

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106687

一种低频低噪声前置放大器的设计*

刘宝衡 付天晖 侯文达

(海军工程大学 武汉 430033)

摘要: 针对甚低频、超低频通信中存在的微弱信号难以检测问题,设计了一种低频低噪声前置放大器。首先建立了放大器噪声模型并对噪声特性、噪声匹配进行分析,然后详细阐述了低噪声放大器电路中晶体管的选择、直流工作点的设置、负反馈网络的设置、阻容元件的选择、输入阻抗匹配等设计要点,并提出一种多层屏蔽设计方法。通过仿真对低噪声放大器电路进行测试与分析,结果表明在1 kHz~1 MHz下电压增益可达38 dB,1 kHz时等效输入噪声为 $0.99 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,噪声系数达到0.73 dB,噪声性能大大提高,且信号失真较小,满足了低噪声放大器噪声系数小、增益大、输入端良好匹配的性能设计要求,可以实现甚低频、超低频远距离通信中对微弱信号的有效接收。

关键词: 低噪声放大器;低频;噪声特性;电磁屏蔽;噪声匹配

中图分类号: TN722.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of a low noise preamplifier for low frequency

Liu Baoheng Fu Tianhui Hou Wenda

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to solve the problem that weak signal is difficult to detect in very low frequency and ultra-low frequency communication, a low noise preamplifier for low frequency is designed. Firstly, the noise model of amplifier is established and the noise sources and noise matching are analyzed, then the design points of the low noise amplifier circuit are described in detail, and a multi-layer shielding design method is proposed. Through simulation and experimental measurement, it is concluded that at 1 kHz~1 MHz, the voltage gain can reach 38 dB, at 1 kHz, the equivalent input noise is $0.99 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, the noise coefficient reaches 0.76 dB. The noise performance is greatly improved, it can meet the performance design requirements of low noise amplifier and can realize the effective reception of weak signal in VLF and VLF long-distance communication.

Keywords: LNA; low frequency; noise characteristic; electromagnetic shielding; noise matching

0 引言

甚低频、超低频无线电信号具有在海水、大地介质中传播损耗小、信号稳定等特点,广泛应用于对潜通信、透地通信、地质勘探、地震研究等方面。当收发端距离较大时,信号会变得非常微弱,不仅幅度很小,且很容易被噪声所淹没,因此低噪声放大器在微弱信号检测中发挥着重要的作用^[1-3]。

国内外学者在不同应用领域都对低噪声放大器进行了研究与设计。文献[4]提出了一种三元件噪声匹配网络方案,设计的低噪声前置放大器噪声系数仅为0.43 dB;文献[5]提出一种应用于感应式传感器的低噪声斩波前置放大器,拓宽了响应频带,等效输入电压噪声仅为 $3.75 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$;

文献[6]提出能有效抑制低频噪声、共模干扰的前置放大器,其具有稳定的放大倍数、高输入阻抗和高共模抑制比。而当前对低噪声放大器的研究主要集中在高频领域,低频研究较少且难度较大。

本文为了解决低频微弱信号难以检测的问题,基于超低噪声超 β 晶体管,设计了一种结构简单、易于实现的低频低噪声放大器。

1 放大器噪声分析

1.1 放大器噪声来源

放大电路中,信号会受到外部噪声和固有噪声影响。外部噪声是放大电路外部相邻电路相互干扰引起的干扰噪声,又称为耦合噪声;固有噪声是电路器件本身的噪声,是

收稿日期:2021-05-13

* 基金项目:国家自然科学基金(41631072,42074074)项目资助

主要的噪声来源,包括热噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声^[6-8]。热噪声是由导体中自由电子随机热运动引起的,一般由等效热噪声电压 E_t 表示^[9]:

$$E_t = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (1)$$

式中: k 表示玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为开尔文温度; R 为电阻值。由式(1)可知,热噪声只与温度、电阻值有关,其功率谱密度与频率无关,是一种白噪声。散粒噪声是由于电荷载流子独立而随机地流过势垒而引起的^[10],肖特基通过理论研究证明散粒噪声也是白噪声。 $1/f$ 噪声又称低频噪声,是由直流电流流过不连续介质产生的, $1/f$ 噪声随频率减小而增加^[11]。

1.2 放大器噪声模型与噪声特性

对于低频低噪声放大器,通常采用 $E_n - I_n$ 模型,噪声模型如图 1 所示。

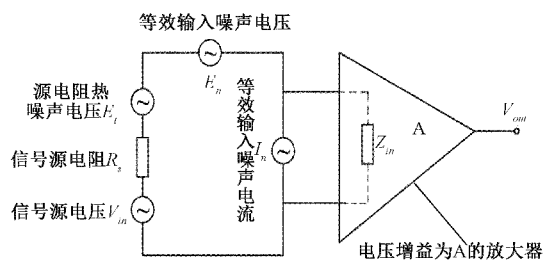


图 1 放大器的 $E_n - I_n$ 噪声模型

$E_n - I_n$ 噪声模型将内部噪声源等效为输入端的噪声电压源 E_n 和噪声电流源 I_n ,通过分析 E_n 和 I_n ,可以表征电路的噪声性能,有利于简化噪声分析和优化电路设计^[12]。

低噪声放大器的噪声分布曲线如图 2 所示。当总噪声值由最小值上升 3 dB 时对应的频率为 $1/f$ 噪声转角频率^[13]。在低频应用中存在较大的 $1/f$ 噪声和较小的白噪声,因此要尽量减小转角频率,使其低于工作频率,从而有效降低 $1/f$ 噪声。

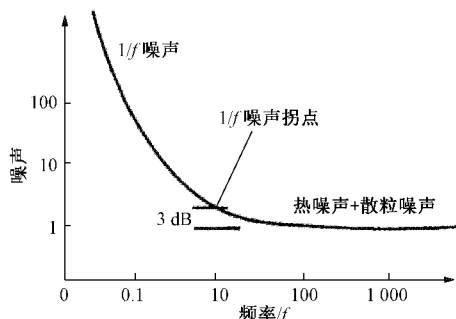


图 2 噪声分布曲线

1.3 放大器噪声匹配

E_n 与 I_n 之比称为放大器的噪声源阻抗,当噪声源阻抗与天线输入端的输入阻抗相等时,可以实现放大器的噪声匹配,此时噪声系数最小^[14]。噪声匹配一般有变压器匹

配和多个放大器并联两种方式。低频段匹配时,变压器匝数多、体积大,会导致信号功率损耗且影响频率特性,并且放大器输入阻抗远大于天线阻抗,因此采用多个放大器并联更合适^[15]。多个放大器并联有管级并联和子电路并联两种,管级并联方式电路结构简单但各晶体管相互影响大,不利于长期稳定工作,而后者相互影响小,性能可控性好,但元件较多,体积较大。综合考虑,本文采用子电路并联的方式实现放大器的噪声匹配。

2 电路设计

2.1 低噪声放大器电路设计

低频低噪声放大器整体设计与子电路设计分别如图 3、4 所示。下面将详细阐述放大器子电路的设计要点。

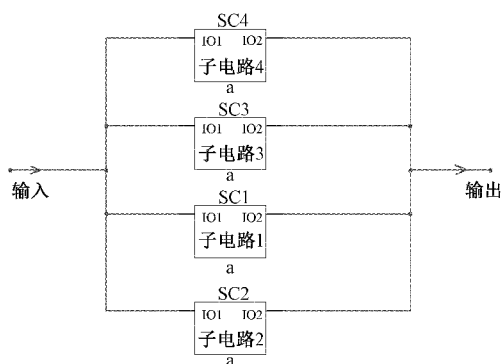


图 3 放大器整体设计

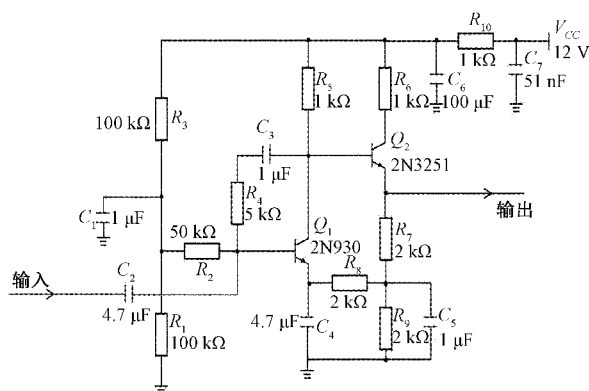


图 4 放大器子电路设计

1) 双极型晶体管热噪声电压小,适用于源电阻较小情况,并且超低噪声超 β 晶体管能够有效减小散粒噪声和 $1/f$ 噪声^[16]。与共基极电路、共集电极电路相比,共发射极电路有更高的功率增益,可以大大减小噪声影响。因此,选择超低噪声超 β 晶体管 2N930 与 2N3251 并采用共发射极级联结构。

2) R_1 、 R_2 、 R_3 、 C_2 组成了基极偏置电路,其中 R_2 控制基极偏置电流。当基极偏置电流减小时,可有效降低低频低噪声放大器的噪声系数,通常需要将基极偏置电流控制在 $5 \mu\text{A}$ 以下。由放大器直流通路可得:

$$V_1 = R_5 \cdot I_{c1} + V_{ce1} + R_8 \cdot I_{e1} + R_9(I_{e1} + I_{e2})$$

$$V_1 = R_6 \cdot I_{c2} + V_{ce2} + R_7 \cdot I_{e2} + R_9(I_{e1} + I_{e2}) \quad (2)$$

$$I_{c1} \approx I_{e1} = \beta_1 \cdot I_{b1}, I_{c2} \approx I_{e2} = \beta_2 \cdot I_{b2}$$

已知晶体管参数 $\beta_1 = 254, \beta_2 = 159$, 满足上述方程的解不唯一, 取合适参数如下: $V_1 = 10 \text{ V}, V_{ce1} = V_{ce2} = 3 \text{ V}, I_{b1} = I_{b2} = 5 \mu\text{A}, R_5 = R_6 = 1 \text{ k}\Omega, R_7 = R_8 = R_9 = 2 \text{ k}\Omega$, 此时计算得到基极偏置电流约为 $4 \mu\text{A}$, 参数选择合理, 满足噪声系数的要求。

3) 当温度或电源电压变化时, 晶体管对变化十分敏感, 静态工作点将发生波动, 并且放大器各级工作点相互影响, 前级的零点漂移逐级放大, 使后级放大电路进入饱和或截止状态, 严重影响放大器正常工作^[17]。因此, R_7, R_8, R_9 组成直流负反馈网络, 稳定放大器的静态直流工作点, 减小各级工作点的相互影响。

4) 在阻容元件选择方面, R_1 等电阻选用金属膜电阻, C_1 等电容选用漏电阻较大的钽电容。这样不仅可以有效降低噪声, 且有利于直流工作点的稳定。

5) 低噪声放大器设计的最重要指标是噪声性能, 降低放大器噪声, 提高噪声性能最有效的方式是减小输入阻抗, 实现噪声匹配。但由于基极偏置电流约为 $4 \mu\text{A}$, 放大器输入阻抗很高, 远大于天线输入端的输入阻抗(约为 50Ω), 很难做到噪声匹配, 为此设计了由 C_3, R_4 组成的交流负反馈网络, 其将 Q_1 集电极输出电压反馈到基极, 从而降低了输入阻抗。通过设置 C_3, R_4 参数, 放大器子电路的输入阻抗约为 200Ω , 然后将 4 个相同子电路并联即可实现阻抗匹配。

2.2 屏蔽设计

低频干扰极易穿透屏蔽材料耦合进放大器中, 降低放大器灵敏度, 并且低频低噪声放大器对噪声指标要求很高, 因此设计合理的屏蔽结构是至关重要的。

屏蔽分为静电屏蔽、电磁屏蔽和磁场屏蔽。低频电磁波的能量大部分是磁场能量, 故主要考虑磁场屏蔽。磁场屏蔽是在干扰源与信号线之间设置磁性体, 将磁路短接, 减弱互感耦合程度, 从而消除或抑制低频噪声与被干扰回路的磁耦合^[18]。

在设计屏蔽结构时, 首先选择合适的屏蔽材料。本文采用高磁导率、低电阻率和饱和磁化强度的坡莫合金, 利用其低磁阻特点使磁力线封闭在屏蔽体内, 外磁场的磁感应线不易进入空腔, 从而起到磁屏蔽的作用。在屏蔽盒设计方面, 我们选用双层长方体结构, 屏蔽盒的角都做成圆角, 防止磁通的泄露, 并且在结合面加入导电衬垫, 在接缝处充入导电材料, 保证整个屏蔽体表面的导电连续。磁场很强时, 仅用单层屏蔽无法达到屏蔽效果, 而增加屏蔽体的厚度会加大重量和成本, 因此设计了多层屏蔽结构。考虑到各屏蔽层之间应保留空隙并且要做好屏蔽体密封不完整性的防护, 选用 6 层屏蔽盒, 材料包括铁、铜、坡莫合金等。多层屏蔽体结构示意图如图 5 所示。

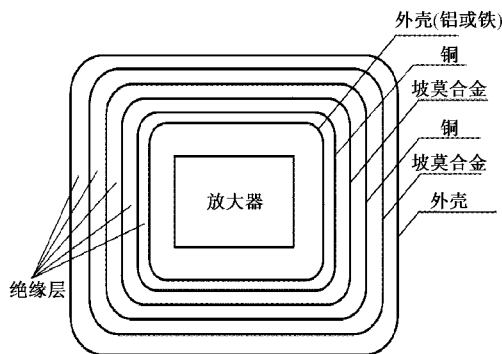


图 5 多层屏蔽体结构示意图

3 电路的测试与分析

对设计的放大电路进行仿真分析, 主要从频域分析、时域分析、噪声分析、热稳定性分析等方面来评价其性能的优劣。

3.1 增益与频率特性测试

在常温下, 扫频范围设置为 $1 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$, 频率特性曲线如图 6 所示。由图可知, 低频低噪声放大器电压增益为 38 dB , -3 dB 点大于 1 MHz , 且增益平坦度良好, 低噪声放大器产生的幅度失真会比较小, 满足设计要求。

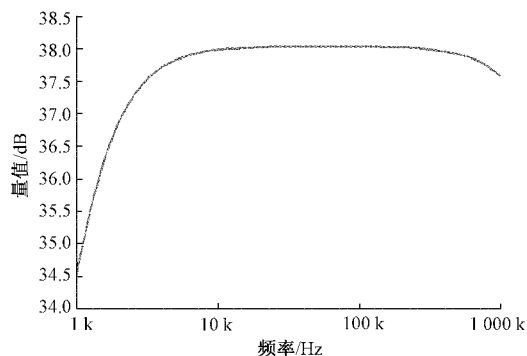


图 6 频率特性曲线

3.2 信号失真测试

调整输入信号的交流分量, 可以分析出放大器的最小不失真输出电压为 50 nV , 最大不失真输出电压为 10 mV , 因此放大器正常工作的电压范围为 $50 \text{ nV} \sim 10 \text{ mV}$ 。当输入信号为电压 1 mV , 频率 5 kHz 的正弦信号时, 输入、输出信号波形如图 7 所示。仿真结果表明, 输出信号与输入信号的波形相同, 信号几乎没有发生失真。

3.3 噪声分析

噪声性能表征方法主要有等效输入噪声和噪声系数两种^[19]。

对该电路进行噪声测试, 得到低噪声放大器的噪声功率谱密度, 如图 8 所示。由图可知, 低噪声放大器在 1 kHz 的等效输入噪声仅为 $0.99 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 在 10 kHz 的等效输入噪声为 $0.96 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

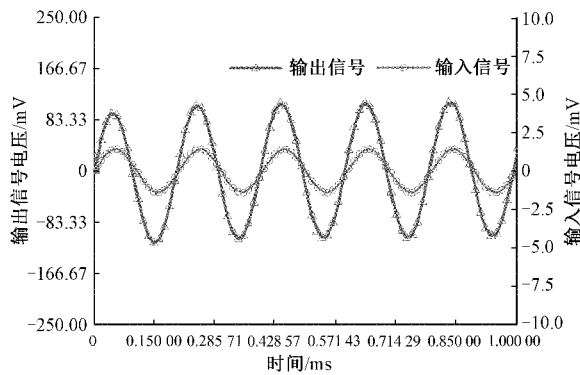


图 7 输入、输出信号波形

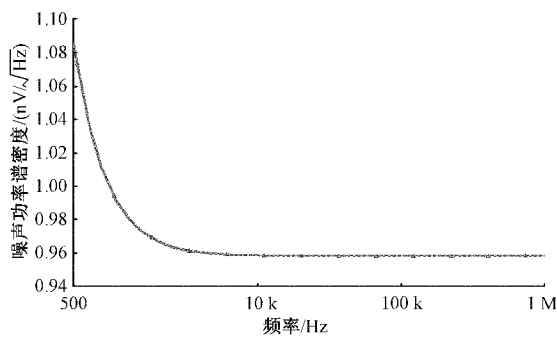


图 8 等效输入噪声曲线

噪声系数是单位带宽内总的有效输出噪声功率 N_o 与输入端源电阻热噪声产生的噪声功率 N_{i0} 之比^[20], 即:

$$F = \frac{N_o}{N_{i0}} \quad (3)$$

通常以 dB 为单位, 噪声系数可表示为:

$$NF = 10\lg \frac{N_o}{N_{i0}} = 10\lg \frac{E_m^2}{E_i^2} = 10\lg \frac{E_m^2}{4kTR} = 20\lg \frac{E_m}{\sqrt{4kTR}} \quad (4)$$

式中: E_m 为单位频率下的等效输入噪声; k 表示玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 取室温 300 K; R 取 50Ω 。在 1 kHz 时, 等效输入噪声为 $0.99 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 噪声系数为 0.73 dB; 在 10 kHz 时, 等效输入噪声为 $0.96 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 噪声系数为 0.46 dB。表 1 为几种典型的低噪声放大器在 1 kHz 时的等效输入噪声与噪声系数, 由此可知, 设计的低噪声放大器噪声性能远远优于市场上常见的低噪声放大器。

3.4 热稳定性分析

分别设置 -50°C , 25°C , 75°C 3 个温度, 仿真分析低噪声放大器的热稳定性。

不同温度下的频响曲线如图 9 所示, 可知随着温度降低, 增益逐渐增大, 但带宽相对稳定。

不同温度下的输入噪声特性如图 10 所示。由图可知, 温度变化对等效输入噪声影响很小, 具有较好的热稳定性。

表 1 典型的低频低噪声放大器

低噪低频放大器	等效输入噪声/ ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)	噪声系数/ dB
JPA2320-Q1	8.5	19.41
OPA2277	8.0	18.88
OP-37	3.0	10.36
ICL7650	1.7	5.43
ADA4898-1	1.2	2.40

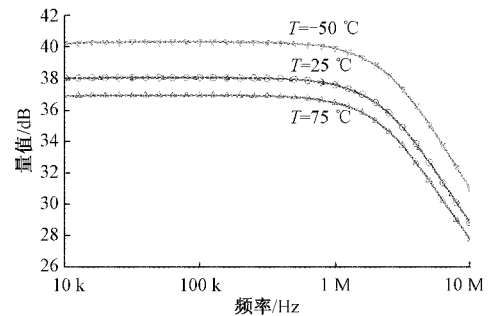


图 9 不同温度下的频响曲线

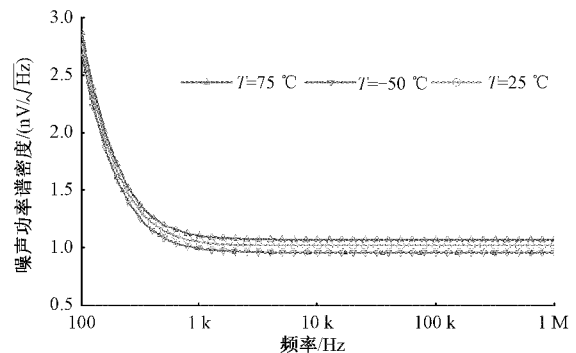


图 10 不同温度下的输入噪声特性曲线

4 结 论

本文综合考虑了晶体管的选择、直流工作点的设置、负反馈网络的设置、输入阻抗匹配等方面, 设计了一种结构简单、易于实现的低频低噪声放大器电路, 并提出一种多层屏蔽结构。该电路在 1 kHz~1 MHz 下电压增益可达 38 dB, 增益平坦度良好, 幅度失真较小, 且噪声参数明显优于常用的商用放大器, 具有良好的噪声特性。可以实现对低频信号的低噪声放大功能, 达到了设计要求。

参考文献

- [1] 张孟文, 金玉丰. 用于甚低频无线通信的一种低噪声放大器设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(1): 46-51.
- [2] JAFARINEJAD R, JANNESARI A, SOBHI J. Pre-distortion technique to improve linearity of low noise amplifier[J]. Microelectronics Journal, 2017, 61(10): 95-105.

- [3] 项盛荣,樊欣欣,严红梅. 基于低频低噪声检测放大器的设计与分析[J]. 微电子学, 2019, 42(2): 383-386.
- [4] 曹学明, 俎栋林, 赵旭娜, 等. MRI 低噪声前置放大器设计研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(8): 1101-1105.
- [5] 邱贺, 段永红. 用于感应式磁传感器低噪声前置放大器的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2015(1): 22-24.
- [6] 王立伟, 蔡奇, 肖尧, 等. 生物肌电信号前置放大电路设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(4): 53-55.
- [7] 胡志峰. 应用于低频微弱信号检测的前置放大电路设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [8] YAGHOUTI B D, YAVANDHASANI J. A high linearity low power low-noise amplifier designed for ultra-wide-band receivers [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2021(3): 1-12.
- [9] 陈晓娟, 樊欣欣, 吴洁. 低频低噪声测量放大器的设计[J]. 现代电子技术, 2016, 39(10): 116-119.
- [10] 王纯一, 徐畅, 张剖. 磁轴承功率放大器空间矢量脉宽调制算法的占空比限制策略[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 248-256.
- [11] 樊容. 低噪声电子听诊器的设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(24): 130-133.
- [12] 黄斌, 赵玉胜, 崔学林, 等. 天气雷达低噪声放大器的仿真设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(3): 93-96.
- [13] TARIGHAT A P, YARGHOLI M. Wideband input matching CMOS low-noise amplifier with noise and distortion cancellation [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2020, 29(4), DOI: 10.1142/S0218126620500590.
- [14] 刘松, 吴先梅, 孔超. 一种具有高动态范围的前置放大电路设计及实现[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 114-121.
- [15] 蒋宇中, 陈传克, 张曙霞, 等. 甚低频低噪声放大器的设计与测量[J]. 电子器件, 2015, 38(4): 769-773.
- [16] 胡志峰, 肖剑波. 低噪声前置放大电路设计[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(11): 1381-1384.
- [17] 李一帆, 郭树旭, 邵峰利. 用于检测 $1/f$ 电噪声的低噪声放大器设计与仿真[J]. 现代电子技术, 2015, 38(4): 80-86.
- [18] 王冰, 蒋磊, 宋福明, 等. 30 kA 闭环式集成霍尔电流传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 188-193.
- [19] 刘丹丹, 马铭磷, 蔡兴龙. 基于三谐振网络的超宽带低噪声放大器[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(11): 71-77, 84.
- [20] 许准, 周蓓, 马志强, 等. X 波段高性能低噪声放大器的设计与实现[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(11): 73-76, 80.

作者简介

刘宝衡, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信、透地通信等。

E-mail: 1094480943@qq.com

付天晖, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信等。

E-mail: 1901571166@qq.com

侯文达, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信等。

E-mail: 729980034@qq.com