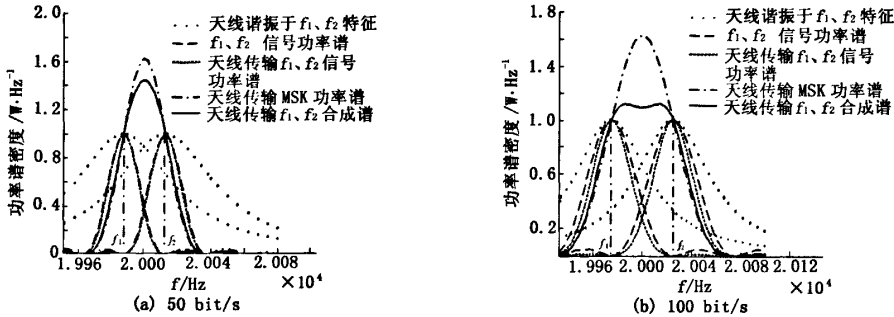


图 4 动态调谐天线输入、辐射功率谱
Fig. 4 Input and radiation power spectrums of dynamic tuning system

表 1 动态调谐天线系统性能
Tab.1 Performance of dynamic antenna tuning system

| 天线谐 振频率 f_1/Hz | 天线谐 振频率 f_2/Hz | 天线 带宽 B/Hz | 码元 速率 $f_s/\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ | 天线匹 配系数 η | 天线谐 振频率 f_1/Hz | 天线谐 振频率 f_2/Hz | 天线 带宽 B/Hz | 码元 速率 $f_s/\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ | 天线匹 配系数 η |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|----------------------|
| $20k-25/4$ | $20k+25/4$ | 70 | 25 | 0.995 | $20k-75/4$ | $20k+75/4$ | 70 | 60 | 0.948 |
| $20k-50/4$ | $20k+50/4$ | 70 | 40 | 0.981 | $20k-75/4$ | $20k+75/4$ | 70 | 75 | 0.920 |
| $20k-50/4$ | $20k+50/4$ | 70 | 50 | 0.966 | $20k-100/4$ | $20k+100/4$ | 70 | 100 | 0.863 |

3 匹配性能分析

带有调谐和匹配网络的天线系统的效率一般定义为 $\eta = \eta_a \times \eta_p$, 其中: η_a 为天线本身的辐射效率; η_p 为天线系统的匹配系数。

根据上章得到带宽为 $B=70\text{ Hz}$, 两种调谐系统随码元速率改变时天线系统匹配系数的变化曲线如图 5 所示。由图可见, 在相同码元速率下动态调谐系统的匹配系数明显高于固定调谐系统的匹配系数。

当两个系统的匹配系数相同时, 在天线带宽不变的情况下, 动态调谐可以达到的码元速率更高; 在码元速率不变时, 动态调谐对天线带宽要求降低。例如, 在天线带宽为 70 Hz 时, 它们分别可以达到的码元速率如表 2 所示。从表 2 可以看出: 当要求匹配系数大于 0.96 时, 传统调谐系统的码元速率为 30 bit/s, 动态调谐可达到 55 bit/s。因此, 对发信天线系统的匹配性能要求越高, 动态调谐方法提高系统允许码元速率的效果越明显。

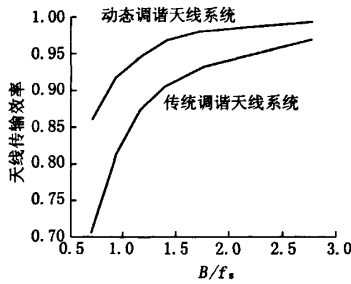


图 5 甚低频发射天线传输效率
Fig. 5 Efficiency of VLF transmitting antenna

表 2 匹配系数相同两调谐系统所能达到的码元速率
Tab.2 Comparison of two systems' code ratio in same transmitting efficiency

| 匹配 系数 η | 天线 带宽 B/Hz | 传统调谐 码元速率 $f_s/\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ | 动态调谐 码元速率 $f_s/\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ | 匹配 系数 η | 天线 带宽 B/Hz | 传统调谐 码元速率 $f_s/\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ | 动态调谐 码元速率 $f_s/\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|--------------------|---------------------------|--|--|--------------------|---------------------------|--|--|
| 0.90 | 70 | 51 | 84 | 0.96 | 70 | 30 | 55 |
| 0.92 | 70 | 45 | 75 | 0.98 | 70 | 20 | 40 |
| 0.94 | 70 | 38 | 64 | 0.995 | 70 | 10 | 25 |

4 结 论

文中采用功率谱分析方法,研究了 MSK 信号分别通过甚低频发射天线固定调谐系统和动态调谐系统的匹配性能,结果表明:

1) 通过天线动态调谐系统的 MSK 信号功率谱中的 f_1 和 f_2 频率成分明显强于通过传统固定调谐系统 f_1 和 f_2 频率成分。

2) 在相同天线带宽和码元速率条件下,甚低频天线动态调谐系统的匹配性能明显优于固定调谐系统的匹配性能。

3) 在天线带宽相同条件下,相比传统的固定调谐方式,采用动态调谐方式甚低频天线系统容许的最高码元速率有明显提高。

参考文献(References):

- [1] WATT A D. 甚低频无线电工程 [M]. 北京:国防工业出版社,1973.
- [2] 葛勤革. 一种新的甚低频发射机调机方法 [J]. 海军工程大学学报,2009,21(4):75-77.
GE Qin-ge. A new tuning method for VLF transmitter [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2009,21(4):75-77. (in Chinese)
- [3] JOHANNESSEN P R, PLANCK P V. Antenna Tuning System and Method [P]. United States: 4689803,1987-09-01.
- [4] JOHNSON L J. Magnetic Amplifier Switch for Automatic Tuning of VLF Transmitting Antenna [P]. United States: 5034697,1991-07-23.
- [5] WOLFF H G. High speed frequency shift keying of LF/VLF and radio circuits [J]. IEEE Trans. on Communication System, 1957,5:29-42.
- [6] 徐明远,陈德章,冯云. 无线电频谱分析 [M]. 北京:科学出版社,2007.
- [7] 冯重熙. 现代数字通信技术 [M]. 北京:人民邮电出版社,1993.

~~~~~  
(上接第 73 页)

- [9] TSEN Fu-shang P, SUNG Ting-yi, LIN Men-yang, *et al.* Finding the most vital edges with respect to the number of spanning trees [J]. IEEE Trans. on Reliability, 1994,43(4):600-602.
- [10] RAO V V. Most-vital edge of a graph with respect to spanning trees [J]. IEEE Trans. on Reliability, 1998,47(1):6-7.
- [11] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406:378-382.
- [12] 姜禹,胡爱群,潘婷婷. 一种评价通信网节点重要性的新方法——节点孤立法 [J]. 高技术通讯,2008,18(7):673-678.  
JIANG Yu, HU Ai-qun, PAN Ting-ting. A new method for finding the most vital node in communication networks—node-isolation [J]. High Technology Letters, 2008,18(7):673-678. (in Chinese)

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>