

文章编号: 1000-2022(2003) 05-0631-07

大气波导形成条件及传播路径模拟

官 莉, 顾松山, 火焰, 胡 胜, 陈钟荣

(南京气象学院 电子工程系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 推导了可形成波导传播的电磁波最大陷获波长和临界发射仰角, 介绍了电磁波可形成波导传播的必要条件, 在此基础上建立了在大气波导层中电磁波传播路径模式, 并利用南京雷达实际观测的超折射回波对此模式进行了验证, 所得结果比较一致。

关键词: 大气波导; 形成条件; 传播路径; 超视距

中图分类号: P406 **文献标识码:** A

人们在利用雷达进行探测时, 经常会发现一些电磁波的异常传播。其中一种显著的现象是: 在一定的天气条件下, 在大气边界层尤其是在近地层中传播的电磁波, 受大气折射的影响, 其传播轨迹弯向地面, 当曲率超过地球表面曲率时, 电磁波会部分地被陷获在一定厚度的大气薄层内, 就象电磁波在金属波导管中传播一样, 这种现象称为大气波导传播, 形成波导传播的大气薄层称为大气波导层^[1]。大气波导现象使得雷达有可能观测到数倍于雷达正常探测距离外的目标, 实现所谓超视距探测和超视距接收^[2-3], 并且大气波导可增加雷达测距、测角、测速的误差, 使雷达探测出现大面积盲区。大气波导现象经常会将雷达正常探测条件下不可能出现在雷达显示屏上的远处的陆地杂波或海面杂波等显示出来, 从而大大增加了雷达杂波信号分布范围, 降低了雷达的检测分辨性能。大气波导存在与否对短波通信的影响也很大^[4], 因此充分研究大气波导现象及其对电磁波传播的影响具有广阔的应用前景。本文将在前人研究的基础上, 给出电磁波可形成波导传播的四个必要条件, 并对电磁波的传播路径进行模拟。

1 大气波导

1.1 形成超折射的天气条件

影响大气环境中的电磁波传播特性的主要天气因子是大气折射指数。大气折射指数 n 与大气温度 T (单位: K)、大气压力 p (单位: hPa) 和水汽压 e (单位: hPa) 之间的关系式为^[5]

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \frac{A}{T}(p + \frac{Be}{T})。 \quad (1)$$

其中 A, B 是通过实验方法确定的系数, $A = 77.6, B = 4810, N$ 为折射指数的 N 单位。

收稿日期: 2002-12-04; 改回日期: 2003-03-03

基金项目: 中国气象局 新一代多普勒天气雷达资料应用 ”

作者简介: 官 莉 (1973-), 女, 新疆库尔勒人, 讲师, 博士生, 研究方向: 大气遥感探测。

为了将地球表面处理成平面,通常使用进行了地球曲率订正的大气订正折射指数 m 和订正折射指数的 M 单位

$$M = \left[\frac{h}{R_m} + (n - 1) \right] \times 10^6 = N + \frac{h}{R_m} \times 10^6. \quad (2)$$

h 为地表以上高度(单位: m), $R_m = 6.371 \times 10^6$ m 为平均地球半径。

将式(1)、(2)中各物理量对高度 h 求偏导数可得

$$\frac{\partial N}{\partial h} = \frac{A}{T} \frac{\partial \rho}{\partial h} - \frac{A}{T^2} (p + 2 \frac{Be}{T}) \frac{\partial T}{\partial h} + \frac{AB}{T^2} \frac{\partial e}{\partial h}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial h} = \frac{\partial N}{\partial h} + 0.157. \quad (4)$$

当超短波射线的绝对曲率 $k = -\frac{dn}{dh}$ 大于或等于地球表面的绝对曲率时的折射,称为超折射,由此可看出产生超折射所必须满足的 N, M 条件: $\frac{dM}{dh} > 0$, 即 $\frac{dN}{dh} > -15.7 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$, 通常在实际大气中 $\frac{\partial \rho}{\partial h} < 0$, 若 $\frac{\partial T}{\partial h} > 0$ 和 $\frac{\partial e}{\partial h} < 0$, 则式(3)等式右边三项均为负值,就有利于满足产生超折射所要求的条件: 逆温愈显著及水汽压随高度减少愈迅速,愈易形成超折射。这时由于射线的绝对曲率大于地球表面的绝对曲率,故射线将弯向地面,经地面反射后继续向前传播,这种过程的多次重复,使射线在地面和某一大气层之间滚轮式地向前传播。使电磁波产生超折射的大气层称为大气波导层。

1.2 避开超折射层的雷达最小临界发射仰角 $(\varphi)_{\min}^l$

按射线定义,超折射犹如光的折射超过临界折射时会发生全反射一样,超折射也是一种反射现象。由于超折射现象的存在会导致产生超折射回波,使原来雷达探测不到的目标物在雷达荧光屏上显示出来,增加了雷达探测的极限距离,这是有利的一面。但是由于这种现象的存在,会增加雷达探测误差,特别是测高误差,最好能知道为了避开超折射层应具有雷达临界发射仰角。

大气折射指数的垂直分布与超短波传播路径和地球平面的夹角 φ 之间满足如下关系^[5]

$$\frac{1}{2} \varphi^2 - \frac{1}{2} \varphi_0^2 = (M - M_0) \times 10^{-6}. \quad (5)$$

雷达天线所在高度为 h_0 , 在 h_0 高度上传播路径与地球平面的夹角为 φ_0 , 折射指数为 n_0 , φ 为 h 高度上传播路径和地球平面的夹角,用 M_h 代替(5)式中的 M , 则

$$\frac{1}{2} \varphi^2 - \frac{1}{2} \varphi_0^2 = (M_h - M_0) \times 10^{-6}. \quad (6)$$

M_h 和 M_0 分别是 h 高度(波导高度)和地面上的 M 值。如果电磁波发射源位于地面,并在波导顶处发生全反射(图 1), 假设位于大气波导内的电磁波发射源向上以仰角 φ 发射的电磁波入射到波导层内某一高度时产生折射,当发射仰角降低到最小临界发射仰角时,可使临界折射角为 $\frac{\pi}{2}$, 即 $\varphi = 0$, M_h 即为 M_{\min} , 因此式(6)改写为^[6]

$$(\varphi)_{\min} = [2(M_0 - M_{\min}) \times 10^{-6}]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2 \times 10^{-6} \Delta M}. \quad (7)$$

其中 M_{\min} 为 h 高度上,也即超折射层顶部的 M 值, ΔM 为波导强度。必须指出,在推导此公式时,把超折射视作射线,但实际情况是发射的超短波具有一定的波束宽度,避开超折射层的雷达最小临界发射仰角应为 $(\varphi)_{\min}^l = \frac{1}{2} \theta + (\varphi)_{\min}$, θ 为垂直波束宽度。当发射仰角小于临界仰

角时, 电磁波易形成波导传播。

1.3 可形成波导传播的电磁波波长范围

当边界层大气中存在大气波导时, 在边界层大气中传播的电磁波却不一定能形成波导传播, 因为在特定气象条件下产生的大气波导能否将在大气中传播的电磁波捕获到波导层中形成波导传播还要取决于该电磁波的波长(频率)、发射源与大气波导所处的相对位置以及发射源的发射角度。

根据对流层折射的模理论, 在大气中传播的电磁波若要形成波导传播, 其波长与大气波导厚度及大气折射指数梯度三者之间必须满足一定的关系。假定波导层内的大气折射指数沿高度线性递减, 即波导层内 $\frac{dN}{dh}$ 的为小于 -0.157 的一个负值常数, 若电磁波在波导底以一定的仰角射入波导层形成波导传播, 假定地面的大气折射指数 $n_s = 1.0$, 可以推导出地面发射的水平极化的电磁波能形成波导传播的最大波长 $\lambda_{h \max}$ (单位: m) 与波导厚度 d (单位: m) 及波导层内的大气修正折射指数垂直梯度 $\frac{dM}{dh}$ 之间的关系为^[7]

$$\lambda_{h \max} = 2.5 \times 10^{-3} \left(-\frac{dM}{dh}\right)^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

由式(8)可知: 大气波导厚度远大于电磁波波长时, 才能捕获电磁波形成波导传播; 大气波导的厚度愈厚, 可形成波导传播的电磁波波长范围的上限愈长; 大气波导的强度愈强, 可形成波导传播的电磁波波长范围的上限愈长。式(8)中给出的是可受大气波导影响而形成波导传播的电磁波最大波长(对应的频率为最低陷获频率), 波长小于该最大值范围(频率高于该最小值范围)内的电磁波均可受大气波导的影响。常见的 X 波段、C 波段、S 波段天气雷达发射和接收的电磁波是很容易受大气波导影响而形成波导传播的。

1.4 电磁波形成波导传播的必要条件

综合起来, 边界层大气中的电磁波若要形成波导传播必须满足 4 个基本条件: (1) 近地层或边界层某一高度处必须存在大气波导, 即存在 $\frac{dM}{dh} < 0$ 的大气层结。(2) 电磁波的波长必须小于最大陷获波长 $\lambda_{h \max}$ (频率必须高于最低陷获频率 f_{\min})。(3) 电磁波发射源必须位于大气波导层内。对于抬升波导, 有时电磁波发射源位于波导下方时, 也可形成波导传播, 但此时发射源必须距波导底不远, 并且波导必须非常强。(4) 电磁波的发射仰角必须小于某一临界仰角 $(\varphi_0)_{\min}$ 。

2 超折射回波的特点

由超折射现象所产生的回波称为超折射回波。当大气中发生超折射时, 就会在 PPI(平面位置显示器)上平时无地物回波的距离上出现地物回波。超折射回波实质上仍是地物回波, 只是看到的地物回波的范围扩大了, 数量增加了。在雷达探测中, 超折射条件下在 PPI 上探测到的地物回波有下面几种类型^[5]: (1) 两层模式: 当从近地面开始往上存在一超折射层, 相应的折射指数为 $\frac{dn}{dh} < -15.7 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$, 而在超折射层之上为非超折射层时, 就使得地物回波从本

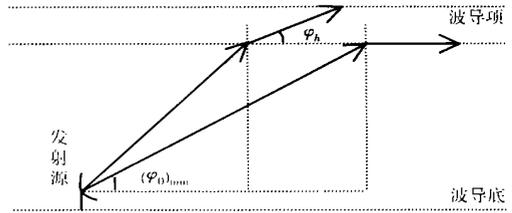


图 1 电磁波形成波导传播的临界角

Fig. 1 Sketch of critical angles for electromagnetic wave propagating in a duct

站开始,较连续地扩展到数 10 km 或更远。(2) 三层模式:测站周围近处出现正常的地物回波,而在远距离处出现一片超折射回波。其相应的层结为:在近地面存在较薄的一层非超折射层,在此层之上有一超折射层,再往上又为非超折射层。(3) 在测站周围数 10 km 内出现大片超折射回波区,在远处也有大片超折射回波区,但在两者之间无地物回波。其相应大气层结由近地面向上依次为:超折射层—非超折射层—超折射层—非超折射层。这种回波比较罕见。

超折射回波还具有明显的日变化和年变化。在大陆上,它多出现在晴朗的夜晚和清晨,尤其在夏季的晴朗夜晚和清晨最易出现大片的超折射回波,而在午后则很少出现,傍晚以后又开始出现,并逐渐增强。

另外在降水减弱或消散阶段也常会出现超折射回波。出现超折射回波时,预示着大气低层或中层存在逆温层,即大气比较稳定。在降水过程中出现超折射回波,预示着对流已减弱,降水即将终止。当大气中逆温层很强,超折射回波一直维持,地面产生的污染气体无法向高空辐射,这就要发布环境污染预报。同时若逆温层被强冷空气入侵而破坏,还可能出现强对流天气。

3 波导内射线追踪分析

考虑到形成波导传播时射线与波导水平边界间夹角一般比较小,且在大气底层大气修正折射指数与大气折射指数都接近于 1,在球面分层介质大气中折射定律为 Snell's 定律^[8]。 $m(h) \cos \theta =$ 常数,利用 $M = (m - 1) \times 10^6$,上式在二阶近似下可得

$$M(h_1) - M(h_2) = \frac{\theta_1^2 - \theta_2^2}{2} \times 10^6. \quad (9)$$

其中 θ_1 、 θ_2 分别为射线在高度 h_1 、 h_2 处与波导水平边界间夹角,单位取弧度。假设大气订正折射指数随高度的变化是线性的,且线性变化率为 r ,则有

$$M(h_1) - M(h_2) = \frac{dM}{dh}(h_1 - h_2) = r(h_1 - h_2). \quad (10)$$

由式(9)、(10)可得射线垂直方向分量方程

$$h_1 - h_2 = \frac{\theta_1^2 - \theta_2^2}{2r} \times 10^6. \quad (11)$$

微分方程为 $r dh = \theta d\theta \times 10^6$ 。若记射线在水平方向的分量为 x ,则有 $\frac{dh}{dx} = \tan \theta$ $\theta, r dx = d\theta \times 10^6$,经积分有

$$x_1 - x_2 = \frac{\theta_1 - \theta_2}{r} \times 10^6. \quad (12)$$

式(11)、(12)就是进行射线追踪的射线方程。

4 个例分析

在江苏省气象台雷达站共收集到 6 次超折射雷达回波,分别出现在 2002 年 7 月 16 日 7 时 44 分、7 月 20 日 7 时 51 分、8 月 11 日 7 时 42 分、8 月 30 日 7 时 41 分、8 月 30 日 22 时 40 分、8 月 31 日 22 时 47 分,基本上都在早上常规开机时观测到,现以 8 月 31 日 22 时 47 分的超折射为例,分析这次大气波导过程。

根据南京探空站的 2002 年 8 月 31 日 20 时的探空资料(表 1),绘出探空曲线(图 2),从图 2 中可以看出:从地面到约 95 m 的高度层为波导层,为表面波导,在这层大气中存在逆温,温度、露点差 $T - T_d$ 逐渐变大,满足形成超折射的温度、水汽条件;而且订正折射指数随高度减

小($\frac{dM}{dh} < 0$), 递减率约为 -0.064 m^{-1} , 波导层的波导强度 $\Delta M = 5.5$; 利用公式(7) 计算出最小临界发射仰角 $(\varphi)_{\min} = 0.19^\circ$; 当时雷达的观测仰角为 -0.1° ; 小于 $(\varphi)_{\min}$; 公式(8) 计算得出在此波导层中形成波导传播的电磁波最大波长 $\lambda_{i\max} = 64.5 \text{ cm}$, 而江苏省气象台使用的 713 雷达 $\lambda = 5 \text{ cm}$, 小于可形成波导传播的电磁波最大波长。由 2002 年 8 月 31 日 20 时的探空资料可见, 当时大气状况满足超折射回波所形成的 4 个条件。

表 1 2002 年 8 月 31 日 20 时的探空记录

Table 1 The records of atmospheric sounding at 2000 BST Aug. 31, 2002 at Nanjing station

气压/hPa	高度/m	温度/K	露点温度/K	e/hPa	N	M
1 005	10	299.9	294.1	25.03	363.9	365.5
1 003	33	300.9	293.5	24.12	358.1	363.3
999	60	301.1	292.6	22.82	351.4	360.8
995	96	301.6	292.2	22.26	347.4	360.0
991	132	301.9	292.5	22.68	347.6	368.3
987	168	302.1	292.7	22.96	347.4	373.8
979	241	301.6	292.5	22.68	344.9	382.8
920	800	298.0	289.0	18.19	316.0	441.6

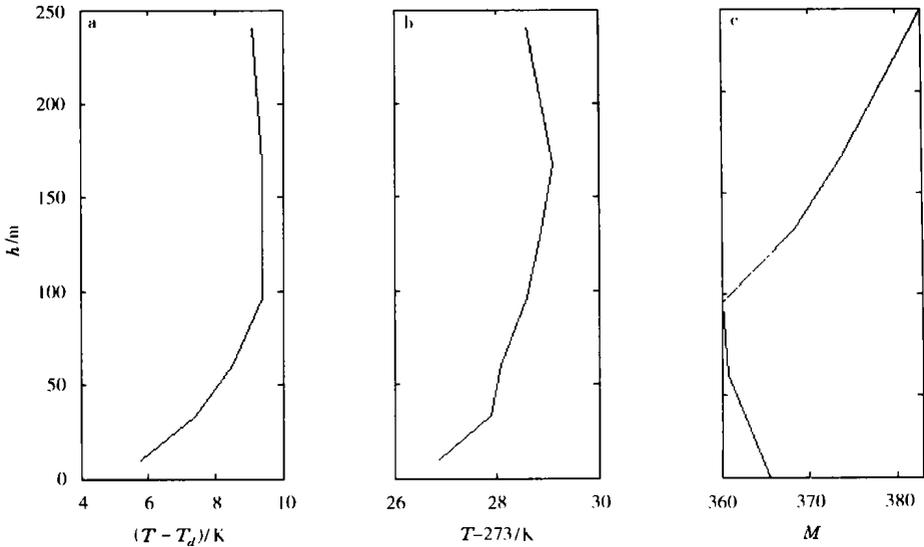


图 2 2002 年 8 月 31 日 20 时的探空曲线

Fig. 2 The sounding profile at 2000 BST Aug. 31, 2002 at Nanjing station

当日 22 时 47 分在雷达上观测到超折射回波(图 3): 观测仰角 -0.1° ; 图 3 中显示在雷达站附近及雷达站东北方出现大面积超折射回波, 从本站开始, 较连续地扩展到数百公里外, 最大强度达到 35 dBZ, 回波呈针状、米粒状, 沿雷达径向分布(雷达探测半径为 250 km, 距离圈间隔为 50 km)。由此判断此次超折射回波为两层模式类型。

利用公式(11)、(12) 模拟的电磁波传播路径图(江苏省气象台雷达天线高度为 61.8 m, 观测仰角 -0.1°), 由模拟图 4 可得到, 在 250 km 的半径内, 电磁波两次与地面相交, 雷达显示屏

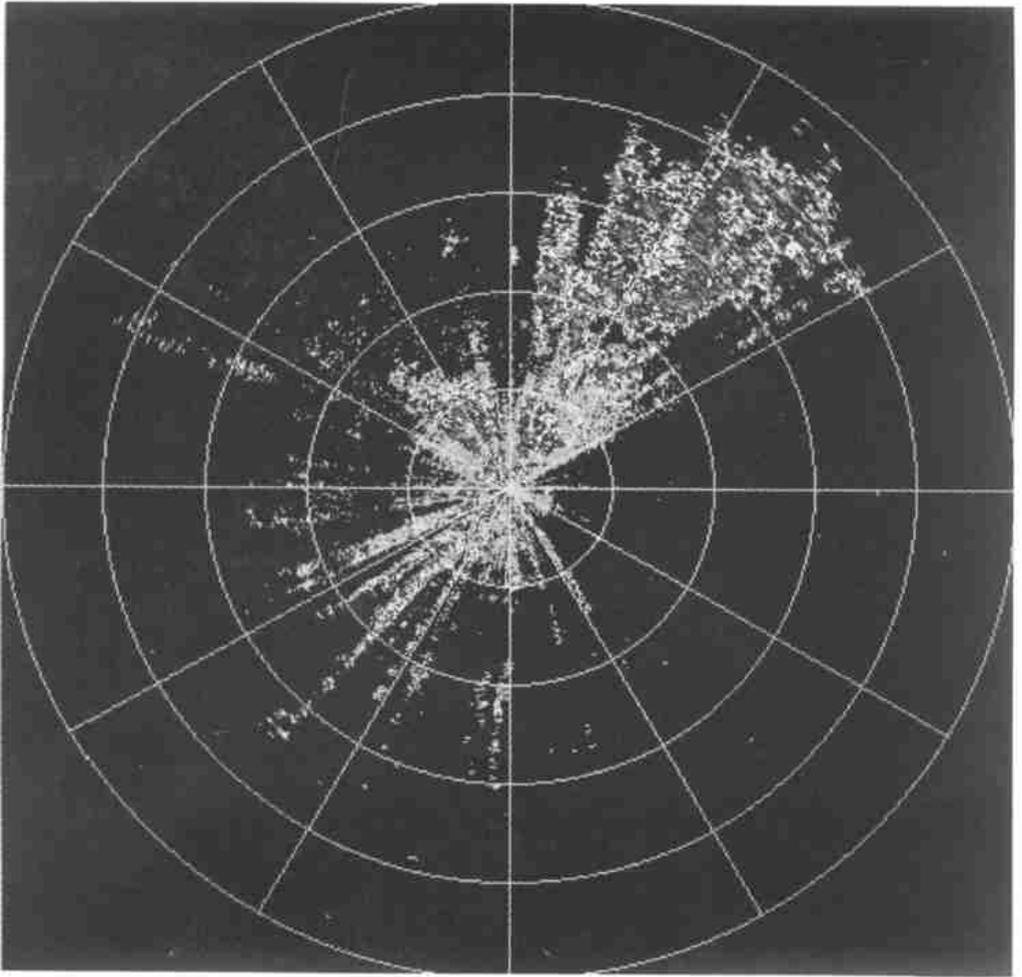


图 3 2002 年 8 月 31 日 22: 47 南京雷达站观测到的超折射回波

Fig. 3 Super-refraction echo observed at Nanjing radar station at 2247 BST Aug. 31, 2002

上应出现离雷达站约 20 ~ 30 km, 120 ~ 130 km 处的地物回波, 与实际的雷达回波分布比较, 可以解释超折射回波为何大致分成两块, 而并没有完全连成片。

5 结论与讨论

从这几次大气波导过程来看基本上都属于表面波导, 多发生在清晨, 出现在大气较稳定的晴好天气里。表面波导是下边界与地表相连的波导, 此时的气象条件多满足辐射超折射条件, 在大陆上的晴朗夜晚, 由于地面辐射, 近地层降温强烈而形成辐射逆温, 特别当地面潮湿时, 由于逆温存在使水汽不能向上输送, 形成水汽压随高度增加急剧减小。用推导的传播路径可以很好

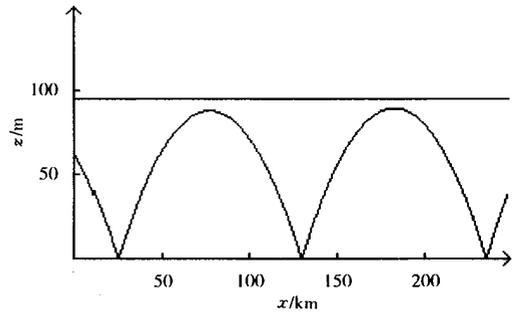


图 4 模拟的电磁波传播路径

Fig. 4 Simulated electromagnetic wave propagation

地模拟电磁波的传播, 从而可判断超折射回波出现的大致位置。

表面波导一般发生在 300 m 高度以下的边界层大气中, 由于很难得到 300 m 以下精细的探空资料(空间密度越高越好), 因此在研究出现大气波导时相应大气温、压、湿的分布时有一定的困难。下一步希望能收集到更多的个例及相应的高分辨率的探空资料, 根据回波出现的位置来反推大气波导层可能出现的高度及厚度。

参考文献:

- [1] Bean B R, Dutton E J. Radio Meteorology[M]. New York: Dover Publication Inc, 1968: 435.
- [2] 简发军, 刘成国, 潘中伟. 近海面大气波导探测及与其它研究成果的比较[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 269-272.
- [3] 朱宝明. 国外超视距雷达发展概况[J]. 电子工程信息, 1999, 21(8): 1-8.
- [4] Paulus R A. Specification for environmental measurements to assess radar sensors[R]. NOST Tech, Document 1685, 1989: 43.
- [5] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 94.
- [6] 姚展予, 赵柏林, 李万彪. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 605-615.
- [7] YAO Zhanyu, ZHAO Boling, LI Wanbiao. Analysis on characteristics of atmospheric duct and its effects on the propagation of electromagnetic wave[J]. Acta meteorological sinica, 2001, 15(2): 233-248.
- [8] 戴福山. 海洋大气近地层折射指数模式及其在蒸发波导分析上的应用[J]. 电波科学学报, 1998, 13(2): 1-7.

Necessary Conditions for Forming Duct Propagation and Simulation of Electromagnetic Wave Propagation

GUAN Li, GU Song-shan, HU O Yan,
HU Sheng, CHEN Zhong-rong

(Department of Electronic Engineering, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: The maximum trapped-wavelength and critical emitting angle of elevation for electromagnetic wave to form duct propagation are derived in this paper, the four kinds of necessary conditions are introduced, and the equations for ray propagation situation in atmospheric duct are also given. Comparing the observation of super-refraction of radar wave in Nanjing with the model electromagnetic wave propagation path, we could explain the abnormal super-refraction echo with the model results.

Key words: atmospheric duct; necessary condition; propagation path; detection over visual range