

高速铁路列车风对折射率结构常数的影响^{*}吕恒胜^{1,2} 赵恒凯^{1,2}

(1. 上海大学通信与信息工程学院 上海 200444; 2. 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 200072)

摘 要: 大气湍流在时间和空间上的运动对无线电波有着重要影响。用折射率结构常数描述湍流是目前最主要的方法。本文通过建立折射率结构常数模型,来研究大气湍流对高速铁路的无线通信的影响。通过运用空气动力学基本原理,引入列车风并推导出一种适用于高速铁路下的折射率结构常数模型。该模型输入的主要参数有列车风、温度和湿度。通过理论推导和仿真分析得出了列车风对折射率结构常数的影响主要有列车边界层的厚度、距列车侧壁的距离、列车高度和列车车速。分析模型可以知道,车速、温度、湿度对其影响较大,其次是列车边界层的厚度、距列车侧壁的距离,列车高度。并为研究高速铁路下的电波的传播提供了理论参考。

关键词: 列车风;湍流;折射率结构常数;高速铁路

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 081001

Research on the effects of train wind on the refractive structure constant in the high-speed rail of open-wire

Lv Hengsheng^{1,2} Zhao Hengkai^{1,2}

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Atmospheric turbulence motion has a significant impact on the radio waves in time and space. Described refractive index structure constant turbulence is the most important method. Through the establishment of refractive index structure parameter model is to study the effects of atmospheric turbulence on the wireless communication of high-speed rail. Through the use of wind engineering and the basic principles of aerodynamics and the introduction of the train winds is to deduce one refractive index structure constant model in high-speed rail. The main parameters of the model inputs are trains wind, temperature and humidity. Through theoretical analysis and experimental results verify the train winds refractive index structure constant are mainly train the boundary layer thickness, the distance from the side wall of the train, train and train vehicle height. By analyzing model we can know, speed, temperature and humidity have greater impact, in fact, the next of impact is the thickness of the boundary layer of the train, the distance from the side wall of the train and the train height. And for studying the propagation of radio waves at high speed railway we provides a theoretical reference.

Keywords: radio waves; train wind; turbulence; refractive structure constant; high-speed rail

1 引 言

随着高速铁路的迅猛发展,高速铁路通信技术也越来越受到人们的重视,以无线通信为基础的高速铁路通信技术得到了世界的认可。但是,影响无线通信质量的因素很多,文章主要研究湍流对无线通信的影响。湍流是由大气分子无规则运动而产生。当电波经过湍流时会产生多种效应,如抖动、闪烁、扩展和像点抖动等一系列大气湍流效

应^[1]。严重影响通信质量。因此,研究湍流对无线通信的影响很有必要。为了描述湍流的影响,一般采用折射率结构常数模型来描述湍流的变化。目前,自由空间下湍流折射率结构常数模式的研究比较多,并且分别建立了各自的折射率常数模型。然而高速铁路折射率结构常数的测试和模式研究很少。因此,建立高速铁路下的折射率结构常数模型很有必要。而高速铁路环境下,由于列车风的存在,形成列车特有的边界层,使得列车周围产生复杂的湍流场。

收稿日期:2016-08

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(61271061,61132003)资助

为了描述这一复杂湍流场,文章建立以列车风为主的折射率结构常数模型来描述湍流的变化。通过理论研究和仿真分析发现了车速、列车边界层的厚度、距列车侧壁的距离、列车高度、温度、湿度对折射率结构常数的影响。从而为今后研究高速铁路下电波传播效应提供了一定的理论参考和指导。

2 构建高速铁路下的折射率结构常数模型

2.1 A、B 的选取

折射率结构常数模型的建立最早可以追溯到柯尔莫哥洛夫的三分之二定律,他的条件是局部均匀各相同性。其定义如下:

$$[n(x) - n(x+r)]^2 = C_n^2 r^{2/3} \quad (1)$$

式中:表示 $n(x)$ 空间中某一点的折射率, $n(x+r)$ 表示空间中距离该点 r 点的折射率。横线表示的是平均值,表示折射率结构常数, r 为空间两点间的距离。

在自由大气空间中,折射率一般被认为与温度、湿度和压强有关的函数:

$$n = f(\lambda, T, Q, P) \quad (2)$$

式中: n 为大气中的折射率, T 为温度, Q 为绝对湿度, P 为气压。

相应地, Owens 等人^[2]依据大气中的折射率起伏可以看成是一个关于温度起伏和湿度起伏的参量,给出了空气中折射率的波动:

$$\tilde{n} = Af(\lambda, P, T, Q)\tilde{t} + Bf(\lambda, P, T, Q)\tilde{q} \quad (3)$$

表示折射率的起伏,表示波长, A 和 B 都是与温度、湿度和压强有关的函数。

其中:

$$A = \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_{T, Q, P} \quad (4)$$

$$B = \left(\frac{\partial f}{\partial Q} \right)_{T, Q, P}$$

对于 A 、 B 的选取 Address EL 将电波分为 4 个频段:可见光波段、红外波段、无线电波和近毫米波波带,并给出了不同波段的 A 和 B 的表达式^[3]:

1) 可见光波段:

$$A = -10^{-6} m_1(\lambda) (P/T^2) \quad (5)$$

$$B = 4.6150 \times 10^{-6} [m_2(\lambda) - m_1(\lambda)] \quad (6)$$

其中:

$$M_1(\lambda) = 23.7134 + \frac{6839.397}{130 - \sigma^2} + \frac{45.473}{38.9 - \sigma^2}$$

$$M_2(\lambda) = 64.8731 + 0.58058\sigma^2 - 0.007115\sigma^4 + 0.0008851\sigma^6, \sigma = \lambda^{-1} \quad (7)$$

2) 微波波段:

$$A = -(77.6 \times 10^{-6} P + 1.73Q)/T^2 \quad (8)$$

$$B = -26 \times 10^{-6} + 1.73/T \quad (9)$$

常规温度条件下的,文本选取的是无线电波波段的 A 和 B 。

2.2 列车风的计算

列车在明线行驶时,会受到周围环境的影响,尤其是风速的影响。使得列车周围产生类似于边界层的列车边界层。并且由于空气的粘性作用,使周围空气被列车带动形成一种特定的非定长流场,在距离列车一定的距离内,此时随列车流动的空气就叫做列车风^[4]。列车风对无线通信有重要的影响。本文以列车的最高速度为 300 km/h,结合 k-E 双方程湍流模型和三维流动无量纲化的 N-S 方程^[5],并通过质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律来推导出列车风。

列车风的特性:

一般可以将列车风分为 3 个区域,称之为车头附近的势流场、列车两侧的边界层流区和列车尾部的尾流区。本文主要研究列车两侧的边界层流区。列车风主要与边界层的厚度、列车车速、列车高度、距列车侧壁距离等因素有关。

设列车边界层的厚度为 δ_l ,列车的平均高度为 z_m ,列车上任一测试点离轨道面的高度为 z_0 ,通过列车风的速度场理论和边界层相关可以推出^[6]:

$$\delta_l = 8c \left(\frac{z_m}{2z_0} \right)^{0.37} \frac{l}{Re^{0.2}} \quad (10)$$

式中: c 为系数,一般取 0.16; Re 为以 l 为特征长度的雷诺数。

同时,通过研究空气动力学的理论得出,列车边界层的速度分布可以用幂指数的形式来表达:

$$\frac{u}{V} = \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{k_{1/n}} \quad (11)$$

式中: u 为边界层内沿纵向的速度; V 为列车行驶的车速; y 为距列车侧壁的距离; n 一般取 7。

以地面作为参考坐标系数并通过式(10)、(11)可以推算出边界层的列车风的速度为:

$$u' = V - u = V \left[1 - \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (12)$$

2.3 高速铁路下折射率结构常数的计算

当无线电波经过湍流场时,会产生额外的衰减和多径效应,从而使通信质量下降。到目前为止,自由空间下的折射率结构常数的研究还不成熟,尤其是高速铁路下湍流折射率结构常数的研究还没有。因此,研究高速铁路下折射率结构常数非常必要。

列车在明线(隧道以外)行驶时,由于列车的运动使得列车周围空气被带动进而围绕在列车周围形成列车风,并产生复杂的湍流场。大气湍流的无规则运动在近地面受到各种因素的影响,如:太阳辐射、地球辐射、地表、地貌等。并且折射率结构常数是一个与风速、温度、湿度、气压有关的函数,不同的函数有不同的用处, Andreas 使用风速、温度、湿度等常规气象参数估算的折射率结构常数 C_n^2 ^[7]。

$$C_n^2 = z^{-2/3} g(z/L) (At_* + Bq_*)^2 \quad (13)$$

式中: z 为测量点的高度, $g(z/L)$ 为 Wyngaard 经验函数, t_* 为摩擦温度、 q_* 为摩擦湿度, A 、 B 是与温度、湿度、气压有关的函数。

本文经验函数采用 Wyngaard 经验函数模型中给出的形式^[8]:

$$\begin{cases} g(z/L) = 4.9(1 - 6.1\zeta)^{-2/3} (\zeta = z/L \leq 0) \\ g(z/L) = 4.9(1 + 2.2\zeta)^{-2/3} (\zeta = z/L \geq 0) \end{cases} \quad (14)$$

式中 L 为莫宁-奥布霍夫长度, 取:

$$L = \frac{t(u' - u'_0)^2}{\Delta \ln z g[\Delta t + 0.61t\Delta q]} \quad (15)$$

根据莫宁-奥布霍夫长度相似理论, 近地面层的风速 (本文取列车风的风速)、温度 t 、湿度 q 的廓线表达式为^[9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial z} \cdot \frac{kz}{u_*} &= \phi_u \left(\frac{z}{L} \right) \\ \frac{\partial t}{\partial z} \cdot \frac{kz}{t_*} &= \phi_t \left(\frac{z}{L} \right) \\ \frac{\partial q}{\partial z} \cdot \frac{kz}{q_*} &= \phi_q \left(\frac{z}{L} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_n^2 = 4.9z^{-2/3} \left[1 + 2.2 \left(\frac{gz(\Delta T + 0.61T\Delta Q)\Delta \ln z}{(\Delta u')^2 T} \right)^{2/3} \right].$$

$$\left[\frac{-k(77.6 \times 10^{-6}P + 1.73Q)\Delta T}{T^2 \left(1 + \frac{5gz(\Delta T + 0.61T\Delta Q)\Delta \ln z}{(\Delta u')^2 T} \right) \Delta \ln z} + \frac{0.692\Delta Q}{T \left(1 + \frac{5gz(\Delta T + 0.61T\Delta Q)\Delta \ln z}{(\Delta u')^2 T} \right) \Delta \ln z} \right]^2 \quad (19)$$

3 理论仿真

明线高速铁路环境是开放空间, 由于设备安装困难、仪器灵敏度的要求以及列车运行安全等因素, 使得列车交通环境下的湍流难以测量。文章基于理论和仿真的基础上得出的仿真图, 并选取微波波段进行研究。

列车风、列车速度、温度、湿度、边界层厚度、距离列车侧壁距离等影响因素, 其中影响列车风的因素主要有列车速度、边界层厚度、距离列车侧壁距离。根据理论和仿真给出了各个参数跟折射率结构常数之间的关系图。图 1 给出了列车风和车速-距侧壁距离之间的关系。

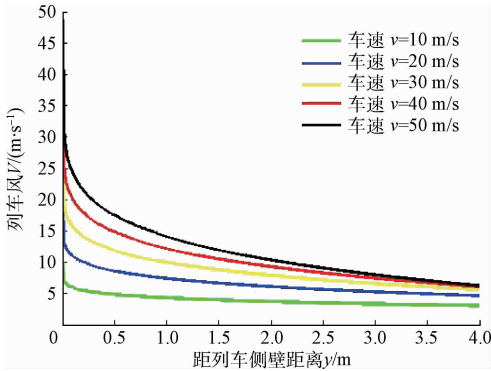


图1 列车风和车速-距侧壁距离的关系

根据图 1 可以看出, 选取不同的测试点 (也就是距离列车侧壁的距离) 列车风也不一样。侧壁距离越大, 相应

其中:

$$u_* = -\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, t_* = -\frac{H}{ku_* \rho C_p}, q_* = \frac{E}{ku_* \rho C_p} \quad (17)$$

式中: z 表示动量通量, H 表示热量通量, E 表示水汽通量, 为空气密度, C_p 为定压比热, k 为卡门常数, 一般取 0.4。通过 Tunkin^[10] 的理论推导进一步优化了 u_* 、 t_* 、 q_* 的求法。

其中无量纲廓线函数公式为:

$$\begin{cases} \phi_m = 1 + \beta_m(z/L), z/L > 0 \\ \phi_h = \alpha[1 + \beta_h(z/L)], z/L > 0 \end{cases} \quad (18)$$

$z/L > 0$ 条件下采用 Dyer^[11] 和 Hicks^[12] 的普适函数时 α 为 1, β_m 和 β_h 为 5。

一般取列车风速 $u'_0 = 0$ 为参考测量位置, 取 z_0 为 0.5 m 的下垫面高度。

结合式 (8)~(18), 得出了包含列车风参数的折射率结构常数模型 (19):

的列车风越小。这是因为列车行驶带动周围空气分子运动才产生列车风, 距离列车越近, 空气分子运动越剧烈, 当距离列车壁越远时 (平行于列车的距离), 空气分子运动越不明显, 故列车风减小。同时, 从图中还可以看出车速越大列车风也越大。折射率结构常数和列车风-湿度之间的关系如图 2 所示。

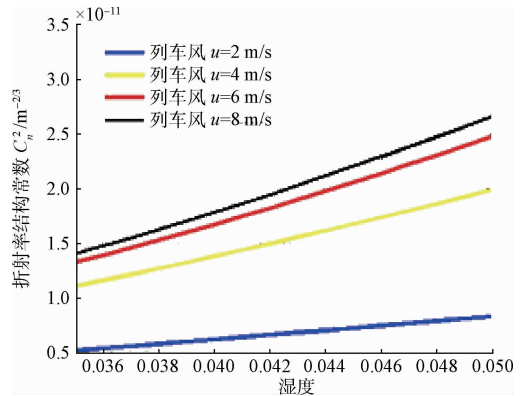


图2 折射率结构常数和列车风-湿度的关系

根据图 2 可以看出, 随着湿度的增加折射率结构常数也增加, 这与自由空间下的湿度与折射率结构常数的关系吻合, 同时, 高速列车条件下的无线电波段中湿度对折射率结构常数的影响也很明显, 不能忽略。此外, 车速的增加折射率结构常数也增加, 但是当车速到达一定时, 折射率结构长增加的幅度开始减少, 最终折射率结构常数趋

于稳定。给出了折射率结构常数与温度-列车车速之间的关系如图3所示。

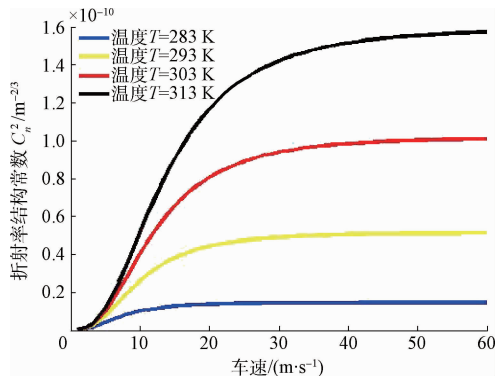


图3 折射率结构常数与温度-车速的关系

根据图3可以看出,温度每增加10℃,折射率结构常数的增加幅度越大。并且,可以发现无线电波波段温度对折射率结构常数的影响也非常大,这与可见光波段的结论相似。同时,车速的增加折射率结构常数也增加,但是当车速到达一定时折射率结构常数增加的幅度开始减少,最终折射率结构常数趋于稳定。折射率结构常数与边界层厚度-车速的关系如图4所示。

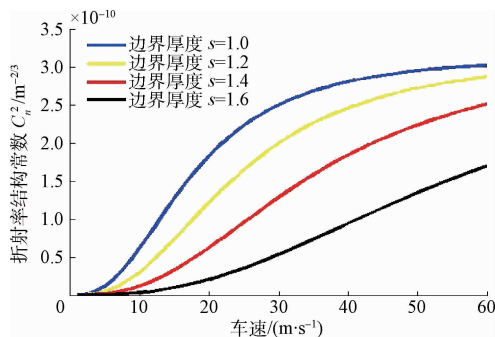


图4 折射率结构常数与边界层厚度-车速的关系

根据图4可以看出,列车边界层的厚度与折射率结构常数成正相关,厚度增加折射率结构常数也增加,但随着厚度的增加折射率结构常数增加的幅度减小,这与隧道的情况不相同。在隧道中,由于有隧道壁的限制,边界层对列车的影响很小,可以忽略。但是当列车在明线行驶时,列车边界层的厚度不能忽视,而且对折射率结构常数的影响也很大。折射率结构常数与距列车侧壁距离-车速的关系如图5所示。

根据图5可以看出,列车时速从0~20 m/s范围内,随着车速的增加,折射率结构常数成几何式的增加而随着距列车侧壁距离的增加折射率结构常数却减小,主要是距离列车越远,气流之间交替的空间越大,使得气流不那么剧烈,从而导致折射率结构常数减小。同时当列车车速到达一定时,折射率结构常数趋于稳定。从图5中还可以看出

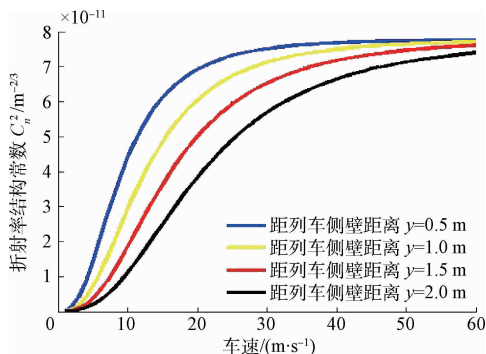


图5 折射率结构常数与距列车侧壁距离-车速的关系

车速达到一定时,距列车侧壁距离对折射率结构常数的影响很小。

4 结 论

文章从高速运动列车和列车风的角度出发,结合列车空气动力学、大气边界层动力学以及流体力学得出了高速列车下的折射率结构常数模型。并分析了列车风、温度、湿度、边界层厚度、距侧壁距离等因素对折射率结构常数的影响。其中边界层厚度-车速和温度-车速作用下对折射率结构常数的影响比列车风-湿度和距列车侧壁距离-车速影响大,大一个数量级,而且边界层厚度-车速的峰值较温度-车速大一些。从上述实验中也可以看出高速铁路电波传播的影响机理与隧道环境的影响机理有很大不同。在隧道环境中,影响折射率结构常数的参数主要有列车速度、列车长度、隧道长度、阻塞比。通过上图可以看出折射率结构常数的数值在 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ 。

参考文献

- [1] 罗秀娟,张羽,孙鑫,等. 大气环境中傅里叶望远镜系统能量设计[J]. 光学学报,2013,33(8):1-8.
- [2] TUNICK A. CN2 model to calculate the micrometeorological influences on the refractive index structure parameter[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(2):165-171.
- [3] 王轶凡,赵恒凯,王晓飞,等. 稳定大气环境边界层微波折射率结构常数建模[J]. 电子测量技术,2015,38(4):39-43.
- [4] 宋杰. 高速列车过站时的数值模拟及风致振动研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [5] 贾志浩,付卫东,王堃雅,等. 湍流模型在汽车流场仿真中的应用[J]. 中国科技信息,2012(22):49-50.
- [6] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [7] ANDREAS E L. Estimating Cn2 over snow and sea ice from meteorological data [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(4):481-495.

- [8] 陈栋,饶瑞中. 基于 Bulk 方法的南海近海面大气湍流特征分析[J]. 大气与光学学报, 2011, 6(4): 268-273.
- [9] POTVIN G, DION D, CLAVERIE J, et al. An empirical analysis of bulk cn2 models over water[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2009, 47(12):3044-3060.
- [10] 吴晓庆. 基于 Monin-Obukhov 相似理论估算近地面光学湍流强度[J]. 光学学报, 2012, 32(7):1-7.
- [11] 岳平,张强. 草原下垫面湍流动量和感热相似性函数及总体输送系数的特征[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 1-11.
- [12] HICKS B B. Wind profile relationships from the Wangara experiment [J]. Meteorol. Soc., 1976(102): 535-551.

(上接第 72 页)

作者简介

邓益民, 1983 年出生, 硕士, 研究方向为输配电线路运维检修。

E-mail: 1158775541@qq.com

黄淮, 1990 年出生, 硕士研究生, 研究方向为电力系统

作者简介

吕恒胜, 1990 年出生, 上海大学硕士研究生, 研究方向为轨道交通环境中电波传播, 参与国家自然科学基金项目“轨道交通环境边界层湍流的高频电波折射率结构机理”的研究。

E-mail: lvhengsheng111@163.com

赵恒凯, 上海大学副教授, 硕士生导师, 承担国家自然科学基金面上项目“轨道交通环境边界层湍流的高频电波折射率结构机理”、参与国家自然科学基金重点项目“面向地下轨道交通的无线信道模型构建与应用”、上海申通地铁集团项目“CBTC 无线通信方式与相关关键技术研究”; 申请或授权发明专利、软件著作权 5 件; 论著 30 余篇; 参与“城市轨道交通无线通信关键技术”研究, 获 2010 年上海市科学技术进步三等奖。

E-mail: hkzhao@staff.shu.edu.cn

运行与控制、三维虚拟仿真技术。

杨成顺, 1984 年出生, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统运行与控制、三维虚拟仿真技术。

黄宵宁, 1972 年出生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、输电线路装备与电网安全、三维虚拟仿真技术。