

## 2.4 GHz Zigbee 数传模块传输距离的估算方法

郭宏福<sup>1</sup>, 白丽娜<sup>2</sup>, 郭志华<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 采用 802.15.4a 信道损耗模型, 探讨了 2.4 GHz Zigbee 射频模块辐射传输损耗的分析方法, 分析了影响传输距离的因素, 推导了最大传输距离的估算公式. 针对设计的 Zigbee 射频模块具体电路, 对传输损耗和最大传输距离进行了分析计算, 并作了实验测试, 估算误差小于 10%, 符合工程应用要求, 可作为 2.4 GHz Zigbee 射频数传模块的设计和工程应用传输距离估算的理论依据.

**关键词:** Zigbee; 传输距离; 估算方法; 信道

**中图分类号:** TN011      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-2400(2009)04-0691-05

### Estimation method for the transmission distance for the 2.4 GHz Zigbee application

GUO Hong-fu<sup>1</sup>, BAI Li-na<sup>2</sup>, GUO Zhi-hua<sup>1</sup>

(1. School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** It is a troublesome matter for a Zigbee designer that using the general wireless channel model to estimate transmission distance results in larger errors. By the 802.15.4a channel model, the analytical methods of 2.4 GHz Zigbee RF module radiation transmission loss is discussed; the factors that affect the transmission distance are analyzed, and the estimation formula for the maximum transmission distance is derived. For the Zigbee RF module specific circuit designed, the transmission loss and the largest transmission distance are calculated and through the experimental test, the estimated error is less than 10%, which is in line with the requirements of engineering applications, and it can be used as the theoretical basis for 2.4 GHz Zigbee RF module design and engineering applications to estimate the transmission distance.

**Key Words:** zigbee; transmission distance; estimation; communication channels

2.4 GHz 频段 Zigbee 无线传输技术在家庭、建筑及工业自动化中已广泛应用. 这种以低成本、低功耗、低数据传输速率、低复杂度为显著优点的短距离无线通信协议, 满足了小型、低成本的固定、便携或移动设备无线联网的要求. 随着短距离无线设备应用的不断普及, 现有的无线通信信道损耗估算模型由于频率范围限制不能直接应用, 对 Zigbee 技术应用设计人员来说, 如何分析与估算设计的 Zigbee 射频模块或电路可传输的距离是很麻烦的事情.

笔者在电波传播理论的基础上, 具体讨论了 2.4 GHz 频段的电波传播特性, 并根据自己开发的 2.4 GHz Zigbee 数传模块的具体模型, 分析了影响传输距离的电路因素和传输路径的因素, 参考 IEEE 802.15.4a 信道损耗模型, 推导了最大传输距离的估算公式, 并对开阔传播环境下 Zigbee 短距离无线设备的路径损耗和传输距离进行实际估算和验证测试. 结果说明这些计算方法可以让系统设计人员对 2.4 GHz Zigbee 应用中

收稿日期: 2008-12-18

基金项目: 西安市创新支撑计划-工业应用技术研发项目资助(CXY08016(1))

作者简介: 郭宏福(1964-), 男, 副教授, E-mail: hfguo@xidian.edu.cn.

传输距离有较精确的估算.

## 1 影响传播的因素与传输距离的计算

对一个典型通信系统它的基本构成如图 1 所示.

发射机将电波信号经过发射天线发送出去,经大气传输后到达接收天线,接收机将信号接收后进行处理.若已知发射机的发射功率  $P_t$ ,发射机和接收机的距离为  $d$ ,接收机的功率为  $P_r$ ,收发天线的增益为  $G_t$ (有效面积  $A_t$ ), $G_r$ (有效面积  $A_r$ ),大气衰减系数  $\chi$ ,根据天线理论,天线的有效面积与天线增益的关系为  $G = 4\pi A/\lambda^2$ .

并有  $P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} A_r \exp(-\chi d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \exp(-\chi d) =$

$$\frac{P_t A_t A_r}{d^2 \lambda^2} \exp(-\chi d) \quad (1)$$

若已知接收机的灵敏度  $P_{rs}$ ,可发射的最大距离为  $d_{\max}$ ,则有最大通信距离方程为

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d_{\max})^2} \exp(-\chi d_{\max}) = \frac{P_t A_t A_r}{d_{\max}^2 \lambda^2} \exp(-\chi d_{\max}) \quad (2)$$

若忽略大气传输衰减因素,则有

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d_{\max})^2} = \frac{P_t A_t A_r}{d_{\max}^2 \lambda^2} \quad \text{或} \quad d_{\max} = \left( \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{rs}} \right)^{1/2} = \left( \frac{P_t A_t A_r}{\lambda^2 P_{rs}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

但是实际系统中,发射机的主机功率和接收机主机的接收灵敏度已知,这些值不能直接代入上述公式计算最大传输距离,必须考虑到从发射机开始发射端传输线、接头、天线等的传输衰减,大气传输的衰减,从接收天线开始的接头、传输线、接收机前端的保护网络等系统传输衰减.同时电磁波在传播介质中不可能以理想的条件传输,传输的距离比理论计算要小许多.

实际传播中介质对电波传播性能的影响有:(1)电波在大气层传播时的衰减;(2)由大气层引起的电波折射;(3)地面(海面)反射波与直接波的干涉效应;(4)天线极化一致性.所以工程应用中对上述计算校正,加入实际影响的传输损耗衰减因子,其大小主要由上述几种因素决定<sup>[1-2]</sup>.

对大气传输衰减在 3 GHz 以下,衰减因子小于 0.01 dB/km,所以在 Zigbee 短距离数传模块的最大传输距离的计算中可以忽略大气传输衰减因素. Zigbee 属于地面电波视距短距离传播环境,折射与干涉效应可以忽略,但地物反射特性和天线方向特性是较难处理的问题.

通信传播环境的复杂性和多变性,要对接收信号的中值进行准确计算是相当困难的,无线通信工程上的做法是,在大量场强测试的基础上,经过对数据的分析与统计处理,找出各种地形地物下的传播损耗(或接收信号场强)与距离、频率以及天线高度的关系,给出传播特性的各种图表和计算公式,或者通过大量的仿真与试验结合,建立传播预测模型<sup>[3-4]</sup>,从用较简单的方法预测接收信号的中值.在移动通信领域,已建立了许多场强预测模型,它们是根据在各种地形地物环境中场强实测数据总结出来的,各有特点,能用于不同的场合.主要有 Okumura-Hata, COST231-Hata, Lee, Walfish & Bertoni, COST Walfish-Ikegami 等模型<sup>[5-6]</sup>,但他们均在 2 GHz 以下的频段适应,对 2.4 GHz Zigbee 传输距离估算并不实用.

这里参考适应于 2~8 GHz 的 IEEE 802.15.4a 信道损耗模型,讨论分析 2.4 GHz Zigbee 传输距离估算方法,加入传输损耗衰减修正因子,引入式(3)估算实际最大的传输距离.

## 2 IEEE 802.15.4a 信道损耗模型

IEEE 组织根据 802.15.4a<sup>[7]</sup>信道的特点,在实际环境中进行了实际测量,构建了基于 802.15.4a 信道、适于 UWB (2~10 GHz),100~1 000 MHz 的信道传输损耗模型,其基本模型信道损耗计算公式为

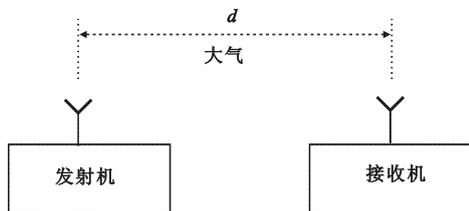


图 1 典型通信系统

$$P_r = P_t A_{\text{ant}} G_t G_r P_{L_0} \frac{s}{(d/d_0)^n} \frac{1}{(f/f_c)^2 (k+1)}, \quad (4)$$

其中  $P_t$  为发射机发射功率, 发射机和接收机的距离为  $d$ , 接收机的功率为  $P_r$ , 收发天线的增益为  $G_t, G_r, A_{\text{ant}}$  为天线衰减因子,  $s$  为损耗计算的标准方差,  $n$  为距离损耗修正系数,  $k$  为考虑频率影响修正系数,  $d_0$  为参考距离等于 1 m,  $f_c$  为参考中心频率等于 5 GHz (UWB 2~10 GHz 频段),  $P_{L_0}$  为在参考距离下的损耗大小. 与自由空间传输方程相比考虑了天线收发耦合损耗、反射折射引起的传输损耗与距离频率的变化系数.

对式(4)采用对数表示为

$$P_r = P_t + A_{\text{ant}} + G_t + G_r + P_{L_0} + s - 10n \log(d) - 20(k+1) \log(f/5), \quad (5)$$

其中  $d$  单位为 m,  $f$  单位为 GHz.

最大距离方程为

$$d_{\text{max}} = 10^{\frac{1}{10n} [P_t - P_{rs} + A_{\text{ant}} + G_t + G_r + P_{L_0} + s - 20(k+1) \log(f/5)]}, \quad (6)$$

同时 IEEE802. 15. 4a 信道模型还给出了各种传输环境下各种修正因子的测量值, 见表 1.

表 1 IEEE802. 15. 4a 信道模型修正因子的测量值

	修正因子	$P_{L_0}$ /dB	$n$	$k$	$s$ /dB	$A_{\text{ant}}$ /dB
住宅环境	视距传输 LOS	-43.9	1.79	1.12±0.12	-2.22	-3
	非视距传输 NLOS	-48.7	4.58	1.53±0.32	-3.51	-3
	备注	距离/m:7~20, 频率可达/GHz:10				
户内办公环境	修正因子	$P_{L_0}$ /dB	$n$	$k$	$s$ /dB	$A_{\text{ant}}$ /dB
	视距传输 LOS	-36.6	1.63	-3.5	-1.9	-3
	非视距传输 NLOS	-51.4	3.07	5.3	-3.9	-3
	备注	距离/m:3~28, 频率可达/GHz:2~8				
户外环境	修正因子	$P_{L_0}$ /dB	$n$	$k$	$s$ /dB	$A_{\text{ant}}$ /dB
	视距传输 LOS	-43.29	1.76	-1.6	-0.83	-3
	非视距传输 NLOS	-43.29	2.50	0.4	-2.00	-3
	备注	距离/m:5~17, 频率可达/GHz:3~6				
户外开阔环境	修正因子	$P_{L_0}$ /dB	$n$	$k$	$s$ /dB	$A_{\text{ant}}$ /dB
	视距传输 LOS					
	非视距传输 NLOS	-48.96	1.58		-3.96	-3
	备注	开阔环境				
工业环境	修正因子	$P_{L_0}$ /dB	$n$	$k$	$s$ /dB	$A_{\text{ant}}$ /dB
	视距传输 LOS	56.7	1.20	-5.60	-6	-3
	非视距传输 NLOS	56.7	2.15	-7.82	-6	-3
	备注	距离/m:2~8				

### 3 Zigbee 设计中传输距离的影响因素与估算方法

对 Zigbee 通信系统, 它具有典型的无线通信系统的结构, 以 CC2430 为例构成 Zigbee 的一个典型传输模型来说明 Zigbee 通信系统中影响传输距离的电路因素和传输环境因素, 如图 2 所示.

图 2 中 CC2430 是 Zigbee 收发系统的核心, 设计中 CC2430 的功率参数已知<sup>[8]</sup>, 但计算最大收发距离不能直接使用这些参数, 最大距离计算公式中  $P_t$  和  $P_{rs}$  是收发系统与天线接口处的功率值.

对发送端, 从 CC2430 输出端到发射天线经过了微波收发网络、开关、PA、滤波器、收发开关、发射天线. 所以计算辐射距离时必须考虑这部分电路的传输损耗, 涉及到收发网络失配损耗  $S_{O_1}$ 、开关损耗  $S_{O_2}$ 、功放 (PA) 增益  $A_{O_1}$ 、滤波器损耗  $S_{O_3}$ 、收发开关损耗  $S_{O_4}$ .

所以最大距离计算公式中  $P_t$  的功率值  $P_t = P_{2430} - S_{O_1} - S_{O_2} - S_{O_3} - S_{O_4} + A_{O_1}$ .

对接收端, 从天线到 CC2430 输入端信号经过了发射天线、开关、滤波器、LNA、收发开关、微波收发网络. 所以计算辐射距离时所要的  $P_{rs}$  必须考虑这些电路的传输损耗, 涉及到收发网络失配损耗  $S_{I_1}$ 、开关损耗

$S_{i_2}$ 、低噪放(LNA)增益  $A_{i_1}$ 、滤波器损耗  $S_{i_3}$ 、收发开关损耗  $S_{i_4}$ 。

设  $P_{rs2430}$  为 CC2430 的灵敏度,当经过一定的传输距离  $d$  后,到达 CC2430 接收端功率值为  $P_{r2430}$ ; 当  $P_{r2430} = P_{rs2430}$  时有最大的传输距离。

这时表现在接收天线处的接收灵敏度为  $P_{rs} = P_{rs2430} + S_{i_1} + S_{i_2} + S_{i_3} + S_{i_4} - A_{i_1}$ 。

最大的传输距离为

$$d_{max} = 10^{\frac{1}{10n} [P_t - P_{rs} + A_{ant} + G_t + G_r + P_{L_0} + s - 20(k+1)\log(f/5)]} \quad (7)$$

对 2.4 GHz( $\lambda=0.125$  m)C2430 的基本参数为<sup>[8]</sup>:  $P_{t2430} = 0$  dBm; 接收机灵敏度  $P_{rs2430} = -92$  dBm,考虑实际电路和传输线路状况,有如下几方面的衰耗:微波开关损耗为 0.1~0.5 dB(2.4 GHz); 微波滤波器损耗为 0.2~2.0 dB(2.4 GHz); 微波收发网络失配损耗为 1~2 dB(2.4 GHz); 微波接口损耗为 0.2~1.0 dB(2.4 GHz); 微波 PA 增益为  $A_{O_1}$ ; 微波 LNB 增益为  $A_{i_1}$ 。

对上述网络结构:若 PA 的功率增益为  $A_{O_1} = 18$  dB,LNA 的功率增益为  $A_{i_1} = 6$  dB,CC2430 最大的发射功率为  $P_{t2430} = 0$  dBm,发射信号经过两个开关,一个发射滤波器,一个 PA 放大器,一个天线接口,送到发送端功率为  $P_t = 12$  dBm。

接收端经过天线,两个开关,滤波网络,一个 LNA 放大器到达 CC2430 的接收端。

接收端的损耗为  $S_r = S_{i_1} + S_{i_2} + S_{i_3} + S_{i_4} - A_{i_1} = 0$  dBm。

CC2430 的接收灵敏度为  $-92$  dBm,所以  $P_{rs} = P_{rs2430} + S_r = -92$  dBm。

对  $f=2.4$  GHz,假设收发天线的增益均为单位增益( $G_t = G_r = 0$  dB),传输环境为户外开阔环境,参考 IEEE 802.15.4a 信道损耗模型,这时  $n=1.58, k=0, s=-3.96, A_{ant} = -3$  dB,  $P_{L_0} = -48.96$  dB,上述通信模块之间可以通信的最大距离为

$$d_{max} = 10^{\frac{1}{10n} [P_t - P_{rs} + A_{ant} + G_t + G_r + P_{L_0} + s - 20(k+1)\log(f/5)]} = 2952.93 \text{ m} \quad (8)$$

在实际的设计工作中尽量选择损耗较小的元器件,以提高传输效率,同时在传输路径规划上,尽量保持收发端的直视以及避开面积较大的建筑物以保证传输接近理想。

### 4 实验测试与结果分析

基于 CC2430 芯片,设计有两种 Zigbee 模块,一种是没有 PA 和 LNA 的小功率数传模块(见图 3); 一种是有 PA 和 LNA 的大功率数传模块。模块使用具有 1.8 dB 增益天线,利用上节的分析方法进行计算,表 2 和表 3 给出了两种模块的器件参数和估算距离。实际传输环境设为户外开阔地形,传输损耗修正因子参考 IEEE 802.15.4a 信道损耗模型参数表查出。

表 2 小功率数传模块的器件参数和估算距离

发送回路器件名称	损耗增益/dB	$P_t$ /dBm	接收回路器件名称	损耗增益/dB	$P_{rs}$ /dBm
CC2430 $P_{out}$	0.0	-2	CC2430 $P_{rsin}$	-82.0	-80
发射天线 $G_t$	1.8		接收天线 $G_r$	1.8	
收发网络	1.0		收发网络	1.0	
布线与接口损耗	1.0		布线与接口损耗	1.0	
修正因子模型参数	$n = 1.58, k = 0, s = -3.96, A_{ant} = -3 \text{ dB}, P_{L_0} = -48.96 \text{ dB}$				
$d_{max}/\text{m}$	106.77				

注:实测中通信保证正常的 CC2430 最小可接收信号电平。 $P_{out}$  和  $P_{rsin}$  单位为 dBm。

根据上述计算结果,对设计的两个基于 CC2430 的 Zigbee 模块的最大传输距离进行了实际测试,环境为室外开阔地方,传输线路中间没有遮挡,同时收发天线方向一致,天线高度约为 3m。表 4 给出了没有 LNA 和 PA 的 Zigbee 模块测量数据,表 5 给出了带有 LNA 和 PA 的 Zigbee 模块测量数据。

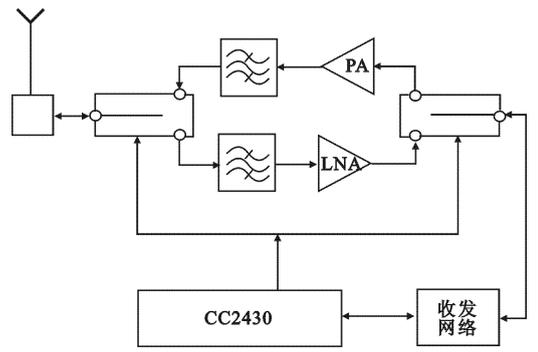


图 2 基于 C2430 的 ZigBee 的典型传输模型



图 3 小功率数传模块

表 3 大功率数传模块的器件参数和估算距离

发送回路器件名称	CC2430 $P_{out}$	收发开关	滤波器	PA RMPA2455	发射天线 $G_r$	收发网络	布线损耗
损耗增益/dB	0.0	1.0	2.0	27.0	1.8	2.0	1.0
$P_r$ /dBm	20						
接收回路器件名称	CC2430 $P_{rs}$	接收天线 $G_r$	滤波器	LNA HMC286	收发开关	收发网络	布线损耗
损耗增益/dB	-82.0	1.8	2.0	16.0	1.0	2.0	1.0
$P_{rs}$ /dBm	-91						
修正因子模型参数	$n = 1.58, k = 0, s = -3.96, A_{ant} = -3 \text{ dB}, P_{L_0} = -48.96 \text{ dB}$						
$d_{max}$ /m	6 318.77						

注: 实测中天线外接, 接口和引线多引入 5 dB 的损耗.  $P_{out}$  和  $P_{rsin}$  单位为 dBm.

表 4 给出了没有 LNA 和 PA 的 Zigbee 大功率模块测量数据

测试次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
估算距离/m	106.77	106.77	106.77	106.77
测试距离/m	101.00	105.00	110.00	105.33
误差/m	5.77	1.77	3.23	1.44
误差/%	5.40	1.66	3.03	1.35

表 5 给出了带有 LNA 和 PA 的 Zigbee 小功率模块测量数据

测试次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
估算距离/m	6 318.77	6 318.77	6 318.77	6 318.77
测试距离/m	5 950.00	6 020.00	5 900.00	5 956.67
误差/m	368.77	298.77	418.77	362.10
误差/%	5.84	4.73	6.63	5.73

注: 实测中误差为绝对误差值

误差分析: 器件参数为其 Databook 中的参考值, 根据测试仪器的精度其参数误差应该为 0.1 dB, 小功率数传模块整个模块(经过了 8 基本器件)产生的误差最大为 0.8 dB, 产生了 6.3% 的理论计算误差. 大功率数传模块整个模块(经过了 12 基本器件)产生的误差最大为 1.2 dB, 产生了 15.8% 的理论计算误差. 从测试结果看, 在设定的环境条件下计算值与实际测量值的误差在 10% 以内, 没有超出最大误差, 所以这样的距离估算满足工程应用. 所以在无线信道的分析中, 频率固定的情况下, 选择合适的信道模型对最大距离的估算进行实际信道的计算修正, 可以较准确的估算出应用电路的最大传输距离.

在测试中也发现使用单振子天线时, 收发天线的方向夹角对接收信号的强度有较大的影响, 所以误差的另外一个主要来源是收发天线的方向所引起, 这也是在实际应用中计算的最大理论传输距离无法在具体应用中真正达到的原因.

## 5 结束语

根据对 2.4 GHz 频段 Zigbee 的电波传播传输距离分析和计算, 在设计和应用 2.4 GHz 频段 Zigbee 数传模块的工作中, 电路设计应充分考虑发射天线、开关、滤波器、低噪放、功放、收发开关、微波收发网络、PCB 布线等器件和电路产生的损耗. 考虑实际影响传输距离的电路因素和传输路径的因素, 可以参考 IEEE 802.15.4a 信道损耗模型<sup>[8]</sup>, 根据实际收发模块的结构及传输环境, 查出各个传输损耗衰减修正因子, 利用笔者的计算方法可以较准确地估算各种传播环境下短距离无线设备的最大传输距离.

### 参考文献:

- [1] 熊皓. 电磁波传播与空间环境[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 120-129.
- [2] 王一平, 郭宏福. 电磁波-传输辐射传输[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 249-263.