

VHF 超视距通信传播模式及信道特性分析

陈 玮¹, 代金国²

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

2. 西安卫星测控中心, 西安 710054)

摘要: 针对 VHF 频段传统单模传输距离受限问题, 系统性地研究了 VHF 频段存在的地波绕射、对流层散射等通信信道资源; 基于 VHF 超视距传播模式的复杂性, 通过理论分析和大量野外信道测试和通信试验数据统计分析相结合的方式, 提出了不同传播模式的区分方法, 并参考 C 频段对流层散射通信信道特性, 分析了日变化、年变化等慢衰落特性和衰落深度、衰落速率、衰落持续时间的快衰落特性, 为 VHF 超视距通信波形设计提供支撑; 根据不同距离不同季节的信道特点, 为更充分利用 VHF 频段超视距绕射、散射通信资源, 给出了 VHF 频段超视距通信系统设计思路, 支撑 VHF 频段通信设备覆盖范围和通信能力的提升。

关键词: VHF; 超视距通信; 地波绕射; 对流层散射; 快衰落; 慢衰落; 传输损耗

Propagation Modes and Channel Characteristic Analysis of VHF Band BLOS Communication

CHEN Wei¹, DAI Jinguo²

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710054, China)

Abstract: To address the distance limitation of conventional single-mode propagation in a very-high-frequency (VHF) Band, research on the communication channel resources within the VHF band is systematically conducted, including ground-wave diffraction and tropospheric scattering propagation. Based on the complexity of VHF band beyond-line-of-sight (BLOS) propagation modes, a method for distinguishing between different propagation modes is proposed by combining theoretical analysis and the statistical analysis of extensive field channel measurements and communication test data. By referring to the channel characteristics of C-band tropospheric scattering communication, this paper analyzes the fast-fading characteristics of fading depth, fading rate, and fading duration, as well as the slow-fading characteristics of daily and monthly variations, and provides a support for VHF band BLOS communication waveform design. According to the channel characteristics at different distances and seasons, in order to more fully utilize the diffraction and scatter communication resources for VHF band BLOS communication, an approach for VHF band BLOS communication systems is proposed, which improves coverage range and communication capabilities for VHF band communication equipment.

Keywords: VHF; BLOS communication; ground wave diffraction; tropospheric scattering; fast-fading; slow-fading; transmission loss

0 引言

VHF (甚高频, 30~300 MHz) 频段因其独特的传播特性, 在军民用通信领域始终发挥着不可替代的作用。该频段在视距 (LOS) 链路中表现出优异的稳定性, 同时具备地波绕射、对流层散射等超视距 (BLOS) 扩展潜力, 尤其 30~88 MHz 频段凭借地波传播鲁棒

性、使用灵活性及军用频谱独占性, 被全球战术电台广泛采用。然而, 传统 VHF 设备受限于视距传播机制, 即使结合地形辅助中继, 有效通信距离仍被制约在百公里内, 难以满足数百公里远距离通信需求。尽管理论层面存在大气波导、对流层散射等超视距信道, 但其工程化应用仍面临深层挑战。并且绕射信号随距离与频率升高快速衰减, 而低频段 (<100 MHz) 的对流层散射传

收稿日期:2025-07-17; 修回日期:2025-08-01。

作者简介:陈 玮(1982-),女,硕士,高级工程师。

引用格式:陈 玮,代金国. VHF 超视距通信传播模式及信道特性分析[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9):254-260.

播研究缺乏, 导致 VHF 低频段超视距通信能力尚未充分挖掘。

现有对流层散射通信系统工作频段集中于 100 MHz ~ 20 GHz, 对 30 ~ 100 MHz 的 VHF 低频段散射机理研究近乎空白, 基础信道特性数据匮乏。因此, 如何更充分的利用 VHF 频段超视距通信信道资源, 挖掘 VHF 低频段超视距通信潜力, 并且能否在不改造现有 VHF 通信设备硬件架构的前提下, 通过信道特性重构与波形优化, 突破距离瓶颈, 实现百公里级远距离超视距通信, 是本文研究的重点。

本文针对上述挑战, 首先, 建立 VHF 频段超视距传播的理论模型, 包括绕射传播和对流层散射传播; 其次, 开展典型距离典型季节和典型地形环境的信道测试试验, 覆盖 100 ~ 500 km、平原/山地地形、春夏秋冬三季, 研究距离、频率、地形、气候等参数对传播模式的影响; 最终, 基于实测数据分析信道快衰落与慢衰落特性, 揭示 VHF 超视距信道特性变化规律。

1 VHF 超视距传播模式与传输损耗

VHF 频段超视距通信的传播机制会随通信距离的变化而呈现明显的模式转换特征, 具体表现为 3 种典型传播模式如下。

近距离模式 (5 ~ 30 公里): 以绕射传播为主导机制, 信号主要通过地形障碍物的菲涅尔区绕射传播, 为准恒参信道, 典型应用场景: 城市建筑群通信、丘陵地带链路。

中距离模式 (30 ~ 100 公里): 呈现绕射与散射混合的莱斯信道传播特性, 信号同时受地形绕射和对流层不均匀体散射影响, 传播损耗呈现复合衰减特征。

远距离模态 (100 公里以上): 以对流层散射传播为主的瑞利信道, 信号通过大气湍流介电常数起伏实现前向散射, 需要大功率发射和高灵敏度接收。

准恒参信道中电波的散射分量比绕射分量一般低 15 dB 以上, 此时的散射分量可忽略不计; 莱斯信道中电波的散射分量比绕射分量低 15 dB 以内, 散射分量成为不可忽视的部分, 此种信道可视作具有直射分量的莱斯信道; 瑞利信道中电波的散射分量高于绕射分量, 成为起主导作用的分量。三种不同信道模式的电波分量关系如图 1 所示。

不同传播模式的转换主要受距离、频率、地形、气候等参数影响, 而不同传播模式的传播机理属不同类型, 为了预测传输损耗, 需要区分不同传播模式, 分别对地波绕射、对流层散射路径进行考虑。

1.1 绕射传播

绕射损耗是指由障碍物引起的附加传输损耗。障碍物不同, 绕射损耗也不相同, 一般可分为单峰绕射和多

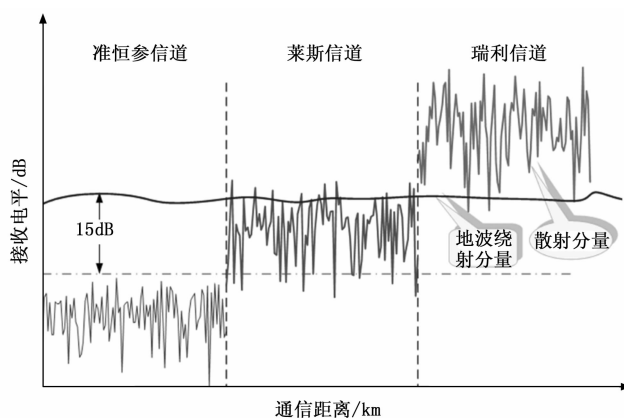


图 1 不同信道模式下的电波分量关系图

峰绕射进行讨论。当收发天线间的直射路径被单一刀形障碍物遮挡且该障碍物位于第一菲涅尔区内时, 称为单峰绕射; 若多个刀形障碍物同时穿透第一菲涅尔区并阻挡直射路径, 则构成多峰绕射。

单峰绕射损耗公式如式 (1) 所示:

$$L_d = \begin{cases} 0 & (v \geq 1) \\ 20\lg(0.5 + 0.62v) & (0 \leq v \leq 1) \\ 20\lg(0.5e^{0.45v}) & (-1 \leq v \leq 0) \\ 20\lg(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.1v + 0.38)^2}) & (-2.4 \leq v \leq -1) \\ 20\lg(-0.225/v) & (v \leq -2.4) \end{cases} \quad (1)$$

其中: v 为绕射常数, 用式 (2) 表示:

$$v = -h \sqrt{\frac{2}{\lambda(1/d_1 + 1/d_2)}} \quad (2)$$

其中: h 为障碍物顶端到收发两端站连线的垂直距离, 单位 m; λ 为电磁波波长, 单位 m; d_1 、 d_2 分别为两端站到障碍物顶点的距离, 单位 m。

根据 ITU-R P. 526 给出的单刀峰绕射模型推导出的简化公式可得, 在深绕射区 ($v > 5$ 或 $(\frac{h^2}{\lambda d}) > 0.28$) 时, 绕射损耗可以近似为:

$$L_d = 32.9 + 10\lg\left(\frac{fh^2}{d}\right) + 10\lg\left(\frac{d^2}{4d_1d_2}\right) \quad (3)$$

式中, f 为电波频率 (MHz), d 为通信距离 (km)。

文献 [8] 中指出, 上式后半部分 $10\lg\left(\frac{d^2}{4d_1d_2}\right)$ 是一个随障碍物位置变化的修正项, 当障碍物位于收发两端连线中点时, 此修正项值为零^[8]。由式 (3) 可以推断, 绕射损耗的大小与频率 f 成正比, 所以选用较低频段能有效提升电波的山峰绕射能力。

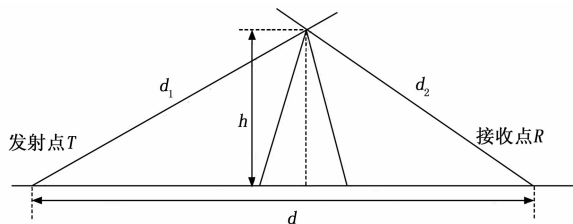


图 2 单峰绕射示意图

多峰绕射与单峰绕射的区别就在于障碍物的增加对计算产生了更复杂的影响,比如障碍物的数量、障碍物之间的距离等等。对于不同的多峰分布,有不同的多峰绕射损耗计算方法,本文选用 Epstein 算法,以两峰绕射为例,计算多峰绕射损耗^[24]。

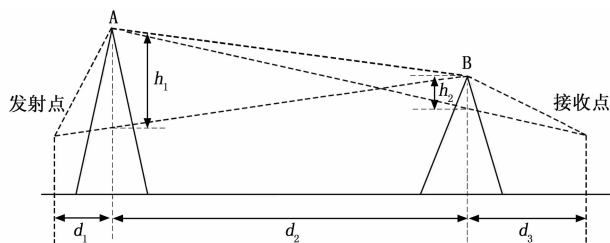


图 3 两峰绕射模型

首先,独立计算路径上每个山峰造成的绕射损耗。

$$v_A = -h_1 \sqrt{\frac{2}{\lambda(1/d_1 + 1/d_2)}} \quad (4)$$

$$v_B = -h_2 \sqrt{\frac{2}{\lambda(1/d_2 + 1/d_3)}}$$

其中: v_A 、 v_B 分别为 A、B 两个山峰的绕射常数,代入式 (2),可以求出每个山峰的绕射损耗。

然后将这些绕射损耗值叠加作为总的绕射损耗。

绕射传输损耗 L_{dr} 包括自由空间传输损耗 L_f 和绕射损耗 L_d 两部分^[4]:

$$L_{dr} = L_f + L_d \quad (5)$$

$$L_f = 32.4 + 20\lg f + 20\lg d \quad (6)$$

1.2 对流层散射传播

对流层散射传播机制主要包括湍流体散射和层反射,湍流体散射主要是指湍流非相干散射,源于大气湍流中随机不相关的偶极子,导致非相干散射。层反射包括不规则层非相干反射和稳定层相干反射两种:不规则层非相干反射是由介电特性不相关(锐变层)引起的不相关反射;稳定层相干反射是介电常数随高度稳定变化形成的相干反射。实际的对流层介质结构中,既有相对稳定的成份,也有随机变动的成份,既有稳定层结构,也有锐变层结构,还有湍流结构,三种机制都是存在的,三者共同作用实现对流层散射传播,即广义散射理论。

超短波与微波均可利用对流层实现超视距散射传

播,低频段(<500 MHz)散射机制主要是靠稳定层相干反射和不规则层非相干反射,随着频率的降低,稳定层相干反射逐渐成为主导;高频段(>500 MHz)散射机制则主要是湍流非相干散射和不规则层非相干反射,随着频率的升高,湍流非相干散射起主要作用^[7]。

1.2.1 湍流体散射

我们谈到对流层散射信道,通常所指的信道模式便是湍流体散射传播模式。散射通信收、发天线主波束在对流层中交汇共同占据的空间称为公共体积,发射站电波经公共体积内不均匀体(称为散射体)对信号的散射作用到达接收站,实现对流层散射超视距传输。

湍流体散射传播信号的突出特点如下:(基于对 C 频段散射信道特性的认识)

1) 湍流体散射传播信道存在巨大的路径传输衰减,在大于 100 km 的距离上长期中值传输损耗超过 200 dB(散射损耗为 60~70 dB),散射接收信号通常为弱信号。

2) 湍流体散射传播信道存在日变化和年变化等慢衰落特性,且随机变化,因而路径传输损耗也是时变的;单频传输信号的快衰落分布类型近似为瑞利分布,C 频段散射信号的衰落深度可达 30 dB。

根据国际电联 CCIR 推荐的第一算法 Zhang 算法计算对流层散射传输损耗,进行链路预计。方法如下^[3]:

$$L_b = M + 30\lg f + 30\lg \Theta + 10\lg d + 20\lg(5 + \gamma H) + 4.343\gamma h \quad (7)$$

其中: f 为工作频率,单位 MHz; d 为通信距离,单位 km; Θ 为散射角,单位 mrad; γ 为大气结构系数, M 为气象参数; H 为最低散射点高度,单位 km。

1.2.2 层反射

层反射传播是指发射站电波经公共体积内的不规则层或水平稳定层对信号的反射作用到达接收站,实现超视距传输。包括稳定层相干反射和不规则层不相干反射。所谓“不规则层”,是在对流层水平平面和垂直平面上垂直的折射指数变化显著的锐变层,这类不规则层对电磁波产生不相关性部分反射;所谓“稳定层”,是指在大气层存在的介电常数的区域性或局部性的水平稳定层不均匀性,这种稳定层可以对电磁波产生强的镜面反射。

层反射传播信号与湍流体散射传播信号相比,主要特点如下^[25]:

1) 层反射传播信号同样存在随机变化的慢衰落及快衰落特性。

2) 中小型不规则层反射的快衰落类型可能接近瑞利衰落,而信号中存在一定分量的稳定层反射时则通常为广义瑞利衰落。层反射信号的衰落深度往往浅于瑞利衰落。

3) 中小型不规则层反射的慢衰落中值电平可能接近湍流体散射信号, 而信号中存在一定分量的稳定层反射时则通常强于湍流体散射信号。

4) 层反射信号也存在多径现象, 与湍流体散射不同的是, 一般为经不同层反射的离散的几根多径; 而湍流体散射传播信号的多径结构往往是连续不可分离的, 主径与副径能量有明显差异。

层反射可能会导致信号增强, 从而影响系统设计。不规则层反射传播相关的基本传输损耗由下式^[5]:

$$L_{ba} = A_{ac} + A_{ad} + A_{at}$$
 (8)

其中: A_{ac} 是天线和不规则传播机制之间的耦合损耗总和, A_{ad} 是与角距相关的损耗, A_{at} 是与时间相关的损耗。具体计算可参考 ITU-R P. 2001-2 建议书附件 D 中不规则层反射模型。

2 传播模式分析

2.1 理论分析

为了验证距离和地形因素对 VHF 超视距通信传播的影响, 在某山区地区选取了 100、150、200 km 链路进行试验, 工作频率为 40~50 MHz。其通信链路路径剖面图如图 4~6 所示。

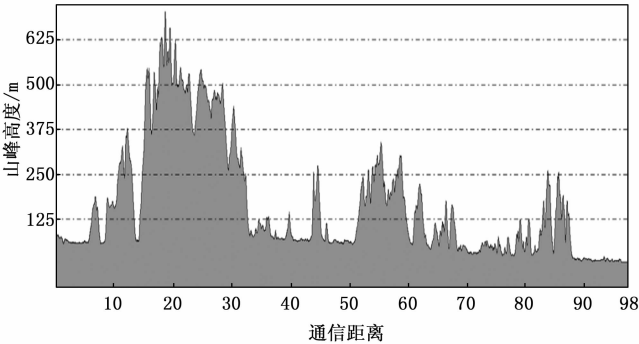


图 4 100 km 通信链路路径剖面图

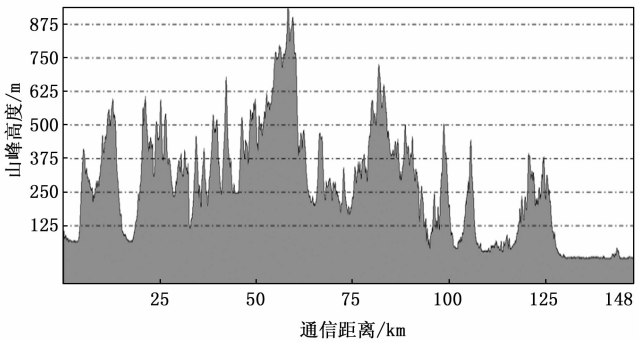


图 5 150 km 通信链路路径剖面图

从三条通信链路的通信距离和剖面, 初步判断电波传播主要模式既可能是绕射, 又可能是对流层散射, 或者是两种传播模式的混合。为此, 在预测链路传输损耗阶段, 利用绕射传输损耗公式和对流层散射传输损耗公

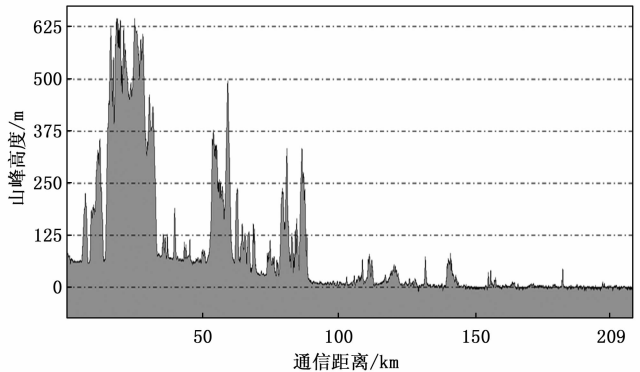


图 6 200 km 通信链路路径剖面图

式分别计算。根据第 1 节绕射损耗和散射传输损耗计算方法, 预测三条通信链路的传输损耗值如表 1 所示。

表 1 链路传输损耗预测值

通信距离 /km	绕射通信模式下的损耗		散射传输损耗 /dB
	绕射损耗/dB	自由空间损耗/dB	
100	52	106	169
150	58	109	173
200	61	112	177

由表 1 可知, 假设通信链路的山峰均为刀刃形山峰, 则:

100 km 通信链路上, 如传播模式仅为绕射传播模式, 则链路传输损耗为 158 dB; 如传输模式仅为散射传输模式, 传输损耗约为 169 dB, 两者传输模式传输损耗相当, 两者相差 11 dB。

150 km 通信链路上, 如传播模式仅为绕射传播模式, 则链路传输损耗为 167 dB; 如传输模式仅为散射传输模式, 传输损耗约为 173 dB, 两者传输模式传输损耗相当, 所以, 在该传输链路路上的接收信号应为两种传播模式的混合形式。

200 km 通信链路上, 如传播模式仅为绕射传播模式, 则链路传输损耗为 173 dB; 如传输模式仅为散射传输模式, 传输损耗约为 177 dB, 两者传输模式传输损耗相当, 所以, 200 km 通信链路应为散射传播模式。

2.2 试验结果分析

在 100 km 通信链路上, 接收信号电平稳定, 约为 -95 dBm, 传输损耗实测值(分钟中值)为 165 dB, 根据表 1 链路传输损耗预测值, 可以看出接收信号能量主要来自绕射。通过分析该链路剖面图, 在距离一端站点约 20 km 地方有较高的山峰, 海拔约 700 m, 具备了构成山峰绕射的条件, 与实际试验现象相吻合。

在 150 km 通信链路上, 接收信号电平存在明显的衰落, 中值电平多分布在 -106~-109 dBm, 传输损耗实测值(分钟中值)为 176~179 dB, 根据表 1 链路传输损耗预测值, 可以看出接收信号能量为绕射、散射

混合传播模式,以散射传播模式为主。接收电平表现为典型的二径模式,即层反射传播模式,接收电平呈现“车轮”变化,车轮的频率和幅度随时间变化,电平分钟中值在一个范围内波动,这与预测值相符。

在 200 km 通信链路上,接收信号电平存在明显的衰落,中值电平多分布在 $-112 \sim -116$ dBm,衰落幅度高达十几 dB,传输损耗实测值(分钟中值)为 $182 \sim 186$ dB,根据表 1 链路传输损耗预测值,可以看出接收信号能量主要来自对流层散射的天波信号。

2.3 小结

通过试验数据分析,得出如下结论。

1) 距离对传播模式的影响:

从传输损耗来看,100 km 以内,以绕射传播为主,100~150 km,信道类型以绕射、散射混合为主,150 km 以上,以对流层散射传播为主。

2) 频率对传播模式的影响:

绕射损耗的大小与频率成正比,频率越低,绕射能力越强,VHF 低频段,绕射传播可扩展至 100 km 以上;VHF 频段对流层散射的层反射传播明显多于 C 频段散射。

3) 地形对传播模式的影响:

主要对绕射模式存在影响。

3 VHF 超视距通信信道特性分析

为了更好地设计通信波形,需要对信道特性进行测试分析,找出变化规律。

3.1 慢衰落特性分析

慢衰落特性主要是指接收信号电平在较长时间(日、年)时间间隔内的起伏变化。一般以振幅中值电平来表征接收信号的慢衰落特性,即在规定的时间内,50%的信号电平低(或高)于的实测电平定义为振幅中值电平。本次试验中,我们以小时级振幅中值电平来分析日变化和年变化。

由于绕射传播为准恒参信道,信号电平较稳定,因此慢衰落特性主要考虑对流层散射传播模式。为了去除绕射分量,研究对流层散射信道慢衰落特性,选取平原地区 300 km 以上链路。针对不同距离对 VHF 频段对流层散射慢衰落特性的影响,选取平原地区 400、500 km 两条链路进行信道测试试验;针对不同季节(对应不同气候条件)对 VHF 频段对流层散射慢衰落特性的影响,对 500 km 链路在春、夏、冬季(秋季与春季类似)分别进行了信道测试试验,工作频率为 40~50 MHz。

3.1.1 日变化

1) 理论分析:

基于对 C 频段散射信道特性的认识,凌晨到早上

的接收信号电平最强,而午时到傍晚的接收信号电平最弱。并且接收信号电平幅度亦与通信距离有关,距离越远,振幅变化越小。

2) 试验结果分析:

信道测试试验 400 km 链路、500 km 链路电平测试曲线分别如图 7、图 8 所示,可以比较明显地看出 VHF 频段对流层散射信道的日变化规律,早晨电平较高,下午电平较低,这点和 C 频段信道特性类似,但是 VHF 频段傍晚到凌晨电平也较低,与 C 频段略有不同。在距离对振幅变化的影响方面,500 km 链路的电平中值变化幅度小于 400 km 链路的电平中值变化幅度,这一点与 C 频段散射信道特性一致。

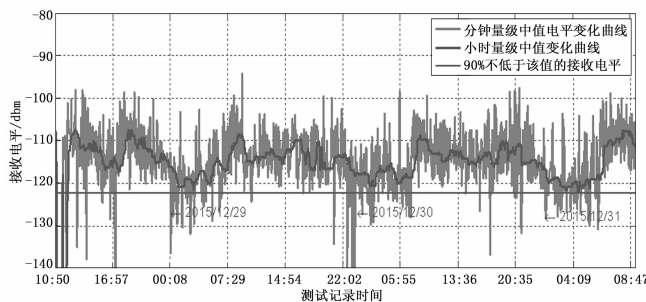


图 7 400 km 链路接收电平统计结果

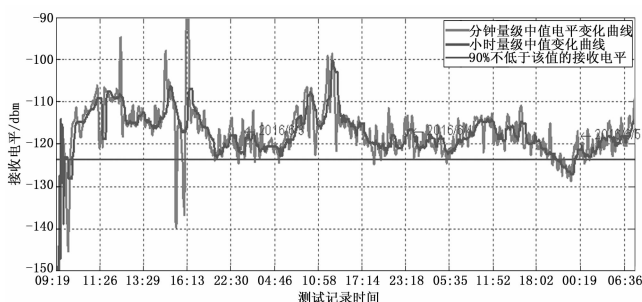


图 8 500 km 链路接收电平统计结果

3.1.2 年变化

1) 理论分析:

信号电平月中值的年变化也叫逐月变化。在我国,信号电平最强的月份约在 6~9 月间,最弱的月份约在 12 月至来年的 4 月间,且冬季电平变化范围高于夏季电平变化范围。

2) 试验结果分析:

对 500 km 链路在春、夏、冬季的信道测试试验结果显示:春季(6 月)的接收信号小时级中值电平变化范围为 $-100 \sim -128$ dBm;夏季(8 月)接收信号小时级中值电平变化范围为 $-105 \sim -124$ dBm;冬季(12 月)接收信号小时级中值电平变化范围为 $-108 \sim -130$ dBm。

可以看出,6 月和 8 月的信号电平明显高于 12 月,

且电平变化范围也小于 12 月, 与相关资料给出的规律一致。

3.2 快衰落特性分析

快衰落是指在一个足够短的时间间隔(如几秒钟、1 分钟、几分钟)内接收信号电平的起伏变化。对流层散射的快衰落是由多径效应引起的, 服从瑞利分布。由于公共体积中存在大量大小不同的散射体, 每一个散射体都是一个二次辐射波源, 向四周辐射电磁波, 所以到达接收点的无线电波射线数以千计(即造成了多径传播), 并且达到接收点的每根射线的相位和振幅都各不相同, 结果使接收点合成场强起伏变化, 呈现快衰落, 这就是所谓的多径效应。这种快衰落常常是叠加在慢衰落之上的。一般用衰落深度、衰落持续时间、衰落速率来表征快衰落特性。

3.2.1 衰落深度

1) 定义:

衰落深度是指时间 T 内 50% 时间被接收信号电平超过的电平值 $E_{0.5}$ (接收信号电平中值), 减去时间 T 内 90% 时间被接收信号电平超过的电平值 $E_{0.9}$ 。

瑞利分布的衰落深度 $R_0 = E_{0.5} - E_{0.9} \approx 8.2 \text{ dB}$; 衰落幅度 $= E_{0.1}$ (定义为时间 T 内 10% 时间被接收信号电平超过的电平值) $- E_{0.9} \approx 13.4 \text{ dB}$ 。若衰落深度 $< 8.2 \text{ dB}$, 衰落幅度 $< 13.4 \text{ dB}$, 则是广义瑞利衰落; 若衰落深度 $> 8.2 \text{ dB}$, 衰落幅度 $> 13.4 \text{ dB}$, 则是瑞利矢量加反常随机矢量型衰落。

2) 理论分析:

信道的衰落深度与信道的衰落类型(瑞利、莱斯、准恒参信道)存在对应关系, 通过信道衰落类型可映射得出信道的传播模式。如瑞利信道条件下该值为 8.2 dB , 莱斯因子 $k=15$ 时对应的衰落深度为 2.3 dB 。

衰落深度为 8.2 dB 时, 即莱斯因子 $k=0$ 时认为是瑞利信道。纯散射信道即为瑞利信道; 衰落深度位于 2 到 8.9 dB 之间, 信道莱斯因子 k 位于 0 到 15 之间, 不同莱斯因子对应的信道衰落深度值。纯散射信道与绕射等准恒参混合的信道即为莱斯信道; 衰落深度小于 2 dB , 信道莱斯因子 k 大于 15。绕射信道即为准恒参信道。

3) 试验结果分析:

从衰落深度的角度验证不同距离对 VHF 超视距传播模式的影响, 在平原地区, 选取 150、200、400 和 500 km 四条链路进行信道测试试验, 工作频率为 40~50 MHz。

表 2 给出了不同距离的测试链路按照衰落深度计算的莱斯因子所占比例表^[9]。

分析表 2 所示莱斯因子所占比例的信道统计结果, 可以看出 150 km 以下, 信道类型以绕射、散射混合为

表 2 测试链路衰落深度统计分布表

测试距离/km	不同信道类型所占比例/%			信道类型
	莱斯因子>15	莱斯因子 4~15	莱斯因子 0~4	
150	13	27	61	混合
200	2	19	79	散射
400	2	5	93	散射
500	<1	<1	99	散射

主; 200 km 以上, 信道类型以散射为主; 400 km 以上, 90% 以上概率的莱斯因子小于 4, 也就是信道基本为纯对流层散射信道, 并且距离越远, 散射分量越大。

3.2.2 衰落速率与衰落持续时间

1) 定义:

衰落速率是指单位时间内信号电平以正斜率通过中值电平上的次数。

衰落持续时间是指在快衰落时间范围之内, 独立存在的低于中值电平的时间段 τ_i , 在一段统计时间内, 它由多个随机变量组成。

2) 理论分析:

C 频段对流层散射 200 km 链路的衰落速率统计值为 $0.26 \sim 7.77 \text{ Hz}$, 衰落持续时间统计值为 $0.06 \sim 1.92 \text{ s}$ 。

3) 试验结果分析:

为验证衰落速率与衰落持续时间的变化范围, 在平原地区, 选取 200、400、500 和 525 km 四条链路进行信道测试试验, 工作频率为 40~50 MHz。

测试链路衰落速率和衰落持续时间测试结果如表 3 所示, 可以看出, 实测值与理论值基本一致。

表 3 衰落速率和衰落持续时间测试结果

测试距离/km	理论值	实测结果				
	200	200	400	500	525	
衰落速率范围/Hz	0.26~7.77	0.5~9	0~8.2	0~7	0~9	
衰落持续时间范围/s	0.06~1.92	0~0.15	0~0.15	0~0.7	0~0.23	

3.3 小结

通过试验数据分析, 得出如下结论。

1) 慢衰落特性。

日变化: VHF 频段对流层散射信道的日变化规律, 早晨电平较高, 下午电平较低, 这点和 C 频段信道特性类似, 但是 VHF 频段傍晚到凌晨电平也较低, 与 C 频段略有不同; 对流层散射传播时, 距离越远, 信号电平幅度变化越小。

年变化: 6 月和 8 月的信号电平明显高于 12 月, 且电平变化范围也小于 12 月, 年变化也揭示了气候对传播模式的影响, 主要对散射模式存在影响。

2) 快衰落特性。

从衰落深度来看, 150 km 以下, 信道类型以绕射、散射混合为主; 200 km 以上, 信道类型以散射为主; 400 km 以上, 90% 以上概率的莱斯因子小于 4, 也就是信道基本为纯对流层散射信道, 并且距离越远, 散射分量越大。

VHF 频段对流层散射衰落速率与衰落持续时间的变化范围与 C 频段基本一致。

4 结束语

VHF 超视距通信信道主要包含地波绕射、对流层散射, 而低频段对流层散射与常用的 C 频段对流层散射也有所不同, 除湍流散射外, 还有层反射和偶发的大气波导。基于 VHF 超视距传播模式的复杂性, 本文首先给出了绕射、散射和层反射传输损耗的计算方法, 并与典型距离典型季节和典型地形环境的信道测试试验数据进行对比分析: 为了验证距离和地形因素对 VHF 超视距通信传播的影响, 在某山区地区选取了 100、150、200 km 链路进行试验; 针对不同距离对 VHF 频段对流层散射慢衰落特性的影响, 选取平原地区 400、500 km 两条链路进行信道测试试验; 针对不同季节(对应不同气候条件)对 VHF 频段对流层散射慢衰落特性的影响, 对 500 km 链路在春、夏、冬季(秋季与春季类似)分别进行了信道测试试验, 参考 C 频段对流层散射信道特性, 给出了 VHF 超视距通信信道的日变化、年变化规律; 为了从衰落深度的角度验证不同距离对 VHF 超视距传播模式的影响, 选取平原地区 150、200、400 和 500 km 四条链路进行信道测试试验; 为验证衰落速率与衰落持续时间的变化范围, 选取平原地区 200、400、500 和 525 km 四条链路进行信道测试试验, 最终得出了距离、频率、地形、气候等参数对传播模式的影响, 并基于实测数据分析信道快衰落与慢衰落特性, 给出了 VHF 超视距信道特性变化规律。试验结论受限于实测样本规模, 存在一定局限性, 后续将通过曲线拟合等方式加以完善, 为通信系统设计提供更准确的信道模型。

在 VHF 频段超视距通信系统设计时, 可利用低频段(30~88 MHz)的强绕射优势, 开发非规则地貌下的自适应刃峰绕射算法, 提升复杂地形覆盖能力; 设计散射—绕射联合波形, 实现绕射信道下中短距离可靠传输, 拓展散射信道下远距离大容量链路, 突破 VHF 频段传统单模传输距离瓶颈。

参考文献:

- [1] 刘圣民, 熊兆飞. 对流层散射通信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [2] 张明高. 对流层散射传播 [M]. 北京: 电子工业出版社,

2004.

- [3] 中国人民解放军总参谋部通信部. 对流层散射远距离通信 [M]. 北京: 中国人民解放军战士出版社, 1982.
- [4] 李志勇, 秦建存, 梁进波. 对流层散射通信工程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [5] REC. ITU-R P. 617 - 5, Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems. Recommendation ITU-R P. 617 - 5 [S].
- [6] REC. ITU-R P. 526 - 13, Propagation by diffraction. Recommendation ITU-R P. 526 - 13 [S].
- [7] 张洋, 毛忠阳, 刘锡国, 等. 海上超短波超视距对流层散射信道模型研究 [J]. 电波科学学报, 2022, 37 (2): 238 - 243.
- [8] 刘利强, 宋志群, 陈大勇. 山区通信中单刃峰绕射损耗的工程化近似模型 [J]. 无线电通信技术, 2015, 41 (1): 24 - 27.
- [9] 孙柏昶, 林增涛. U/V 超视距通信信道分析与系统设计 [J]. 无线电通信技术, 2019, 45 (3): 258 - 261.
- [10] 赵玉超, 秦建存, 刘丽哲. 对流层散射通信传输损耗预计方法分析 [J]. 无线电工程, 2013, 43 (3): 62 - 64.
- [11] 任香凝, 王伟, 庞博. 超短波联合超视距通信技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2013, 39 (4): 18 - 21.
- [12] 任香凝, 王伟, 庞博. Es 层超视距通信调制解调技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2013, 39 (3): 39 - 42.
- [13] 腾黄龙, 杨涛. VHF 在超视距和不规则地形条件下多径特性研究 [J]. 移动通信, 2019, 43 (6): 66 - 70.
- [14] 康欣, 曹仲晴. 对流层散射超视距通信传播信道分析 [J]. 无线电通信技术, 2015, 41 (2): 35 - 37, 96.
- [15] 李引凡. 对流层散射传播机制与特性分析 [J]. 空间电子技术, 2010, 7 (1): 1 - 4.
- [16] 张贤达, 保铮. 通信信号处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [17] PROAKIS J G. 数字通信 (4 版) [M]. 张力军, 张宗橙, 郑宝玉, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [18] 李志勇, 李文铎. 对流层散射通信时间分集技术研究 [J]. 无线电工程, 2013, 43 (12): 17 - 20.
- [19] 赵利. 超短波超视距通信的一种设计方法 [J]. 电子质量. 2021, 410 (5): 15 - 20.
- [20] 陈玮, 秦建存. 流星余迹通信中的智能天线技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2008, 34 (6): 25 - 28.
- [21] 王斌, 李文铎. 数字化失真自适应调制解调器的实现 [J]. 无线电通信技术, 2000, 26 (3): 1 - 4.
- [22] 陈玮. 基于 GUIDE 的 U/VHF 超视距信道测试统计软件 [J]. 无线电工程, 2014, 44 (5): 64 - 67.
- [23] 金明岩, 桑林. 无线网络规划中绕射损耗算法的分析 [J]. 现代电信科技, 2012, 7 (7): 32 - 37.
- [24] 王洪磊, 王伟. 基于分集技术的低速调制解调器设计分析 [J]. 无线电工程, 2011, 41 (11): 58 - 60.