

doi:10.13756/j.gtxyj.2021.01.013

无线通信技术

变电站内 5G 终端通信信道建模与分析

李 欢¹, 许 越², 孟凡博³, 任 帅¹, 李海军⁴, 庞晓静⁴

(1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110000; 2. 中国联合网络通信有限公司智网创新中心, 北京 100000;
3. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110000; 4. 北京电信规划设计院有限公司, 北京 100000)

摘要:以巡检机器人为代表的终端设备在变电站中应用广泛, 第五代移动通信(5G)技术发展迅速, 未来 5G 可移动终端在变电站的应用将会越来越多。通信系统的性能与无线信道息息相关, 因此研究变电站中可移动终端的 5G 通信信道特性至关重要。文章针对变电站三维(3D)散射环境下 5G 可移动终端的通信信道的特性问题, 基于多输入多输出技术, 提出采用几何分析法建立 3D 信道模型, 并推导出了信道的时间自相关函数、空间互相关函数。基于 5G 频段, 仿真并分析了无线信道的自相关和互相关特性; 研究了不同大小的莱斯因子对无线信道特性的影响。上述仿真结果表明了 5G 终端在变电站的可用性, 拓宽了变电站场景下可移动终端运用 5G 通信技术的研究。

关键词:电力通信; 信道模型; 第五代移动通信终端; 变电站

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2021)01-0063-04

Modeling and Analysis of 5G Terminal Communication Channel in Substation

LI Huan¹, XU Yue², MENG Fan-bo³, REN Shuai¹, LI Hai-jun⁴, PANG Xiao-jing⁴

(1. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Shenyang 110000, China;
2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Intelligence Network Innovation Center, Beijing 100000, China;
3. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110000, China;
4. Beijing Telecom & Designing Institute Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Terminal equipment represented by inspection robots is widely used in substations. In the future, 5th-Generation (5G) mobile terminals will be more and more used in substations with the fast development of 5G technology. The performance of the communication system is closely related to the wireless channel. Therefore, it is very important to study the 5G communication channel characteristics of the mobile terminal in the substation. Aiming at the characteristics of the communication channel of 5G mobile terminals in the Three-Dimension (3D) scattering environment of substations, based on the multiple input multiple output technology, the article proposes to use geometric analysis to establish a 3D channel model, and derive the time autocorrelation function and spatial cross correlation function of the channel. Based on the 5G frequency band, the autocorrelation and cross-correlation characteristics of the wireless channel are simulated and analyzed. The influence of the Rice factor of different sizes on the wireless channel characteristics is also studied. The above simulation results show the availability of 5G terminals in substations, and broaden the research on mobile terminals using 5G communication technology in substation scenarios.

Key words: power communication; channel model; 5G terminal; substation

0 引 言

对变电站中电力设备的巡检至关重要^[1-2], 许多巡检技术被引进, 如高清视频监控^[3]、无线射频识别(Radio Frequency Identification Devices, RFID)技术^[4]、无人机巡检^[5]和巡检机器人^[6]等。一台智能巡检机器人可搭载众多设备, 不到 1 小时即可完成所有巡检工作。

光纤是最靠谱的通信方式^[7], 但移动的机器人无法使用光纤通信。目前巡检机器人一般使用无线局域网(Wireless Fidelity, WiFi), 可完成普通巡检任务^[8], 但 WiFi 不能满足复杂巡检任务的要求^[9]。第五代移动通信(5th-Generation, 5G)技术的高速

率低时延能充分发挥机器人的能力, 出色完成巡检任务^[10]。

信道特性影响通信系统的性能, 故需要分析 5G 机器人的通信信道特性并建立准确的信道模型。主流信道建模方法分为 3 种: 射线追踪法^[11]、统计法^[12]和随机几何法^[13]。射线追踪法基于实际传播环境, 用麦克斯韦公式推导信号增益表达式; 统计法是根据实测数据, 运用最小二乘法拟合出信号增益表达式; 本文采用随机几何法, 根据几何模型推导增益表达式, 可分为二维(Two-Dimension, 2D)模型^[14-15]和三维(Three-Dimension, 3D)模型^[16-17]建模法。

本文选取偏僻的变电站, 可忽略外部散射体对

收稿日期: 2020-09-23

作者简介: 李欢(1987—), 女, 辽宁葫芦岛人。工程师, 硕士, 主要研究方向为电力通信。

通信作者: 许越, 工程师。E-mail: 943171004@qq.com

信道的影响,其中 5G 基站位于巡检区域的中心位置。基站和机器人不在一个水平面,故需要建立 3D 模型。为提高通信质量,将多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术应用于机器人。针对不同的场景环境,改变莱斯因子,分析变电站场景下巡检机器人的 5G 通信信道的自相关和互相关特性。

1 巡检机器人 5G 通信信道模型

图 1 所示为本文所述的变电站场景下 5G 巡检机器人的通信信道模型图。建立相关的 3D 坐标系,以地面为 x 和 y 轴所在的平面。由于变电站位置偏僻,周围没有什么高大树木和建筑物,散射主要来自变电站内的物体。变电站内有一建筑物的墙(图中阴影部分),长为 L ,高为 4 米。墙上有无数个散射体 S ,坐标为 (x, W, z) 。5G 巡检机器人待巡检的区域是宽为 W 的矩形区域(图中仅仅画出长为 L 的部分)。5G 巡检机器人 M 的坐标为 $(D, 0, 0)$,且运动方向为 x 轴的正方向,速度为 v 。5G 基站在高为 H 的杆塔上,坐标为 $(L/2, W/2, H)$,5G 巡检机器人 M 与墙的水平垂直距离为 W 。5G 巡检机器人上配备有均匀线性天线阵列,有 K 个天线单元,阵列与 x 轴的夹角为 θ ,天线单元的间距分别为 δ 。第 $k(k=1, \dots, K)$ 个发射天线单元 A_k 到基站的直线距离为 d_{Bk} 。基站到散射体 S 的直线距离为 d_{BS} ,散射体 S 再到第 k 个天线单元的直线距离为 d_{Sk} 。5G 巡检机器人 M 与 5G 基站 B 的通信路径分为两种:一是直射径(Line of Sight, LOS);二是经过墙上散射体的散射路径。5G 巡检机器人 M 到 5G 基站的 LOS 路径的方位角为 α_B ,仰角为 β_B 。散射体 S 到 5G 巡检机器人 M 的散射路径的方位角为 α_S ,仰角为 β_S 。

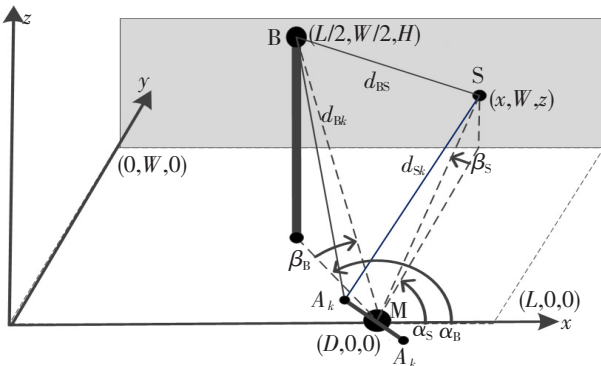


图 1 机器人通信信道模型

5G 巡检机器人与 5G 基站通信的信道复增益

可表达为 $h_k(t) = h_k^{\text{LOS}}(t) + h_k^{\text{S}}(t)$, t 为时间,信道复增益由 LOS 和散射径的增益组合而成, $h_k^{\text{LOS}}(t)$ 为 LOS 的增益表达式, $h_k^{\text{S}}(t)$ 为散射径的增益表达式。 $|h_k(t)|$ 在有 LOS 的情况下服从莱斯分布,而在没有 LOS 的情况下服从瑞利分布,其具体表达为

$$h_k^{\text{LOS}}(t) = \sqrt{\frac{C}{C+1}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d_{Bk}} e^{j2\pi f_{\text{LOS}}t}, \quad (1)$$

式中: C 为信道的莱斯因子,为 LOS 与散射路径的功率之比; e 为常量; λ 为 5G 频段下信号的波长; j 为虚数单位; f_{LOS} 为因 5G 巡检机器人的移动导致的直射路径上的多普勒频移。

$$h_k^{\text{S}}(t) = \sqrt{\frac{1}{C+1}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j(\varphi - \frac{2\pi}{\lambda}(d_{BS} + d_{Sk}))} e^{j2\pi f_S t}, \quad (2)$$

式中: n 为散射体的序号; N 趋于无穷,表示散射体数量无穷大; φ 为随机相量,一般认为服从 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布; f_S 为因 5G 巡检机器人的移动导致的散射路径上的多普勒频移。

$$f_{\text{LOS}} = (v/\lambda) \cos \alpha_B \cos \beta_B, \quad (3)$$

$$f_S = (v/\lambda) \cos \alpha_S \cos \beta_S. \quad (4)$$

根据空间几何理论, d_{Bk} 、 d_{BS} 以及 d_{Sk} 的大小与 LOS 的方位角 α_B 和仰角 β_B 以及散射径的方位角 α_S 和仰角 β_S 相关。而这些方位角和仰角又与终端 M 的坐标、5G 基站坐标以及散射体的坐标相关,可以根据空间几何方法推导出相关的表达式,因篇幅问题在此省略,具体的计算方法可参考文献[13]和[16]。

2 空间-时间相关函数

变电站场景下的巡检机器人 5G 通信信道复增益的空间-时间相关函数(Space-Time Correlation Function, ST-CF)反映了信道的特性,分别是同一径下不同天线单元之间的相关性(即空间相关性)和多径之间的相关性(即时间相关性),可以根据文献[18]中第 8 章《MIMO 信道模型》中的公式 $r_{k,k}(\delta, \tau) = E\{h_k^*(t)h_k(t+\tau)\} = r_{k,k}^{\text{LOS}}(\delta, \tau) + r_{k,k}^{\text{S}}(\delta, \tau)$ 来计算,式中: $E\{\cdot\}$ 为期望换算; k 为第 k 根天线; τ 为时间间隔; δ 为空间间隔; $h_k^*(t)$ 为信道复增益表达式的复共轭; $r_{k,k}^{\text{LOS}}(\delta, \tau)$ 为 LOS 路径上的 ST-CF; $r_{k,k}^{\text{S}}(\delta, \tau)$ 为散射路径上的 ST-CF。根据本文场景下的相关参数,计算推导如下:

$$r_{k,k}^{\text{LOS}}(\delta, \tau) = \frac{C}{C+1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[(k-k')\delta \cos(\alpha_B - \theta) \cos \beta_B]} \times e^{j\frac{2\pi v}{\lambda}(\cos \alpha_B \cos \beta_B)\tau}, \quad (5)$$

$$r_{k,k}^S(\delta, \tau) = \frac{1}{C+1} E \{ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[(k-k)\delta \cos(\alpha_S - \theta) \cos \beta_S]} \times e^{j\frac{2\pi v}{\lambda}(\cos \alpha_B \cos \beta_B) \tau} \} = \frac{1}{C+1} \int_0^L \int_0^L e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[(k-k)\delta \cos(\alpha_S - \theta) \cos \beta_S]} \times e^{j\frac{2\pi v}{\lambda}(\cos \alpha_B \cos \beta_B) \tau} p(x) p(z) dx dz, \quad (6)$$

式中, $p(x)$ 和 $p(z)$ 分别为散射体在 x 和 z 坐标上的概率密度分布函数。

由 $r(\tau) = E\{h_k^*(t)h_k(t+\tau)\}$ 可得到变电站场景下 5G 巡检机器人的信道复增益的时间自相关函数(Auto Correlation Function, ACF), 或者将 ST-CF 的天线间距 δ 置为 0 也可得到 ACF, 其反映了信道中多径之间的相关性。

根据 $r_{k,k}(\delta) = E\{h_k^*(t)h_k(t+\tau)\}$ 可得到变电站场景下 5G 巡检机器人的信道复增益的空间互相关函数(Cross Correlation Function, CCF), 或者将 ST-CF 的标准时间间隔 τ 置为 0 也可得到 CCF, 其反映了同一径下不同天线单元之间的相关性。

3 相关函数数值仿真与分析

根据第 2 节推导的 ST-CF 模型, 对信道特性进行理论分析, 采用 Matlab 软件进行数值仿真。

终端 M 到基站 B 的通信路径包含 LOS 路径和散射路径, 散射体主要来自墙, 墙上散射体的坐标为 (x, W, z) , x 与 z 的取值决定了散射路径的方位角和仰角。因为建筑物的墙表面平整, 没有凸出部分, 所以 x 与 z 的概率密度分布可取均匀分布。

x 的概率密度分布函数为 $p(x) = 1/L, 0 < x < L$; z 的概率密度分布函数为 $p(z) = 1/4, 0 < z < 4$ 。所取参数如下: 莱斯因子 $C = 0.05, L = 20 \text{ m}, W = 10 \text{ m}, H = 20 \text{ m}, D = 20 \text{ m}$ 。以联通电信共建的 5G 频段为例, 载波频率 $f = 3.5 \text{ GHz}$, 5G 巡检机器人的运动方向角为 0, 速度取 1.2 m/s ($f_{\max} = 14 \text{ Hz}$), 均匀线性天线阵列的倾角 $\theta = 0^\circ$ 。分别作出信道的时自相关特性图和空间互相关特性图。

图 2 所示为 5G 巡检机器人与 5G 基站通信信道的 ACF 图。信道的自相关特性具有震荡性, 随着标准时间间隔的增大, ACF 从 1 逐渐震荡到 0。4 个标准时间间隔后, ACF 在 0 附近小幅震荡。因为本例的莱斯因子较小(对应着 LOS 被严重遮挡的情况), C 只取了 0.05, 所以通信信道的自相关特性会随着标准时间间隔的增大而趋于 0。

图 3 所示为 5G 巡检机器人与 5G 基站的通信信道的 CCF 图。信道也具有一定的震荡性, 与信道的自相关特性相似。随着天线单元间距的增大, 信

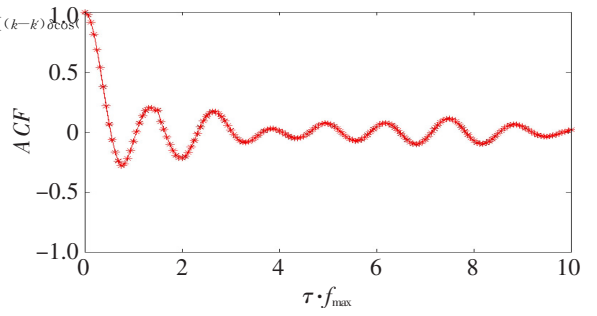


图 2 信道自相关特性

道的空间互相关特性也从 1 逐渐趋于 0, 并在 0 附近小幅震荡。同样, 因为莱斯因子取值较小, 所以互相关特性最终才会在 0 附近震荡。

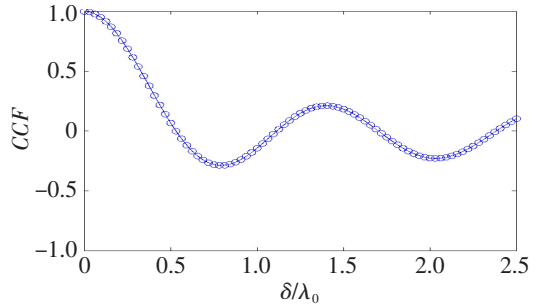


图 3 信道互相关特性

变电站内的巡检区域会有电力设备, 因此有时电力设备会遮挡 5G 巡检机器人与 5G 基站之间通信的 LOS, 这会导致信道的莱斯因子变小。因为电力设备遮挡的情况在变电站内时常发生, 莱斯因子 C 为影响巡检机器人通信信道特性的重要因素, 所以必须对其进行分析。以 $C=0$ 为例(即 5G 基站被完全遮挡的情况), 通信信道复增益没有了 $h_k^{LOS}(t)$, 只有 $h_k^S(t)$ 起作用, 所有通信路径都是经过墙面散射体的传播路径, 所以信道的相关性会随着标准时间间隔或天线单元间距的增大而逐渐趋于 0。

为研究莱斯因子 C 的大小对信道的影响(即信道遮挡的严重性对信道的影响), 选取 C 分别为 0、1、3 和 10 这 4 种情况, 其他参数不变。根据第 2 节推导的信道模型, 作出相应的仿真图, 如图 4 和 5 所示。观察分析 $C=0, 1, 3$ 和 10 的 4 张图, 由图 4 可知, C 越大, ACF 曲线震荡越明显, 振幅越大; 只要 C 不为 0, ACF 曲线最终都不会趋于 0, 而是基于一定的振幅而不断震荡。由图 5 可知, CCF 曲线的震荡与 ACF 相似, 只要 C 不为 0, CCF 曲线最终就不会趋于 0; C 越大, 稳定后震荡的振幅越大。

综合以上分析可知, C 对信道的相关性影响巨大, 为提高信道通信的质量, 应尽量保证 5G 基站与 5G 巡检机器人的通信存在 LOS。

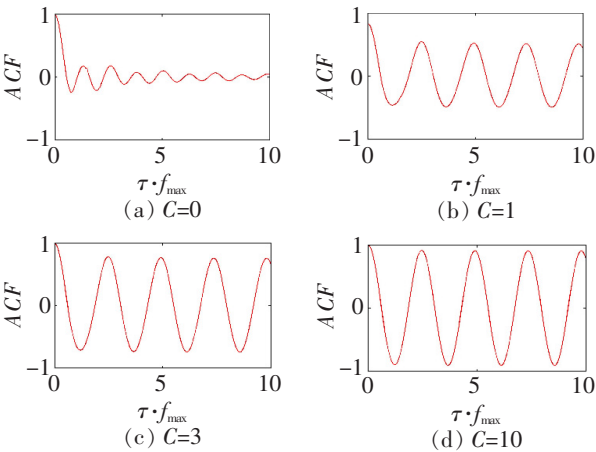


图 4 不同莱斯因子下的信道 ACF

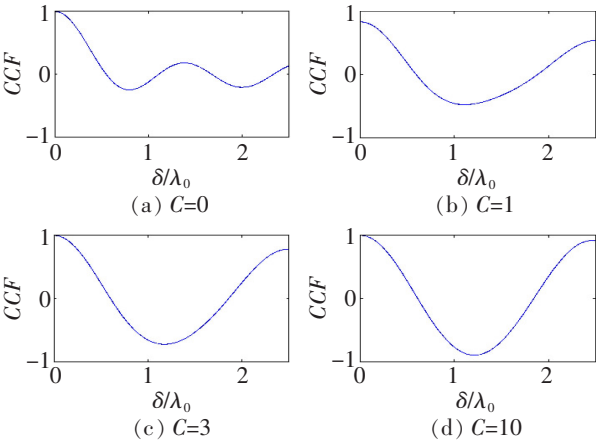


图 5 不同莱斯因子下的信道 CCF

4 结束语

针对变电站位置偏僻和站外树木建筑物稀少的特点,结合变电站内巡检区域和机房的特点,本文建立了 5G 巡检机器人通信的 3D 信道模型。根据几何分析法,推导出了信道的 ACF 和 CCF 公式,并采用 Matlab 软件工具作出相应的仿真,分析了标准时间间隔对 ACF 的影响,以及天线单元的间距对 CCF 的影响。由于变电站内巡检区域的电力设备会对 5G 基站和巡检机器人之间的通信造成遮挡,必须考虑莱斯因子对信道的影响。选取不同的莱斯因子作仿真分析,对比不同莱斯因子下信道的 ACF 和 CCF 可知,莱斯因子越大,信道的相关性越大,无线通信质量越好。本文针对变电站场景内 5G 巡检机器人的通信信道建立 3D 模型,分析信道的相关特性,拓宽了 5G+机器人在变电站内的应用研究。

参考文献:

[1] 肖鹏, 张彩友, 冯华, 等. 变电站巡检机器人 GPS 导

航研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(8): 23-25, 28.
[2] Guo R, Han L, Sun Y, et al. A Mobile Robot for Inspection of Substation Equipments[C]// International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Tianjin, China: IEEE, 2010: 10-12.
[3] 刘钧. 智能变电站视频监控系统的应用研究[J]. 电子技术与软件工程, 2015, 72(22): 28.
[4] 张丹丹, 胡建明, 崔婷, 等. 带传感器的射频识别技术在变电站电气设备状态信息采集中的应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2623-2630.
[5] 干喆渊, 赵军, 张建功, 等. 基于无人机红外测温的线夹再次发热缺陷分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(13): 980-987.
[6] 蔡焕青, 邵瑰玮, 胡霁, 等. 变电站巡检机器人应用现状和主要性能指标分析[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14): 117-123.
[7] 赵展, 卜树坡, 刘昊. 基于光纤传感器的电力电缆故障在线测距系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(13): 75-78.
[8] 程翠, 殷树才, 彭勇. 基于 WIFI 的变电站远程无线视频监控系统设计[J]. 信息通信, 2013(9): 51-52.
[9] 方子璐, 杨俊杰, 刘娟. 基于虚拟局域网的智能变电站通信网络实时性仿真[J]. 电测与仪表, 2017, 54(24): 62-67.
[10] Miao Y M, Jiang Y Y, Peng L M, et al. Telesurgery Robot based on 5G Tactile Internet[J]. Mobile Networks & Applications, 2018, 24(8): 34-48.
[11] 孙晨晨, 逯贵祯. 基于射线追踪法的室内走廊环境电波传播研究[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2019(5): 12-14.
[12] 孔豫京, 黄焱, 崔登旭, 等. 无人侦察机通信侦察信道统计模型建模与仿真[J]. 电子信息对抗技术, 2015(1): 77-82.
[13] 何怡刚, 许越, 李兵, 等. 几何散射环境下的车载通信信道建模与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2018(9): 80-87.
[14] Cheng X, Yao Q, Wen M, et al. Wideband Channel Modeling and Inter-carrier Interference Cancellation for Vehicle-to-Vehicle Communication Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 434-448.
[15] Pätzold M, Hogstad B O. A Wideband MIMO Channel Model Derived from the Geometric Elliptical Scattering Model[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2008, 8(5): 597-605.
[16] 何怡刚, 许越, 李兵, 等. 街道环境 V2V 通信信道建模与容量分析[J]. 计算机应用研究, 2019(10): 3072-3075.
[17] Du D, Zeng X, Jian X, et al. Three-Dimensional Vehicle-to-Vehicle Channel Modeling with Multiple Moving Scatterers[J]. Mobile Information Systems, 2017, 36(9): 1-14.
[18] 裴措特. 移动无线信道[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.