

跨海微波超视距远距离传播试验研究

唐舟江

(中海油信息科技有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524000)

摘要 海上高速超视距无线通信是通过蒸发管道实现的。导管通道的详细测量、分析和建模对于这种通信技术的应用至关重要。在本文中, 开发并部署了X波段电磁波传播系统, 用于南海沿岸133km的超视距微波链路, 传播长度是视线长度的7.7倍, 包括路径损耗(PL)和气象数据在内的测量结果是在2021年秋季的54天期间获得的。在统计分析和模型模拟的基础上, 对长期信道结果进行了分析。结果表明, 测量系统最大可测量功率损耗为200dB, 在测量期间连接的概率为56.2%。模型模拟表明, 秋季的蒸发管道环境并不理想, 平均蒸发管道高度(EDH)为10.6m。秋季的陆风将干燥和冷空气引入连接, EDH的年时空特征表明, 蒸发通道最适合春季, 尤其是5月的跨海通信。

关键词 跨海微波; 超视距; 远距离传播

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)08-0094-03

随着海上石油开采应用的迅速发展, 对新型海上宽带远程通信技术的需求急剧增加。由于海水蒸发, 在大气表层形成蒸发通道。蒸发导管的行为就像波导管一样, 会对微波仪器产生巨大影响, 尤其是那些在C波段和X波段工作的微波仪器。蒸发导管会导致信号衰减减弱, 可用于实现远程海上宽带通信。蒸发管已被用于建立多个超高频海上宽带微波链路。

1 数据和和方法

1.1 测量活动

在南海上空建立了为期54天的长期超视距微波传播链路。测量于2021年9月20日至11月22日进行, 10月1-10日系统关闭时中断。专门开发了X波段EM传播系统, 可以全天运行, 自动记录传播特性的数据。记录了PL数据和风速(wS)、气温(AT)、相对湿度(RH)和气压(AP)等气象参数。对于本研究中使用的测量数据, 接收器(Rx)部署在海南省测试点(S1), 发射器(Tx)部署在海南测试点(S2)。传播链路的长度约为133km。对于本次测量中的天线高度, 在标准大气中, 视距为 $D=4.12 \times (\sqrt{h} + h) = 4.12 \times (\sqrt{6} + \sqrt{3}) = 17.2\text{km}$, 其中h为Tx高度, h为Rx高度。链路长度大约是视线长度的7.7倍。P1、P2、P3和P4是沿传播链路的重新分析气象数据网格点, 用于模拟分析。

为了统计分析这种超视距链路的可连接概率, 并为其他电磁学系统提供参考, 使用系统参数和以下方

程, 从RSL转换PL: $PL = P_t + G_t + G_r - SL - RSL$ 。其中, P是Tx功率(42dBm), G_t是Tx天线增益(7dBi), G_r是Rx天线增益(20dBi)。P是Rx放大器增益(30dB), SL是系统损耗(10dB), RSL(dB)是接收信号电平。

1.2 再分析数据

再分析数据用于确定气象参数的变化, 并模拟长期均匀蒸发管道环境, 用于分析超视距电磁传播。本研究使用了ECMWF ERA5数据, 这是ECMWF全球气候和天气产品的第五代, 时间覆盖范围从1979年到现在。ERA5数据集的时间分辨率为1小时, 水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。ERA5数据已被广泛使用, 并被验证适用于研究蒸发管道分布。提取2m高度的AT、10m高度的AP、WS、1000百帕的RH和海面温度(SST)的参数, 以模拟测量过程中的EDH分布^[1]。

1.3 蒸发管道模型

由于海洋蒸发管道的捕获效应, 大气微波频率通常会遇到长程传播机制。电磁辐射在大气中的传播取决于空气的折射率n, 由于压力、温度和水蒸气含量的变化, 空气在对流层中的折射率会发生变化。折射率n是传播介质的电学性质, 定义为真空中的光速C₀和通过介质的波的速度V之间的关系。对于无线电波, 对流层的折射率是基于德拜理论给出的:

$$n = \frac{C_0}{V} = 1 + \frac{77.6}{T} \times (p + \frac{4810e}{T}) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, T (K) 表示空气温度, P (hPa) 表示总大气压力, e (hPa) 表示水蒸气的分压。水蒸气的分压 e 可以使用以下方程从比湿度导出:

$$e = \frac{qp}{\epsilon + (1-\epsilon)q} \quad (2)$$

其中 q (kg/kg) 表示比湿度, c 是干燥空气的单个气体常数与水蒸气的单个气体常量的比值。

在对流层中, 折射率在 1.000250 到 1.0000400n 单位之间变化。由于它非常接近一, 对流层的折射率由一个称为无线电折射率 N 的量表示, 该量由下式给出:

$$N = (n-1) \times 10^6 = \frac{77.6}{T} \times (P + \frac{4810e}{T}) \quad (3)$$

在管道条件下, EM 传播被折射到地球表面, 从而被困在一层中。为了确定这些条件, 通常使用考虑地球表面曲率的量修正折射率 M 。修正折射率由以下公式定义:

$$M(z) = N + \frac{z}{r_e 10^6} \approx N + 0.157z \quad (4)$$

其中 r_e (m) 是地球的半径, z (m) 则是海拔高度。在垂直斜率为 M 的负区域, EM 传播向表面折射, 并可能被困在泄漏的大气管道中^[2]。本研究使用 NAVSLaM 来诊断蒸发管道分布。

如方程 (3) 和 (4) 所示, 需要水蒸气剖面的压力、温度和部分压力来计算 M -剖面。NAVSLaM 模型从以下方程中得出这些轮廓:

$$T(z) = T(z_{0\theta}) + \frac{\theta}{k} [\ln(\frac{z}{z_{0\theta}}) - \psi_h(\frac{z}{L})] - \Gamma_d z \quad (5)$$

$$q(z) = q(z_{0q}) + \frac{q_s}{k} [\ln(\frac{z}{z_{0q}}) - \psi_h(\frac{z}{L})] \quad (6)$$

$$P(z_2) = P(z_1) + \exp(\frac{g(z_1 - z_2)}{RT_v}) \quad (7)$$

其中 $T(z)$ 和 $q(z)$ 是海面上方任意高度 z 处的温度和比湿度。 $z_{0\theta}$ 和 z_{0q} 分别表示称为温度和比湿粗糙长度的积分常数。 θ 和 q_s 分别是 Monin-Obukhov 温度和比湿度标度参数。 $z_{0\theta}$ 、 z_{0q} 、 θ 的值和 q_s 使用 TOGACOARE3.0bulkflux 算法计算 (Fairall 等人, 2003)。 K 是 vonKarman 常数。 T 是非绝热失效率。 L 是奥布霍夫长度。 w 表示温度函数。 g 、 R 分别对应于重力加速度和气体常数。 T 是 z 和 z_2 的虚拟温度高度的平均值^[3]。

将处理后的 ERA5 数据输入 NAVSLaM, 然后获得测量期间蒸发管道的分布。

1.4 路径损耗模型

对于自由空间微波传播, PL 可以使用以下方程通过自由空间损耗来表示:

$$PL_{P_{SL}} = 32.44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}d \quad (8)$$

其中 $PL_{P_{SL}}$ 是自由空间 PL (dB), f 是信号频率 (MHz), d 是传播距离 (km)。

对于海洋环境, 不能忽略来自海面的反射, 可以使用 2-射线模型对 PL 进行建模。垂直偏振波的反射系数接近 -1, 并且可以简化 2-射线 PL 模型如下:

$$PL_{2\text{-ray}} = -10 \log_{10}([\frac{\lambda}{4\pi D}]^2 [2 \sin(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda D})]^2) \quad (9)$$

其中 $PL_{2\text{-ray}}$ 射线是 2-射线 PL (dB), λ 是波长 (m), D 是传播距离 (m), h_t 是 Tx 高度 (m) 以及 h_r 是 Rx height (m)。

微波在海面上的远距离传播受到管道捕获机制的极大影响。抛物方程 (PE) 方法已被广泛用于预测球面中的 EM 传播。标准 PE 可以从亥姆霍兹方程中获得:

$$\frac{\partial^2 u(x, z)}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} + k_0^2 [M^2(x, z) - 1] u(x, z) = 0 \quad (10)$$

其中 u 是电场的标量分量, z 是高度, x 是范围, k_0 是自由空间波数, M 是修正折射率。参数 u 由 PE 的傅立叶分步解给出, 如下所示:

$$u(x_{k+1}, z) = \exp(i \frac{k_0}{2} (M^2(x_k, z) - 1) \delta x) \times F^{-1} \{ \exp(-i \frac{p^2 \delta x}{2k_0}) F\{u(x_k, z)\} \} \quad (11)$$

其中 F 和 F^{-1} 分别是傅立叶变换和傅立叶逆变换, p 是变换变量, δx 是范围增量。关于傅立叶分步 PE 解决方案的更多详细信息可以在 Goldhirsh 和 Dockery 中找到。由 PE 场函数 u (PL_{PE}) 表示的 PL 可以计算如下:

$$PL_{PE} = -20 \log_{10} |u(x, z)| + 20 \log_{10}(4\pi) + 10 \log_{10}(x) - 30 \log_{10}(\lambda) \quad (12)$$

此外, APM 已在不同的管道环境中广泛使用和测试。在本研究中, 使用 APM 来模拟蒸发管道不均匀性对 EM 传播的影响^[4]。

2 测量分析

2.1 测量数据

电磁传播系统和自动气象站已部署在南海沿岸地区。这些系统需要频率为 9.4GHz 的 133km 超高频链路的 PL 以及 AP、RH、WS 和 at 的大气参数的连续数据。2021 年秋季测得的 PL (788806 点)。PL 数据波动很大, 甚至 60dB 也从 205dB 降至 145dB, 并且表现出强烈的

日变化。根据气象站对2021年9月20日至11月22日,南海上空133公里链路的观测PL数据统计,对于133公里的链路(视线长度的7.7倍),超视距传播通常发生在不同的传输环境中。

根据气象站2021年9月20日至11月22日海南S1和海南S2观测到的大气参数,显示了安装在S1和S2的自动气象站测量的AP、RH、WS和at的时间演变。从气象站数据可以看出,大气参数也随时间波动很大,受监测的AP在这两个位置上是相似的。RH和AT分别表现出强烈的昼夜变化特征中RH变化很大,低至23%,高达98%。通常,RH白天低,晚上高,这可能主要归因于光照。AT也表现出强烈的日变化,白天温度高,晚上温度低。9月、10月和11月测得的AT平均值分别为23.3、6.2和11.5摄氏度,显示出向冬季下降的总体趋势。从气象站大气参数可以看出WS的变化也很大,低至0m/s,高至20m/s,这将对海水的蒸发产生显著影响。总体而言,记录了大量的测量数据,PL和气象参数都发生了显著变化。

2.2 测量PL的统计特性

对于系统容量为190dB的通信系统,在测量期间,南海133公里以上的可用信号概率约为31.3%。对于实时通信系统,这种可用信号概率显然不能满足要求;然而,可以通过缩短传播距离或增加通信系统能力来提高跨水平通信能力。对于准实时通信系统,如观测浮标,当EDH高时,可以在更好的通信环境中实现超视距通信,从而实现小的PL和大的吞吐量^[5]。

2.3 测量期间的蒸发管道气候学

使用ECMWFERA5再分析数据获得了测量期间的蒸发管道分布。EDH在测量期间变化很大。然而,沿链路不同位置的EDH差异很小,这反映了水平不均匀性的特征。秋季PL分布基本相同的原因是气候条件基本相同,这导致EDH的分布相似。9月的平均EDH为11.5m,10月为11.1m,11月为9.9m。海洋上空EDH的变化主要来自四个环境参数的变化:SST、AT、RH和近表面WS。环境参数有规律的月变化导致EDH的月变化是普遍的,除非在某些极端天气条件下。测量期间P3处的EDH平均值为10.6m,这是相对较低的,这导致在秋季通过超视距链路进行通信的可能性很小。在测量期间,EDH大于5m、10m和15m的概率分别为97.2%、50.7%和11.9%。

2.4 管道效果和模型评估

本节分析了蒸发管道对超水平传播链路的影响。NAVSLaM使用ERA5数据计算的M-剖面被输入到AM中,以模拟测量期间的PL。站点P4、P3、P2和P1的数据被用作模型的输入。为了清晰起见,以11月的结果为例,研究蒸发管道对水平链路的影响。结果表明,使用这两种方法获得的结果是一致的。射线强烈地向地球折射,然后从地球表面反射,又折射回来。换句话说,射线被捕获,导致相对于正常大气,水平面以外的PL较低。在20km处,PL减弱了129dB。120km处的PL约为142dB,比20km处的PL高出13dB。PL指数约为1.709。

3 结语

本文介绍了2021南海蒸发管道中微波过高频传播的长期测量结果。在统计分析和模型模拟的基础上对结果进行了分析。得出的结论如下。

1. 对于133km长的链路(视线长度的7.7倍),在测量期间PL小于200190和180dB的概率分别为52.6%、31.3%和18.5%。

2. 使用ECMWFERA5再分析数据和NAVSLaM获得的EDH在测量期间大于5m、10m和15m的概率分别为97.2%、50.7%和11.9%。模型预测方法不可靠,当EDH过低或过高时会产生一些极值。

3. 秋季的陆风会将干燥和冷空气引入链路,它可以促进海水蒸发,并将PL降低约40dB。在测量期间,WS的增加和RH的降低是EDH增加和PL降低的主要原因。

4. 在南海,蒸发管道最适合在春季,尤其是五月进行超视距通信。

参考文献:

- [1] 赵强,杨利霞,郭相明,等.南海地区海上微波超视距传播试验研究与机理分析[C]//中国电子学会电波传播分会.第十七届全国电波传播年会会议论文集,2022.
- [2] 刘成国,熊得安,段开源,等.海上微波超视距传播试验研究[J].电波科学学报,2022,37(02):214-221.
- [3] 汤华涛,蔡豪,田斌,等.微波超视距雷达组网探测范围研究[J].电波科学学报,2022,37(02):274-278.
- [4] 康士峰,郭相明.电波环境及微波超视距传播[J].微波学报,2020,36(01):118-123.
- [5] 钟志明.超远距离海陆微波在海上油气田的研究与应用[J].电子技术与软件工程,2014(20):44.