



移动扫码阅读

赵文生. 综采工作面复杂环境下超宽带测距技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 145–149. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.12.021
ZHAO Wensheng. Research on UWB ranging technology under complex environment of fully-mechanized mining face [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 145–149. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.12.021

综采工作面复杂环境下超宽带测距技术研究

赵文生

(北京天地玛珂电液控制系统有限公司 技术中心, 北京 100013)

摘 要:综采工作面位置服务对于煤矿智能化开采具有重要意义, 现有矿井定位方法及技术在非视距场景定位误差大, 难于满足综采工作面位置服务与安全的需求, 为了解决自动化综采工作面设备、人员安全定位问题, 以解决综采工作面复杂环境下支架、输送机、采煤机等设备对于超宽带(UWB)信号反射、衍射、遮挡等问题为目的, 研究脉冲信号模型和超宽带测距原理, 结合工作面具体情况, 研究信号传输模型, 分析传输过程中由于多径等因素产生的特征变化, 从而得出综采工作面对于超宽带通信的主要影响因素, 针对上述因素优化通信参数, 结合 DW1000 平台进行井下测距试验。工作面试验数据表明, UWB 测距误差可以控制在 50 cm 以内, 可以满足设备、人员定位的基本要求。

关键词:综采工作面; 超宽带; 测距技术; 无线通信

中图分类号:TD67

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0145-05

Research on UWB ranging technology under complex environment of fully-mechanized mining face

ZHAO Wensheng

(Technology Center, Beijing Tiandi-Marco Electro-Hydraulic Control System Company Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The location service of fully-mechanized mining face is great significance for the intelligent mining of coal mines. The existing mine positioning methods and techniques have large positioning errors in non-line-of-sight scenes, and it is difficult to meet the needs of location service and safety of fully-mechanized mining face. In order to solve the problem of equipment safety and personnel safety in fully-mechanized coal mining face, from the view of reducing the UWB signal ranging, reflection, diffraction and occlusion under the complex environment of fully-mechanized coal mining face, such as support, conveyor and shearer, Based on the impulse signal model and UWB distance measurement principle, combining with the conditions of working face, the signal transmission model is studied, and the characteristic due to multipath and other factors in the transmission process are analyzed. The main influencing factors of the UWB communication in the fully-mechanized mining face are obtained. Based on the above factors, the communication parameters are optimized on the DW1000 platform. The test data show that the UWB ranging error can be controlled within 50 cm, which can meet the basic requirements of equipment and personnel positioning.

Key words: fully-mechanized mining face; UWB; ranging technology; wireless communication

0 引 言

1993 年美国加州大学的 R A Scholts 在国际军事通信会议上论证了跳时多址脉冲无线电技术, 开辟了超宽带通信研究的新时代^[1-2], 该技术在 2005 年前后达到高峰, 但是随着 intel、Motorola 等主要厂

商转向 WiFi 等相应技术, 超宽带方面的研究跌入谷底。近年来脉冲无线电超宽带(IR-UWB, Impulse Radio Ultra-Wideband)技术由于时间分辨率高及定位准确的特性逐步受到室内定位等领域的重视并且实现产业化^[3-6]。理论上 IR-UWB 可以获得毫米级甚至更高的定位精度, 其具有抗多径能力^[7-8], 具备

收稿日期: 2019-05-22; 责任编辑: 赵 瑞

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804300); 北京市科技计划智能制造技术创新与培育资助项目(Z171100000817003); 中国煤炭科工集团科技创新资助项目(2016MS014, KJ-2016-TDMK-01)

作者简介: 赵文生(1980—), 男, 河北鹿泉人, 工程师。Tel: 010-84263000, E-mail: zhaows@tdmarco.com

在复杂多径环境中定位的可能性,上述特性适用于煤矿综采工作面复杂环境下人员精确定位、设备防碰撞等应用。

综采工作面是我国煤炭生产环节中最核心的区域,设备种类复杂、数量众多,其中主要包括工作面“三机”:采煤机、液压支架和刮板输送机。随着近年来我国煤炭科技工作者连续攻关,煤矿综采自动化、无人化方面已经取得重要进展^[9],支架电液控制系统、采煤机惯性导航、输送机煤流负荷平衡等方面都有比较系统的研究^[10],成套装备在实现整体自动化控制的同时,煤矿对于安全生产也提出更高要求,例如设备与人员安全定位、设备防碰撞、三机协同等。超宽带本身技术特征使上述功能成为可能,目前超宽带技术已经在井下掘进机、采煤机定位等应用领域取得进展^[11]。然而早期井下测距数据显示超宽带技术存在有效量程较短,测量结果跳变等问题影响该技术的推广应用。

因此,笔者以超宽带技术在综采工作面的应用为主要研究对象,着重解决超宽带技术的适应性问题,最终解决设备及人员定位问题,为实现工作面的无人化、智能化奠定基础。

1 超宽带(UWB)通信

1.1 UWB 定义

美国联邦通信委员会(Federal Communication Committee, FCC)关于超宽带的定义为^[12]

$$B \geq 500 \text{ MHz} \quad (1)$$

或者:

$$B_{\text{frac}} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \geq 0.2 \quad (2)$$

其中: B 为绝对带宽; B_{frac} 为相对带宽; f_H 、 f_L 分别为辐射功率衰减到-10 dB时所对应的上下频点。

当前,超宽带无线电通信按照实现方式大致可分为2大类,即脉冲无线电超宽带(IR-UWB)通信系统和载波调制超宽带通信系统^[13-15],在IEEE802.15.4a标准中UWB物理层采用跳时脉冲无线电(TH-IR, Time-hopping Impulse Radio)方案,调制采用突发位置调制(BPM, Burst Position Modulation)、二进制相移键控(BPSK, Binary Phase Shift Keying)相结合的方式,BPM-BPSK信息被调制到一组称为突发的连续脉冲串上发送,这些脉冲的宽度约为纳秒级,因此具有较高的时间分辨率,可以实现精确ToF(Time of Flight)测距。

1.2 IR-UWB 测距

IR-UWB是UWB通信经典的实现方式,其利

用宽度在亚纳秒级具有极低占空比的基带脉冲序列传递信息^[2,14-15]。802.15.4a标准针对多径传输问题优化设计了前导码。

信号接收机可以通过信道冲击响应(CIR, Channel Impulse Response)获取信号接收时间,其中通过相干(Coherent)或能量检测(ED, Energy Detection)来处理接收到的信号。二者相比较而言,相干测距提供更好的精度,但能量检测具有简单、低成本、可操作性强的优点。

2 综采工作面环境下的测距方案

2.1 综采工作面环境

综采工作面环境狭小,多种设备相互关联,无线信号传输区域处于金属半包裹环境,无线电波易被遮挡、反射、衍射,性能下降明显^[16-18]。上述因素导致无线信号在工作面传输特征为非视距(NLOS, Non Line of Sight)与视距(LOS, Line of Sight)相结合,因此该应用需充分考虑以上特征并制定应对策略。综采工作面现场复杂环境如图1所示。



图1 综采工作面现场复杂环境

Fig.1 Complex environment in fully-mechanized working face

2.2 IEEE802.15.4a 信道模型^[19-20]

无线通信信号的传播机制非常复杂,路径损耗、多径效应、阴影衰减等都会对信号传输产生影响。IEEE802.15.4a工作组在传统UWB信道模型基础上根据实测数据给出了用于低速、测距、低功耗、低成本的IR-UWB系统信道模型^[21]。

2.2.1 路径损耗模型

IR-UWB系统工作频带极宽,信号工作频率、传输距离与路径损耗直接相关,即

$$P_L(f, d) = P_L(d) P_L(f) \quad (3)$$

其中: $P_L(d)$ 为路径损耗与传输距离 d 的关系; $P_L(f)$ 为路径损耗与工作频率 f 的关系。考虑阴影效应,则

$$P_L(d) = P_{L_0} + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + S \quad (4)$$

式中: P_{L_0} 为距离 $d_0 = 1 \text{ m}$ 处的路径损耗; n 为衰减

指数,与环境因素有关; S 为服从均值为0,方差为 σ_s 高斯分布的随机变量。

2.2.2 多径衰减模型

UWB多径分量呈现分簇到达的特征,IEEE802.15.4a信道模型借鉴了S-V信道模型,具体可表示为如下冲激响应:

$$h_{\text{diser}}(t) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l} \exp(j\varphi_{k,l}) \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \quad (5)$$

式中: $\alpha_{k,l}$ 为 l 簇第 k 个多径信号系数; T_l 为第 l 簇延迟; $\tau_{k,l}$ 为 l 簇第 k 个多径信号相对 T_l 的延迟;相位 $\varphi_{k,l}$ 为统计独立且服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机变量; t 为时间; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数; L 为簇数量; K 为路径数量。

2.2.3 信道模型仿真及分析

IEEE802.15.4a依据实测数据将信道归纳为4类模型:室内居住环境、室内办公环境、户外环境和工业环境,每种环境又分为LOS和NLOS,依次记为CM1、CM2、CM3、CM4、CM5、CM6、CM7、CM8,综采工作面属于工业环境,对应信道CM7和CM8,依据模型提供的信道参数对CM7、CM8进行仿真,可以得到信道冲激响应、功率延迟剖面(PDP)、均方根(RMS)时延扩展、多径分量数目等仿真结果。

IEEE802.15.4a信道冲激响应模型如图2所示,仿真结果显示,综采工作面所处的工业复杂环境多径现象明显,信号被透射、反射、衍射,在综采工作面环境应用超宽带测距定位需对其信道模型进行分析与参数优化。

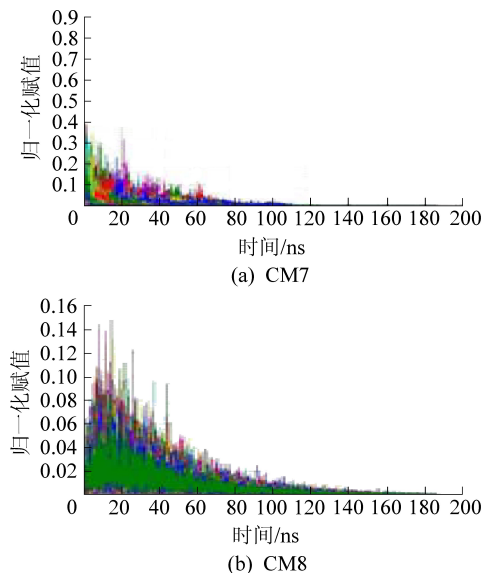


图2 IEEE802.15.4a信道冲激响应模型

Fig.2 IEEE802.15.4a channel impulse response model

3 性能分析及系统优化

对于复杂环境中传输的脉冲信号,接收机接收到的最短路径信号强度通常很弱,因此提高系统性能的主要途径是提高对于第一路径的接收灵敏度^[22]。以下通过改变前导码长度、调整接收灵敏度,以及天线优化等方面进行分析及优化。

3.1 改变前导码长度

依据IEEE802.15.4a定义^[23],物理层帧格式包括3个主要部分:同步帧头(SHR)、物理层头(PHR)和来自MAC层的物理层服务数据单元。其中前导码位于物理层头(PHR)的前面,接收机进行自动增益控制AGC、包和帧同步、信道估计以及边缘信号跟踪,其包括帧引导序列(Preamble)和帧开始定界符(SFD),其中帧引导序列可以选择16、64、104、4 096个字符长度,并由此产生时间期限不同的SHR,其中时间更长,比如:1 024和4 096个字符长度是非相干接收器的优先选择,可以有助于提高其信噪比(SNR, Signal Noise Ratio);帧开始定界符长度8.64个字符;物理层头长度16个字符物理层服务数据单元0—1 209个字符。

在IEEE 802.15.4a标准中,帧引导序列是考虑到多径信道而设计的,以便使第一路径检测更容易。依据标准建议,帧引导序列长度设置为1 024个符号号来开始测距操作^[26]。通过记录所报告的品质因数(FoM, Figure of Merit),可以对帧引导序列长度进行未来的调整。

3.2 调整接收器阈值

在实际应用中,尤其是在恶劣环境下超宽带能量检测接收机阈值选择是一个具有挑战性的问题。一般来说,阈值由噪声水平决定。

在一些NLOS环境下,信号穿过设备、人体等路径后强度小于发射路径的信号强度,在该情况下降低接收器的接收阈值可有效提高接收灵敏度,如图3所示。但在阈值的调整过程中,要避免过度调整导致噪声信号,被当作第一到达信号,从而导致测量错误,如图4所示。

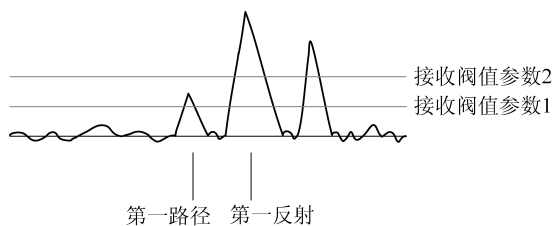


图3 超宽带接收阈值调整

Fig.3 UWB threshold adjustment

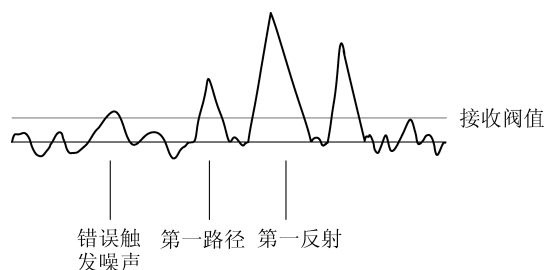


图4 超宽带接收阈值调整方案二

Fig.4 UWB threshold adjustment scheme II

3.3 DW1000 系统设计及试验

采用 DecaWave DW1000 进行超宽带距离测量,该芯片是首款支持 IEEE 802.15.4a 的商用芯片,具有高带宽、高时钟稳定性和 3 种数据速率:110 kbit/s、850 kbit/s、6.8 bit/s,该芯片采用相干原理进行时间戳标记,并且使用载波信号对基带脉冲进行调制,时间分辨率可达 15 ps,理论测量误差低于 10 cm。

测试电路采用 DWM1000 模块板载天线,型号 ACA-107-T,电路板配合天线设计,铺铜面积 7 cm×7 cm,电路板工作参数如下:中心频率 3 993.6 MHz;带宽 499.2 MHz;前导长度 1 024 字符;PRF 为 16;NTM_1 为 12;NTM_2 为 7;数据速率 110 kbit/s。

上述电路在黄陵一号矿 621 工作面进行测试,该工作面煤层厚度 2.2~3.1 m,倾角 1°~5°,为近水平中厚煤层,中部支架型号 ZY7800/15/30D,该工作面人行通道位于立柱前方,区域较为开阔,针对中等厚度煤层超宽带综采工作面性能测试具有代表性。试验分视距测试(图 5)以及由于人员等导致的非视距测试(图 6)2 组,每个距离点测试 3 次;视距

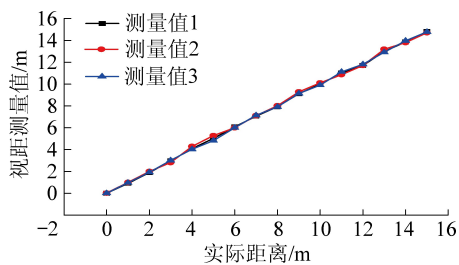


图5 综采工作面视距测量

Fig.5 LOS measurement datas of fully-mechanized working face

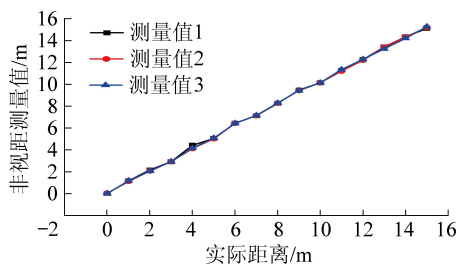


图6 综采工作面非视距测量数据

Fig.6 NLOS measurement datas of fully-mechanized working face

与非视距对比数据见表 1,试验覆盖综采工作面主要定位应用需求。试验结果显示:

表1 综采工作面 UWB 测试数据

Table 1 UWB test datas of fully-mechanized working face

实际距离/m	视距测试数据/m	视距测量误差/m	非视距测试数据/m	非视距测量误差/m
0	0.020	0.020	0	0
1	1.004	0.004	1.162	0.162
2	2.007	0.007	2.152	0.152
3	2.818	0.182	2.905	0.095
4	4.295	0.295	4.400	0.400
5	5.285	0.285	5.023	0.023
6	6.005	0.005	6.423	0.423
7	7.114	0.114	7.101	0.101
8	8.020	0.020	8.233	0.233
9	9.279	0.279	9.438	0.438
10	10.109	0.109	10.107	0.107
11	10.863	0.137	11.245	0.245
12	11.709	0.291	12.218	0.218
13	13.192	0.192	13.385	0.385
14	13.793	0.207	14.306	0.306
15	14.703	0.297	15.077	0.077

1) 工作面环境下最大有效测量距离较井上空旷环境大幅度减少,发射功率恒定情况下,井下无丢帧最大测量距离为 14.7 m,仅接近后者 1/3。

2) 测试误差基本稳定与实际距离无关,当在视距情况下,测距误差小于 30 cm。

3) 当设备、人员遮挡等情况发生时,测距误差有显著增大,但通过超宽带参数优化,测距误差可控制在 50 cm 以内。

针对精度较高的应用,可以在此基础上通过增加锚点密度、提升链路预算以及结合 IMU 进行数据融合等方法满足人员设备的定位要求。

4 结 论

1) 针对煤矿井下综采工作面测距定位需求,对超宽带脉冲信号的传输模型进行了研究,并在 IEEE802.15.4a 信道模型的基础上,对脉冲信号传播特性进行了试验和分析。

2) 针对综采工作面存在的复杂影响因素,提出了通过调整帧引导序列长度,调整接收机接收阈值等提高复杂环境下超宽带测距性能的方法。

3) 在黄陵一号矿 621 工作面试验结果表明:根据 IR-UWB 信号的传输特性,通过关键参数调整、优化,可以大幅度提高超宽带在井下复杂环境下的测距稳定性和精度,满足综采工作面人员与设备安全定位的技术要求。

参考文献(References):

- [1] SCHOLTZ R. Multiple access with time hopping impulse modulation [C]. IEEE Military Communications Conference, Boston, 1993: 447-450.
- [2] FONTANA R J. Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(9): 2087-2104.
- [3] GEZICI S, TIAN Zhi, GIANNAKIS G B. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.
- [4] 肖竹, 王勇超, 田斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 133-141.
XIAO Zhu, WANG Yongchao, TIAN Bin, *et al.* Development and prospect of ultra-wideband localization research and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 133-141.
- [5] CARDINALI R, NARDIS L D, BENEDETTO M G Di. UWB ranging accuracy in high- and low-data-rate applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1865-1875.
- [6] MAHFOUZ M R, ZHANG C, MERKL B C. Investigation of High-Accuracy Indoor 3-D Positioning Using UWB Technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(6): 1316-1330.
- [7] DARDARI D, CONTI A, FERNER U. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 404-426.
- [8] 张科学, 李首滨, 何满潮, 等. 智能化无人开采系列关键技术之一: 综采智能化工作面调控控制技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 139-149.
ZHANG Kexue, LI Shoubin, HE Manchao, *et al.* Study on key technologies of intelligent unmanned coal mining series I: study on diagonal adjustment control technology of intelligent fully-mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 139-149.
- [9] 白永胜, 牛剑峰. 液压支架电液控制通信网络系统透明化设计 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 183-187.
BAI Yongsheng, NIU Jianfeng. Design of transparency of communication network system for electronic-hydraulic control system of hydraulic support [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 183-187.
- [10] 王书明, 牛剑峰. 液压支架电液控制系统故障诊断技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 225-231.
WANG Shuming, NIU Jianfeng. Study on fault diagnosis technology of electro-hydraulic control system applied in hydraulic powered support [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 225-231.
- [11] 刘清. 基于超宽带技术的采煤机定位系统设计 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 132-135.
- LIU Qing. Design on positioning system of shearer based on ultra wide band technology [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 132-135.
- [12] FEDERAL Communications Commission. First report and order in the matter of revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems [R]. FCC, Released, ET Docket 98-153, FCC 02-48, 2002.
- [13] SIWIAK K. Ultra-wideband radio technology [M]. Manhattan: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [14] 葛利嘉, 曾凡鑫, 刘郁林, 等. 超宽带无线通信 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [15] REINHOLD R. Coverage range analysis of IEEE 802.15.4a IR-UWB for reliable data transmission in wireless sensor networks [C]. IEEE International Workshop on Measurements and Networking Proceedings, 2013: 31-35.
- [16] 张跃平, 盛剑桓, 郑国莘. 900 MHz 无线电波在综采工作面上的传播测试 [J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 526-528
ZHANG Yueping, SHENG Jianhuan, ZHENG Guoxin. Radio propagation within coal mine longwall faces at 900 MHz [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 526-528.
- [17] 张跃平, 张文梅, 盛剑桓, 等. 900 MHz 无线电波在地下长壁煤矿的传播 [J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 83-87.
ZHANG Yueping, ZHANG Wenmei, SHENG Jianhuan, *et al.* Radio propagation at 900 MHz in underground coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 83-87.
- [18] 杨维, 程时昕, 孙继平. 矿井无线通信与频率资源利用 [J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 535-538.
YANG Wei, CHENG Shixin, SUN Jiping. The mine wireless communication and frequency resource utilization [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 535-538.
- [19] FOERSTER J. Channel modeling sub-committee report final [R]. IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, 2003.
- [20] SALEH A A M, VALENZUELA R. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1987, 5(2): 128-137.
- [21] MOLISCH A F K, BALAKRISHNAN C C Chong. IEEE 802.15.4a Channel model-final report [EB/OL]. [2019-02-03]. <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/04/15-04-0662-00-004a-channel-model-final-report-r1.pdf>.
- [22] 肖竹, 于全, 易克初, 等. 适用于 NLOS 环境的 UWB 定位方案研究 [J]. 通信学报, 2008, 29(4): 1-7.
XIAO Zhu, YU Quan, YI Kechu, *et al.* Research on localization scheme of UWB in NLOS environment [J]. Journal on Communications, 2008, 29(4): 1-7.
- [23] IEEE Computer Society. IEEE Standard 802.15.4a-2007 [C]. New York, NY: IEEE, 2007.
- [24] SAHINOGLU Z, GEZICI S. Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard [C]. IEEE Wireless & Microwave Technology Conference, 2006: 1-5.