

A Survey on SWIPT System Based on Coupled Inductor

Yong Zhu, Lenan Wu

School of Information Science & Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu
Email: 220140820@seu.edu.cn, wuln@seu.edu.cn

Received: Jan. 20th, 2017; accepted: Feb. 3rd, 2016; published: Feb. 14th, 2017

Abstract

Coupled inductor is the most commonly used transmission medium of Wireless Power Transmission (WPT) system; it can be used to transmit not only energy, but also information. This paper studied the Simultaneous Wireless Information and Power Transmit (SWIPT) system based on coupled inductor and showed the effect of different parameters on the performance of system, including the performance of bit error rate and power transmission efficiency. This paper also compared the performance of the SWIPT system using the different modulations of ASK and EBPSK. The simulation results showed that the bit error rate of the SWIPT system can be closed to 0, and the efficiency can reach 84%.

Keywords

Coupled Inductor, WPT, SWIPT, EBPSK

基于耦合电感的无线携能通信系统研究

朱 勇, 吴乐南

东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京
Email: 220140820@seu.edu.cn, wuln@seu.edu.cn

收稿日期: 2017年1月20日; 录用日期: 2017年2月3日; 发布日期: 2017年2月14日

摘 要

耦合电感作为无线能量传输(WPT)中最常用的传输媒介, 不仅可用来传输能量, 也可用来传输信息。本文研究了利用耦合电感同时传输信息和能量(SWIPT)时的误码率、能量传输效率及系统各参数对性能的影响, 优化了系统参数, 并且比较了ASK和EBPSK调制信号用于该携能通信系统时的性能。仿真结果表

明, 基于耦合电感的携能通信系统能够同时做到误码率接近0, 效率达到84%。

关键词

耦合电感, 无线能量传输, 无线携能通信, EBPSK

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 无线能量传输技术(Wireless Power Transmission, WPT)迅猛发展并广为应用, 小到电动牙刷、手机等生活用品, 大到电动汽车、无人机这样的交通工具, 都在使用无线能量传输。然而在很多应用场景中, 不仅需要传输能量还需要传输信息。如植入式医疗设备为减轻病人痛苦常常需要为设备无线充电, 同时还需要读取设备中存储的病人身体信息, 电动汽车在无线充电的同时可能还需要传输一些状态信息和控制数据, 因此在这样的需求下, 无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)应运而生。

SWIPT 是传统的 WPT 技术和无线信息传输(Wireless Information Transmission, WIT)技术的结合, 旨在利用电磁能量同时无线地传输能量和信息。最早提出这一概念并从理论上进行分析的是 Varshney, 他从信息论的角度分别给出了离散和连续情况下加性高斯白噪声(AWGN)信道的容量能量函数(Capacity Energy Function) [1]。之后 Pulkit Grover 和 Anant Sahai 提出了通过耦合电感电路同时传输信息和能量的问题, 将其等效为平均功率受限的频率选择性 AWGN 信道, 并通过注水法得到了最优的功率分配, 其研究结果显示可以通过损失很少能量传输效率的同时获得一半的信道容量[2]。

本文延续 Grover 和 Sahai 的研究, 探讨了耦合电感电路中, 利用实际的调制信号同时传输信息和能量时的误码率和传输效率, 通过仿真给出了电路各参数的选取依据, 最终实现了损失一点能量传输效率的同时达到很低的误码率。

2. 基本原理

2.1. 系统模型

图 1 是耦合电感的电路模型, 一般通过在发送端和接收端串联或并联电容提高能量传输的效率[3] [4], 下面就串联 - 串联补偿类型的耦合电感模型进行分析。

记 U_s 为理想电压源, R_1 和 R_2 分别为电感 L_1 和 L_2 的内阻, C_1 为发端的补偿电容, C_2 为收端补偿电容, i_1 和 i_2 分别为收发端电流。则对于任意信号可得下列时域方程组

$$\begin{cases} R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{\int i_1(t) dt}{C_1} = U_s(t) \\ L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 i_2(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

两边同取拉普拉斯变换得到

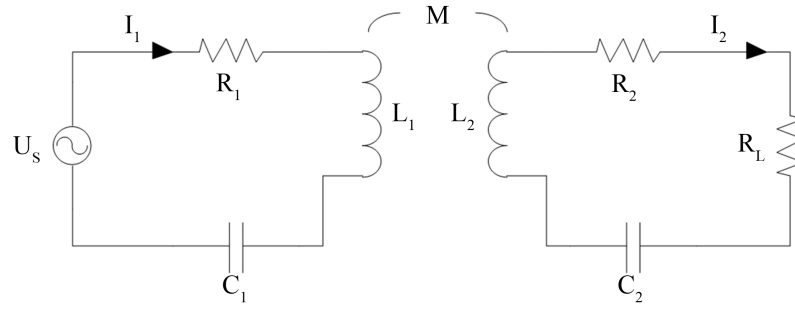


Figure 1. Coupled inductor circuit with capacitance connected
图 1. 串 - 串补偿耦合电感电路

$$\begin{cases} R_1 i_1(s) + sL_1 i_1(s) - sMi_2(s) + \frac{1}{sC_1} i_1(s) = U_s(s) \\ sL_2 i_2(s) + R_2 i_2(s) = sMi_1(s) \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可得耦合电感的电压传递函数

$$H(s) = \frac{U_{RL}(s)}{U_s(s)} = \frac{a_3 s^3}{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (3)$$

其中参数经计算可得

$$\begin{cases} a_3 = MR_L C_1 C_2 \\ b_4 = C_1 C_2 L_1 L_2 - M^2 C_1 C_2 \\ b_3 = C_1 L_1 (C_2 R_2 + C_2 R_L) + C_1 C_2 R_1 L_2 \\ b_2 = C_1 L_1 + C_2 L_2 + C_1 R_1 (C_2 R_2 + C_2 R_L) \\ b_1 = C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_2 R_L \\ b_0 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

源端电流的激励函数为

$$H_i(s) = \frac{i_1(s)}{U_s(s)} = \frac{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + a_0} \quad (5)$$

其分母系数和电压传输系数相同, 分子参数为

$$\begin{cases} a_3 = C_1 C_2 L_2 \\ a_2 = (R_2 + R_L) C_1 C_2 \\ a_1 = C_1 \\ a_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则接收功率为

$$W_{\text{out}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_{R_L}^2(t)}{R_L} dt \quad (7)$$

电源的输出功率为

$$W_{\text{in}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_s(t) \cdot I_1(t) dt \quad (8)$$

传输效率为

$$\eta = W_{\text{out}}/W_{\text{in}} \quad (9)$$

为了同时传输信息和能量, 对接收到的信号一部分用于解调, 一部分用于获取能量, 假设用于解调的功率比例为 ρ , 其定义为整流电路和解调电路所得信号功率的比值。图 2 为系统框图, 其中常用的调制方式有 ASK, BPSK, EBPSK 等。

负载电阻不变, 则用于解调的电压幅度[5]为

$$U_{\text{inf}} = \sqrt{\rho}U_{R_L} \quad (10)$$

用以整流电路的电压幅度为

$$U_{\text{power}} = \sqrt{1-\rho}U_{R_L} \quad (11)$$

以上模型假设功率分配是理想的, 不会带来能量损失和引入噪声, 并在计算整流电路的接收功率时, 未计及噪声功率。

2.2. 调制信号

为了同时传输信息和能量, 选取下面两种调制信号作为信息和能量的载体。一种为 ASK 调制信号, 其表达式为

$$\begin{aligned} g_0(t) &= A \sin 2\pi f_c t, 0 \leq t \leq T \\ g_1(t) &= B \sin 2\pi f_c t, 0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (12)$$

通过不同的幅度来区别 0, 1 码元, 定义调制度 m 为

$$m = \frac{B-A}{A+B}, B > A \quad (13)$$

调制度会影响载波功率, 从而影响能量传输效率。该信号通常采用包络检波来解调, 包络检波是 ASK 信号最简单的解调方式, 通过整流、低通滤波和抽样, 对幅度进行判决, 若高于门限值时为 1, 低于门限值时为 0。当 0 和 1 码元等概时, 门限为 $\frac{A+B}{2}$ 。

另一种为 EBPSK 调制信号[6], 下面是其表达式

$$\begin{aligned} g_0(t) &= A \sin 2\pi f_c t, 0 \leq t \leq T \\ g_1(t) &= \begin{cases} B \sin(2\pi f_c t + \theta), 0 \leq t \leq \tau, 0 \leq \theta \leq \pi \\ A \sin 2\pi f_c t, \tau \leq t \leq T \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 1 码元存在 τ 长度的跳变分量, 从而区别于 0 码元, 通常取 $B = A, \theta = \pi$ 。该调制信号可以通过冲击滤波器进行解调[7]。另外通常 τ 值为载波周期的整数倍, 定义跳变周期数

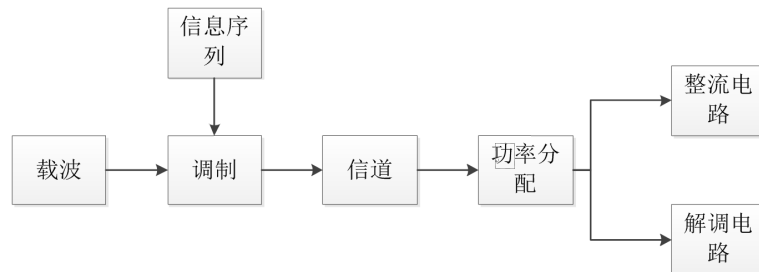


Figure 2. The structure of SWIPT system
图 2. 携能通信系统框图

$$K = \tau \cdot f_c \quad (15)$$

当 EBPSK 信号经过冲击滤波器时, 1 码元处会产生一个尖脉冲, 而 0 码元处不会, 当 K 值越小, 脉冲的幅度越高, 更利于解调。

图 3 是 ASK 信号和 EBPSK 信号示意图, 数据为 001110。

3. 参数选取

耦合电感电路中通过在收发端串联电容, 使之与电感谐振, 从而提高能量传输效率。给定工作频率 ω_c 和耦合线圈电感值 L_1, L_2 时, 谐振电容的容值可由下式确定[8] [9]。

$$C_1 = \frac{1}{\omega_c^2 L_1}, C_2 = \frac{1}{\omega_c^2 L_2} \quad (16)$$

通常取 $L_1 = L_2 = L$, 从而 $C_1 = C_2 = \frac{1}{\omega_c^2 L} = C$ 。

为研究各参数对携能通信系统性能的影响, 在此提出误码率 - 接收功率曲线(BER-P)和误码率 - 功率效率曲线(BER-EFF)。

当参数固定时, 系统具有一定的传输效率 η 和误码率 P_{err} , 最理想的系统应该满足:

$$\begin{cases} \eta = 100\% \\ P_{\text{err}} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

然而实际系统往往达不到, 只能通过损失一定能量传输效率的同时达到一个可接受的误码率。当系统的某个参数变化时, 系统的功率传输效率和误码率也随之变化, 这样就产生一条 BER-EFF 曲线, 同理还有 BER-P 曲线。通过该曲线可以研究系统参数对携能通信系统的影响, 从而选取合适的参数达到较好的性能。

下面通过 Matlab 仿真研究耦合电感电路中各参数对系统的影响, 包括功分系数、电容、等效电阻对系统性能的影响。采用调制度为 100% 的 ASK 信号, 电路参数默认值参考表 1, 仿真时改变其中待研究

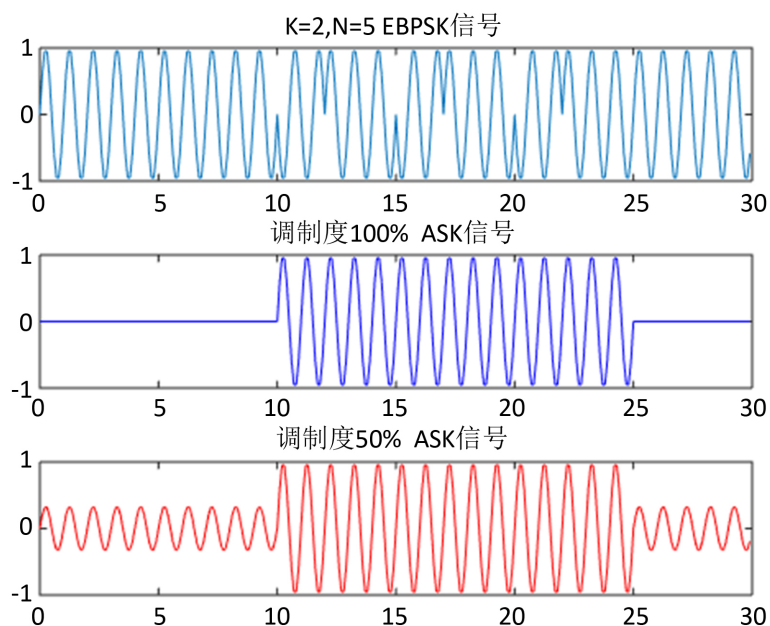


Figure 3. EBPSK signal and ASK signal

图 3. EBPSK 信号和 ASK 信号

的参数得到 BER-EFF 曲线和 BER-P 曲线。

1) 等效电阻 R

通常由电感以及引线引入, 通过研究该阻值对系统性能的影响, 可帮助我们选取电感的材料。该等效阻值越小, 线圈 Q 值越大, 信道越窄, 这样有利于能量传输, 不利于信息传输。图 4 是等效电阻从 0.01 变化到 2 时的 BER-P 和 BER-EFF 曲线。

可见 R 越大, 能量传输效率越低, 误码率也越低, 对于信噪比较大时, 存在明显的拐点, R 值宜选择拐点附近的值。在此选择 0.4Ω 。

2) 功分系数 ρ

ρ 决定了能量获取和信息解调间的功率分配, 用于能量获取的信号能量越多, 就越有利于能量的接收。图 5 是 ρ 从 0.1 变化到 1 时 BER-P 和 BER-EFF 曲线。

由图 5 可以看出误码率不随 ρ 变化, 而只与信噪比有关, 因为这里假设功分电路引入的噪声可忽略, 因此功分电路在减小信号能量的同时也减小了噪声能量, 信噪比实际没变, 所以并不会影响解调误码率。

Table 1. Parameters of simulation
表 1. 仿真参数

电感 L	14 μH
电容 C	12.6651 nF
中心频率 F_c	377.97 kHz
耦合系数 k	0.06
电阻 $R_1 = R_2 = R$	0.04 Ω
负载电阻 RL	10 Ω
U_s	1 v

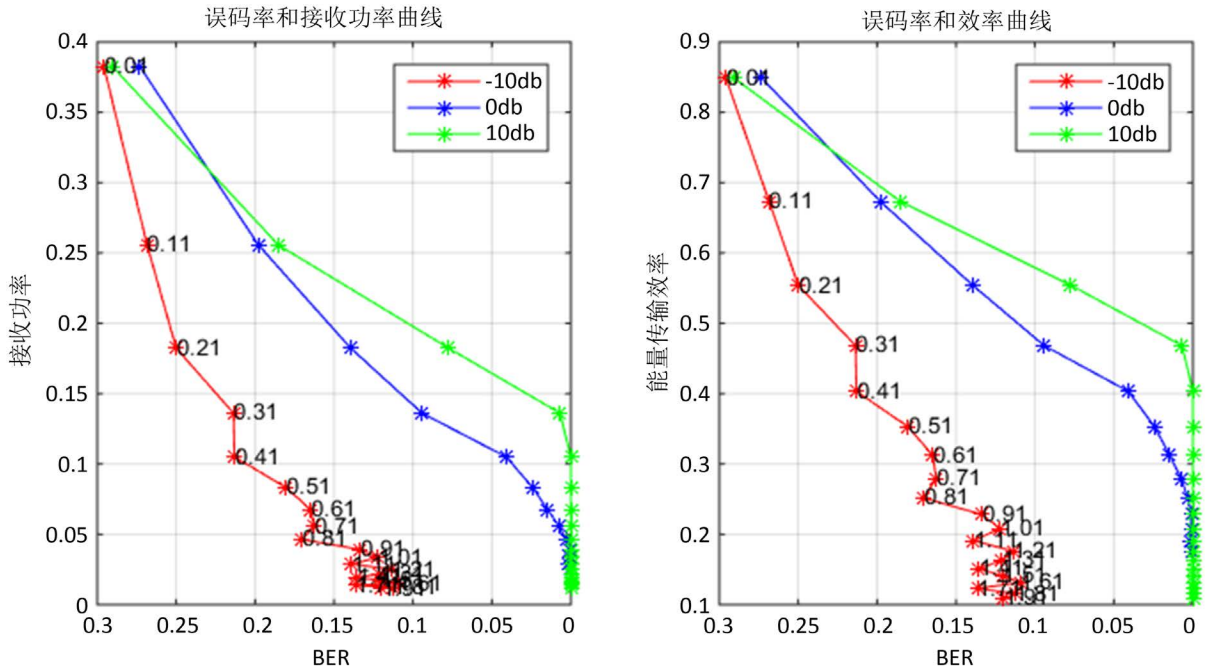


Figure 4. Curve: effect of parameter R on performance
图 4. 等效电阻 R 对性能的影响

但考虑到实际情况, 该值不易取的过大, 所以在此取为 0.9。

3) 谐振电容 C

保持工作频率不变, 图 6 为容值从 6 nF 变化到 18 nF 时的 BER-P 和 BER-EFF 曲线。

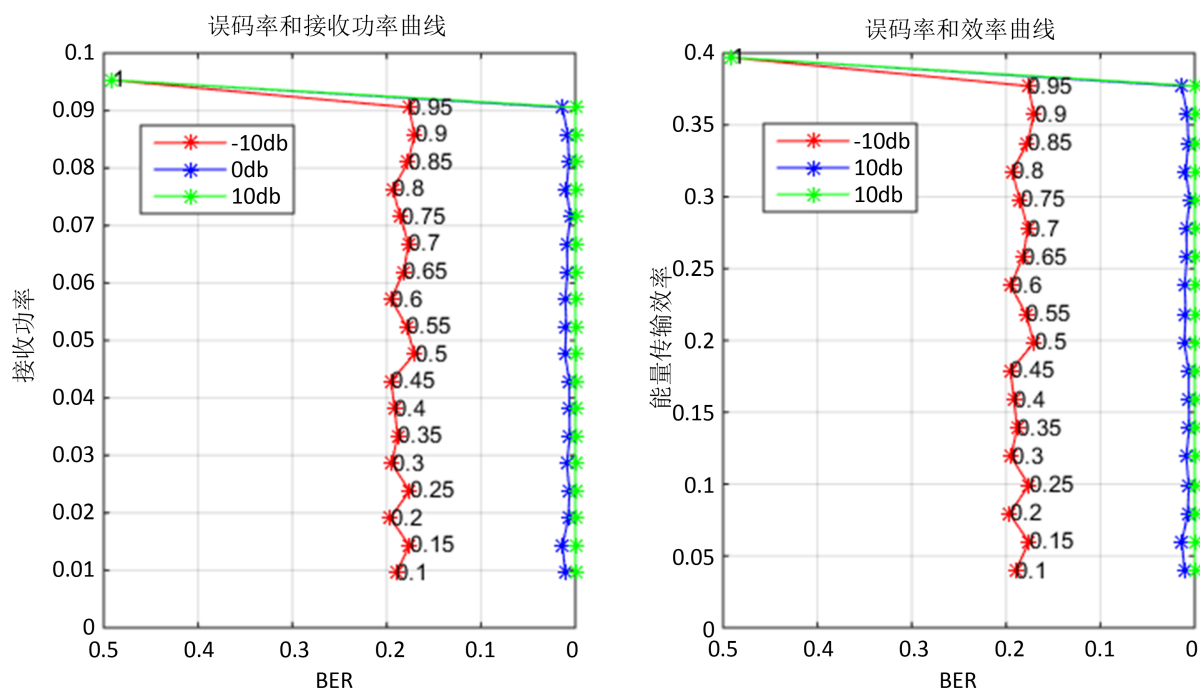


Figure 5. Curve: effect of parameter ρ on performance

图 5. 功分系数 ρ 对性能的影响

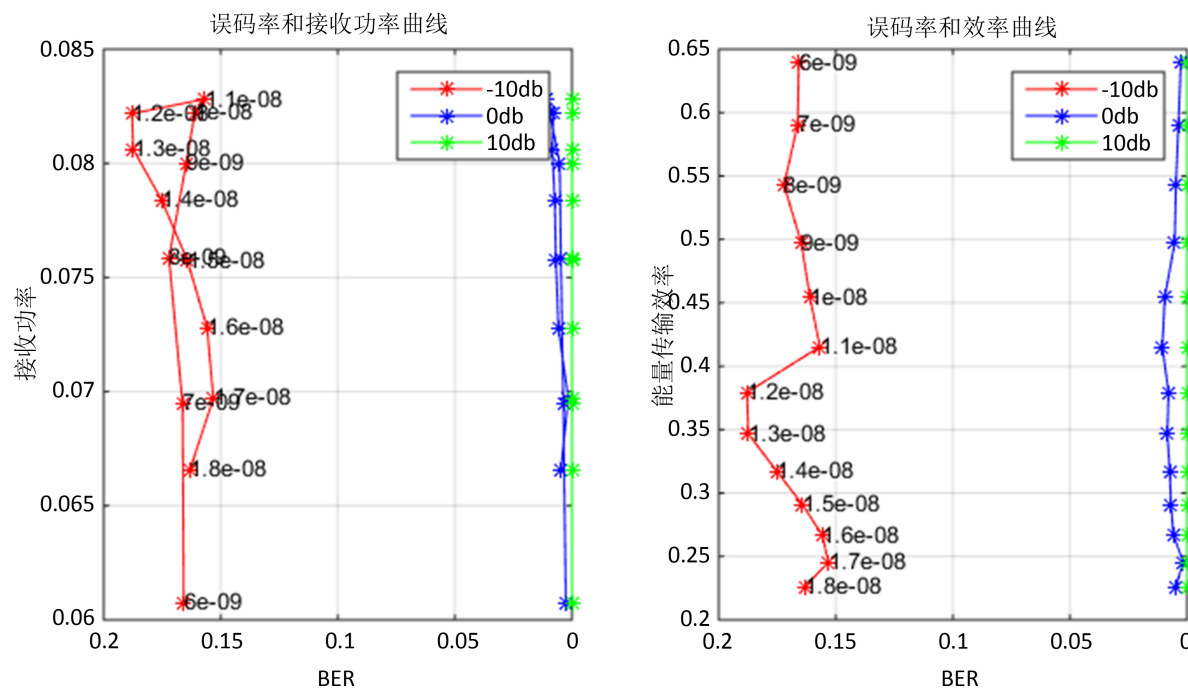


Figure 6. Curve: effect of parameter C on performance

图 6. 谐振电容 C 对性能的影响

Table 2. Parameters of simulation
表 2. 仿真参数

电感 L	19.7 μH
电容 C	9 nF
中心频率 F_c	377.97 kHz
耦合系数 k	0.06
电阻 $R_1 = R_2 = R$	0.4 Ω
负载电阻 R_L	10 Ω
U_s	1 v
ρ	0.9

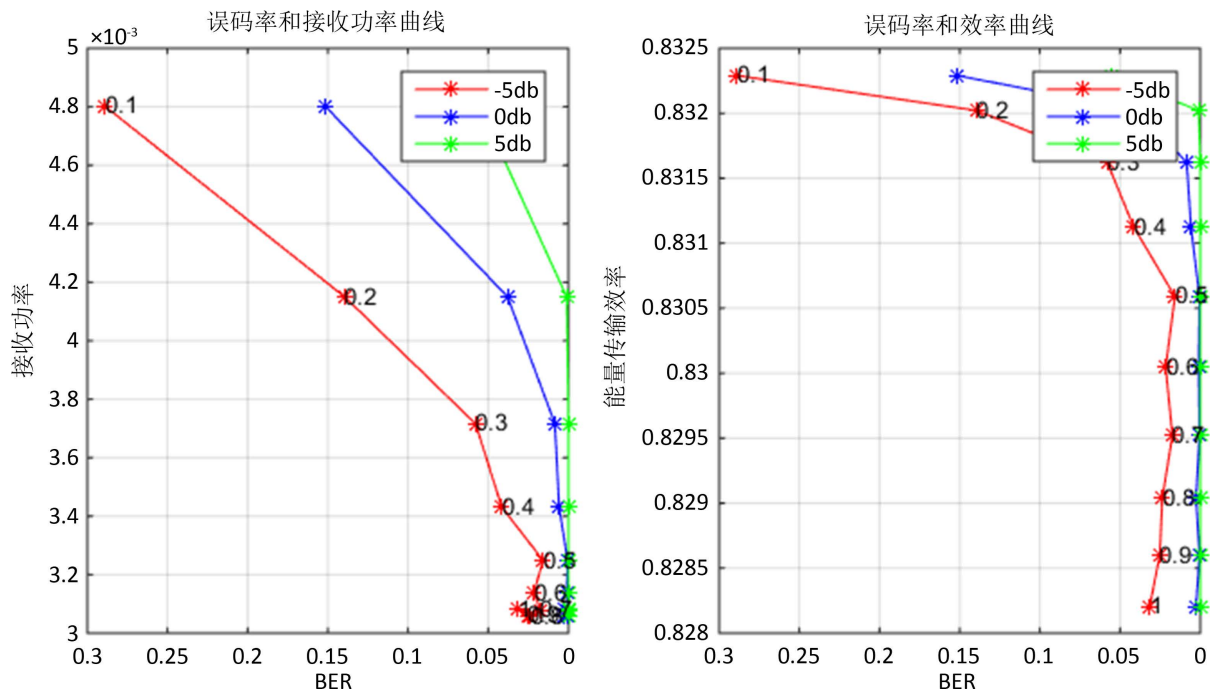


Figure 7. Curve: effect of parameter of ASK on performance
图 7. ASK 调制度对性能的影响

谐振电容值基本上也不影响误码率，但会影响接收功率和效率。电容越小，效率越高，但接收功率随电容值变化存在一个峰值，所以电容值宜选取在接收功率峰值附近且效率不太低的点。在此电容值选择 9 nF。

4. 调制方式比较

接着比较 ASK 调制和 EBPSK 调制用于携能通信系统时的性能。ASK 调制中的调制度 m 以及 EBPSK 的跳变分量 K 会影响载波与边带的功率比例，从而影响携能通信系统的性能。以此可以做出 BER-P 和 BER-EFF 曲线。

由第 3 节仿真得到的系统参数见表 2。

下面是仿真结果

1) ASK 的调制度 m 从 0.1 变为 1 时的 BER-P 和 BER-EFF 曲线。

ASK 调制度越小，信号功率越集中于载波，此时能量传输效率越高，误码率也越大。所以实际系统必须牺牲一定的能量传输才能达到合适的误码率要求。从图 7 中可看出信号的接收功率在 3.2~4.8 mw，

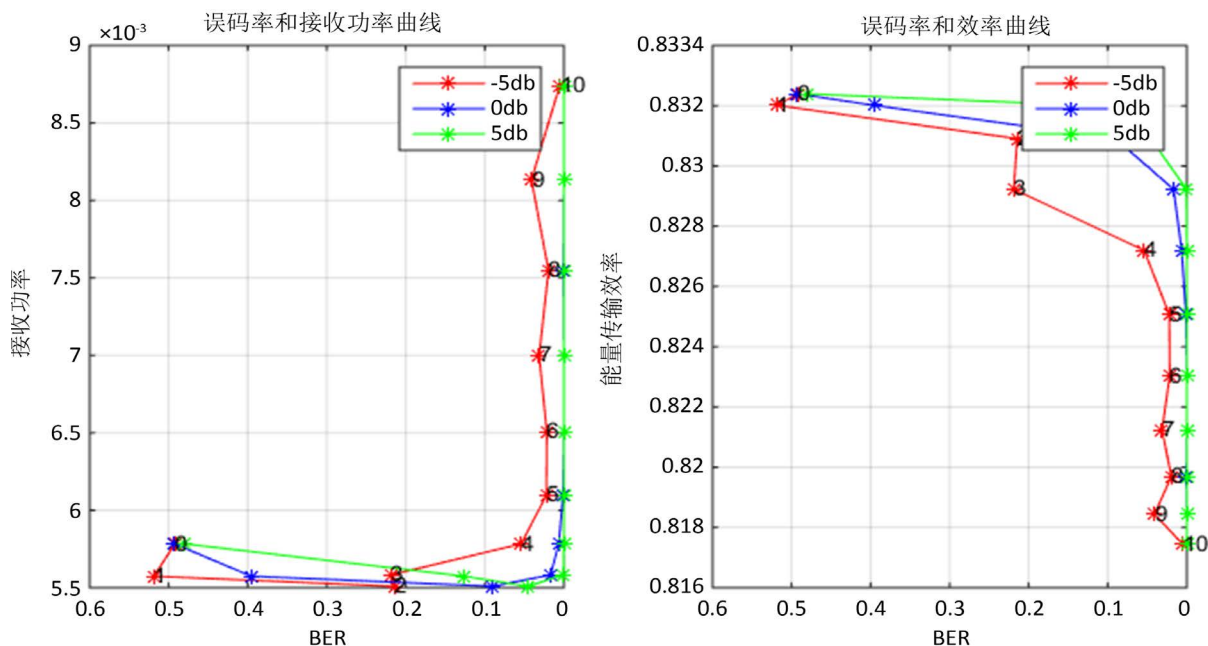


Figure 8. Curve: effect of parameter K of EBPSK on performance

图 8. EBPSK 跳变分量 K 对性能的影响

效率在 82%~83% 间, 实际中可以根据具体需求选择合适的工作点。

2) EBPSK 跳变分量 K 从 1 变化到 10 的 BER-P 和 BER-EFF 曲线

对于传输功率, K 取 10 最优, 误码率最低, 接收的能量也越多, 此时的效率基本保持在 80% 以上。综合比较可以看出(见图 8), 在接收功率方面 EBPSK 信号比 ASK 信号好很多, 效率两者差不多, 另外 EBPSK 信号存在误码率最低、接收能量更高的工作点, 更利于实际系统设计。

5. 结束语

本文给出了基于耦合电感无线携能通信系统的模型, 结合实际调制方式研究了该系统同时传输信息和能量的误码率和能量传输效率, 通过仿真分析优化了系统中各参数对性能的影响, 比较了 ASK 调制和 EBPSK 调制用于该系统时的性能。

参考文献 (References)

- [1] Varshney, L.R. (2008) Transporting Information and Energy Simultaneously. *IEEE International Symposium on Information Theory, ISIT 2008*, Toronto, 6-11 July 2008, 1612-1616. <https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595260>
- [2] Grover, P. and Sahai, A. (2010) Shannon Meets Tesla: Wireless Information and Power Transfer. *2010 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, Austin, 13-18 June 2010, 2363-2367. <https://doi.org/10.1109/ISIT.2010.5513714>
- [3] 王洋. 磁耦合谐振式无线电能与信息同步传输技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 孙跃, 夏晨阳, 戴欣, 苏玉刚. 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[J]. *中国电机工程学报*, 2010(33): 44-50.
- [5] Zhou, X., Zhang, R. and Ho, C.K. (2012) Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, 3-7 December 2012, 3982-3987. <https://doi.org/10.1109/glocom.2012.6503739>
- [6] 冯嫚. 高效调制的关键问题研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2008.
- [7] 王继武. 基于冲击滤波的 EBPSK 解调器设计、优化与应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2012.

- [8] 武瑛. 新型无接触供电系统的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2004.
- [9] 郑祖翔. 基于 AMPSK 调制的无线携能通信技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjwc@hanspub.org