

# 基于 MIMO 的对流层散射通信信道损耗研究

唐 奎<sup>1</sup> 张 杰<sup>1</sup> 皮羽茜<sup>1</sup> 沈轩帆<sup>2</sup> 廖 勇<sup>2</sup>

(国网重庆市电力公司信息通信分公司 重庆 400014)<sup>1</sup>

(重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室 重庆 400044)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)场景下的对流层散射通信信道损耗进行了研究。在设计远距离 MIMO 通信系统时,链路损耗估计是其中的关键技术,而现有技术损耗估计时都忽略了波束与散射体碰撞时的能量损耗。根据湍流非相干散射理论,首先将对流层建模为多条可微的曲线,从而与发射和接收天线阵列构成曲边梯形,根据此信道几何模型,计算入射角、反射角和散射角的角度关系;其次,建立了电磁波束射入散射体后散射波在散射体表面的能量分布模型;最后,根据波束传输距离,量化散射信道的损耗,推导得到基于 MIMO 对流层散射信道的衰落系数和信道矩阵。将仿真计算结果与实际数据进行对比,验证了所提模型在链路损耗估计问题上的有效性和准确性,同时根据仿真结果对接收天线的仰角设计提出了建议。

**关键词** 多输入多输出,对流层散射通信,信道模型,散射系数

中图分类号 TN926+.4 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.3.020

## Research on Channel Loss of Tropospheric Scatter Communication Based on MIMO

TANG Tao<sup>1</sup> ZHANG Jie<sup>1</sup> PI Yu-qian<sup>1</sup> SHEN Xuan-fan<sup>2</sup> LIAO Yong<sup>2</sup>

(Chongqing Power Information & Communication Branch Company, Chongqing 400014, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Aircraft TT&C and Communication, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The channel loss of the tropospheric scatter communication in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) scenarios was studied in this paper. When designing a long distance MIMO communication system, one of the key technologies is the estimation of link loss, but all of existing technologies ignore the energy loss of collisions between beam and scatterers when estimating loss. According to the theory of turbulent incoherent scattering, firstly, we modeled troposphere as many differentiable curves, so that it can constitute curved trapezoid together with transmit and receive antenna array. And then we calculated the angular relation of angle of incidence, angle of reflection and scattering angle on the basis of this geometric channel model. Secondly, we established the energy distribution model of the scattered wave on the surface of scatterers after electromagnetic beam injection. Finally, according to the propagation distance of beam, we quantified the scattering channel loss, and derived the fading coefficients and channel matrix. By comparing simulation results with the actual data, we verified validity and accuracy of the proposed model on the problem of estimation of link loss, meanwhile gave suggestions for the design on elevation angle of receive antenna according to the simulation results.

**Keywords** Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), Tropospheric scatter communication, Channel modeling, Scattering coefficient

## 1 引言

多输入多输出<sup>[1]</sup> (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线,使信号通过发射端与接收端的多个天线传送和接收,从而改善通信质量。MIMO 能充分利用空间资源,通过多个天线实现多发多收,在不增加频谱资源和天线发射功率的情况下,可以成倍提高系统信道容量,被视为下一代移动通信的核心技术。

对流层散射信道是一个复杂的变参数信道<sup>[2]</sup>。在对流层散射通信中,电磁波的损耗不仅取决于信号频率、传输距离,

波束能量在经过散射体散射时也将产生损耗。当电磁波射入散射体时,电磁波的能量是由入射角、散射角的角度关系以及散射体吸收电磁波的能力所共同决定的。根据目前最广泛使用的湍流非相干散射理论的观点<sup>[3,4]</sup>,散射波的能量将分布在各个方向上,散射角越分散,则散射波的能量就越小。

目前工程上大多采用等效地球理论<sup>[5,6]</sup>对散射通信链路传输损耗进行建模。等效地球理论指出,在近地表面大气中,可认为大气折射指数随高度均匀变化,在这种情况下,电波射线曲率为固定常数。在等效地球之上,除电波射线变为直线外,天线仰角、端点高度和地面距离等都不变。目前工程上常用的两种损耗计算方法<sup>[6,7]</sup>——ITU-R617 和 NBS-101 均采

到稿日期:2015-02-04 返修日期:2015-05-08 本文受国网重庆市电力公司科技项目(2015 渝电科技 29 #)资助。

唐 奎(1983—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力信息通信,E-mail:toytiao@163.com;张 杰(1977—),男,工程师,主要研究方向为电力信息通信;皮羽茜(1986—),女,工程师,主要研究方向为电力信息通信;沈轩帆(1994—),男,主要研究方向为宽带无线通信;廖 勇(1982—),男,博士,副研究员,主要研究方向为宽带无线通信,E-mail:liaoy@cqu.edu.cn(通信作者)。

用等效地球的信道空域分析方法。两者的区别在于,ITU-R617中所采用的气候参数更为精确,计算方便;而NBS-101对信号频域的衰减给出了更为完备的计算公式,但计算过程十分繁琐。然而两种损耗计算方式都没有给出明确的波束与散射体碰撞时的能量损耗模型。

针对上述问题,基于对流层的湍流现象,本文将对流层建模为一个曲边梯形,散射体在曲边上随机分布。首先,根据信道几何模型,计算入射角、反射角和散射角的角度关系;其次,根据湍流非相干散射理论,建立了电磁波束射入散射体后散射波在散射体表面的能量损耗分布模型;最后,根据波束传输距离,量化散射信道的损耗,推导得到基于MIMO对流层散射信道的衰落系数和信道矩阵。

## 2 散射信道模型

散射通信应用场景如图1所示。有两个静止的MIMO通信站点,相互间直线距离为 $l$ 。由于两个站点距离较远,因此接收信号中非视距分量将占据绝大部分。由于对流层中各点气压不同,产生了湍流现象,导致对流层各点到地面的距离均不相等;同时为了便于分析,在构建信道几何模型时,将对流层视作可微的曲线,各散射体随机地分布在曲线上,电磁波束通过各散射体的散射将波束传向接收站点。

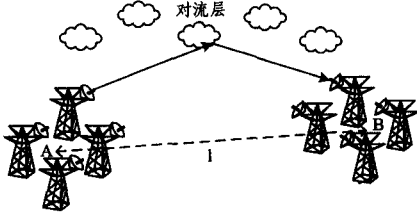


图1 散射通信应用场景

在对流层散射信道中,信号的损耗来源于两个方面<sup>[8,9]</sup>:一方面来源于信号在传输过程中链路上的损耗;另一方面来源于波束在经过多个散射体散射过程中消耗的能量。而信号相位的变化也来源于两个方面:一方面是由信号波长和链路长度决定的相移;另一方面来源于波束在经过散射后所附加上的随机相移。

波束在通过散射体时散射出的波束将射向四面八方,出射波束的能量随着散射角的增大而减小。根据湍流非相干散射理论<sup>[4]</sup>,在产生镜面反射的角度上,散射波束的能量最大,在其它角度上波束能量随散射角度与反射角夹角的增大呈指数衰减。同时能量衰减的程度还与散射体对电磁波的吸收能力有关。

信道几何模型如图2所示。假定与某个路径长度关联的所有散射体 $S_{(k)}$  ( $k=1,2,\dots,N$ ) ( $N$ 为散射体总数)位于多条平行可微的曲线上;两个通信站点间的直线距离为 $l$ ;点A是发射天线阵列的几何中心,点B是接收天线阵列的几何中心;发射端有 $N_t$ 根天线,接收端有 $N_r$ 根天线; $A_i^T$ 为第 $i$ 根发射天线, $B_j^R$ 为第 $j$ 根接收天线; $p$ 表示波束从发射天线发出后在到达接收天线的过程中所经历的散射体数目, $q$ 表示经过 $p$ 个散射体的由近及远的第 $q$ 条路径, $P$ 描述传输波从发射端到接收端所经历的最大散射次数, $Q=C_P^p = \frac{P!}{(P-p)!p!}$ 表示由近及远波束可能经过的路径总数; $\phi_i$ 为第 $i$ 根发射天线的波束发射角; $\phi_i^{pq}$ 表示第 $i$ 根发射天线发射的经过 $p$ 个散射体第 $q$ 条路径的波束发射角; $\phi_j$ 表示第 $j$ 根接收天线的波束到

达角; $\phi_j^{pq}$ 表示第 $j$ 根接收天线接收的经过 $p$ 个散射体第 $q$ 条路径的波束到达角; $D_{ij}^p$ 为发射端到散射体的距离, $D_R^p$ 为散射体到接收端的距离; $\alpha_{ij}^{pq}$ 为第 $i$ 根发射天线到第 $j$ 根接收天线的经过 $p$ 个散射体第 $q$ 条路径的散射波束与镜面反射波束的夹角; $\beta_{ij}^{pq}$ 为第 $i$ 根发射天线到第 $j$ 根接收天线的经过 $p$ 个散射体第 $q$ 条路径的散射波束与法线的夹角; $\psi$ 为在散射点处的曲边的切线与水平线的夹角。

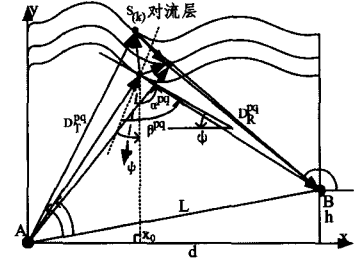


图2 基于MIMO的散射通信信道几何模型

根据信道的几何模型,可以写出相应的信道空域的衰落系数 $h_{ij}$ 和信道矩阵 $H$ 。

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & h_{N_r2} & \dots & h_{N_rN_t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $h_{ij}$ 为空域信道的衰落系数。由于视距分量十分微弱,在此为便于分析,忽略不计,主要考虑非视距(Non-Line-of-Sight, NLOS),所以有

$$h_{ij} \approx h_{ij}^{NLOS} = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q h_{ij}^{pq} \quad (2)$$

其中, $P$ 描述传输波从发射端到接收端所经历的最大散射次数, $p$ 表示散射次数, $q$ 表示由远及近的路径。例如 $h_{ij}^{2,4}$ 代表电磁波经历2跳,且其路径表示第4条路径,即 $A \rightarrow S(2) \rightarrow S(1) \rightarrow B$ (由近及远的原则), $Q=C_P^p = \frac{P!}{(P-p)!p!}$ 表示由近及远,传输波所经历的路径总数。

不同散射次数下的衰落系数可表示为

$$h_{ij}^{1q} = \sqrt{\eta_i^{1q}} \lim_{N^{1q} \rightarrow \infty} \sum_{n^{1q}=1}^{N^{1q}} \sqrt{\eta_j^{1q}} E_{ij}^{1q} e^{j(\theta_{ij}^{1q} - k_0 D_{ij}^{1q})} \quad (3)$$

$$h_{ij}^{2q} = \sqrt{\eta_i^{2q}} \lim_{\substack{N^{1q} \rightarrow \infty \\ N^{2q} \rightarrow \infty}} \sum_{n^{1q}=1}^{N^{1q}} \sum_{n^{2q}=1}^{N^{2q}} \sqrt{\eta_j^{1q} \eta_j^{2q}} E_{ij}^{1q} E_{ij}^{2q} e^{j(\theta_{ij}^{1q} - k_0 D_{ij}^{1q})} e^{j(\theta_{ij}^{2q} - k_0 D_{ij}^{2q})} \quad (4)$$

$$\vdots$$

$$h_{ij}^{Pq} = \sqrt{\eta_i^{Pq}} \lim_{\substack{N^{1q} \rightarrow \infty \\ N^{2q} \rightarrow \infty \\ \vdots \\ N^{Pq} \rightarrow \infty}} \sum_{n^{1q}=1}^{N^{1q}} \sum_{n^{2q}=1}^{N^{2q}} \dots \sum_{n^{Pq}=1}^{N^{Pq}} \sqrt{\prod_{p=1}^P \eta_j^{pq}} \left( \prod_{p=1}^P E_{ij}^{pq} \right) e^{j(\sum_{p=1}^P \theta_{ij}^{pq} - k_0 \sum_{p=1}^P D_{ij}^{pq})} \quad (5)$$

其中, $n^{pq}$ 表示经 $p$ 次散射的第 $q$ 条路径上的某一散射体, $N^{pq}$ 表示经 $p$ 次散射的第 $q$ 条路径上散射体的总 $\eta_j^{pq}$ 数; $\eta_j^{pq}$ 为链路损耗中值,其计算方法可参考ITU-R617的建议; $E_{ij}^{pq}$ 为非视距链路增益; $\theta_{ij}^{pq}$ 为散射后叠加的随机相位,其服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布; $k_0$ 为自由空间波数,有 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ;  $\eta_j^{pq}$ 为波束经过散射体的损耗系数; $D_{ij}^{pq}$ 为链路的总长度。

由此得到了信道空域衰落的模型,下一节将求解衰落模

型中的未知变量,包括波束经过散射体的损耗系数  $\eta_{ij}^{pq}$  和链路的总长度  $D_{ij}^{pq}$ 。

### 3 散射体损耗系数

当一束平行波与散射体碰撞时,从宏观角度分析,可以看作是波束与曲面上某一点的碰撞。曲面上该点的切平面可视为反射面,曲面在该点上的法线即为入射波与反射波的法线。将散射体建模为一球体,散射波束从球体表面的每个点向外散发,且散射波束的方向均与球体表面垂直。由此以散射体几何中心为球心,建立球坐标系,则散射体表面能量分布模型如图3所示。

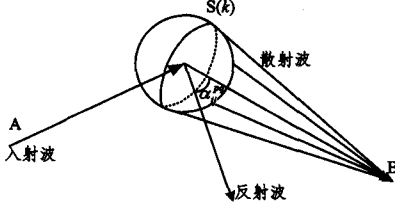


图3 散射体表面能量分布模型

$\alpha_{ij}^{pq}$  为经散射体散射后的散射波与镜面反射波的夹角。在散射体表面,散射波束能量最强的点为反射波的出射点。连接接收天线与球心,以球心为垂足可得到一平面将散射体切为等表面积的两个半球;接收天线接收到的波束的能量应为朝向接收天线的半球表面各点的散射能量在接收天线方向上分量的总和,也就是在半球表面上的二重积分。而散射波束在散射体表面的能量分布表现为,以反射波为中心,在其余方向上呈指数衰减。由此得到了损耗系数  $\eta_{ij}^{pq}$  的表达式如下:

$$\eta_{ij}^{1q} = \int_{\alpha_{ij}^{1q} - \frac{\pi}{2}}^{\alpha_{ij}^{1q} + \frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{-\gamma\theta} \cos\varphi d\theta d\varphi$$

$$= -\frac{2}{\gamma} e^{-\gamma\theta} \Big|_{\alpha_{ij}^{1q} - \frac{\pi}{2}}^{\alpha_{ij}^{1q} + \frac{\pi}{2}} = \frac{1.26}{\gamma} e^{-\gamma\alpha_{ij}^{1q}} \quad (6)$$

$$\eta_{ij}^{pq} = \frac{1.26}{\gamma} e^{-\gamma\alpha_{ij}^{pq}} \quad (7)$$

其中,  $\theta$  和  $\varphi$  为球坐标系中的两个角度坐标;  $\alpha_{ij}^{1q}$  为经第1个散射体散射后的散射波与镜面反射波的夹角,  $\alpha_{ij}^{pq}$  为经第  $p$  个散射体散射后的散射波与镜面反射波的夹角;  $\gamma$  为散射介质常数,表征了散射体对电磁波的吸收能力。

在图2的信道几何模型中,设  $f(x)$  为曲边梯形模型中的曲边解析函数。由于对流层中的湍流现象,散射体的分布可能出现4种情况,这4种情况表现为散射波束与法线的夹角  $\beta_{ij}^{pq}$  和散射点处的曲边的切线与水平线的夹角  $\psi$  的4种角度关系,即

$$\begin{cases} |\psi| < \frac{\beta_{ij}^{pq}}{2}, & \psi > 0 \\ |\psi| < \frac{\beta_{ij}^{pq}}{2}, & \psi < 0 \\ |\psi| > \frac{\beta_{ij}^{pq}}{2}, & \psi > 0 \\ |\psi| > \frac{\beta_{ij}^{pq}}{2}, & \psi < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\psi$  为  $f(x)$  在散射点  $x_0$  处的切线与水平线的夹角,其表达式如下:

$$\psi = \arctan \frac{df}{dx} \Big|_{x=x_0} \quad (9)$$

$\alpha_{ij}^{pq}$  满足如下表达式:

$$\frac{\alpha_{ij}^{pq} \pm \alpha_{ij}^{pq}}{2} = (\frac{\pi}{2} - \phi_i^{pq}) \pm \psi \quad (10)$$

根据链路的几何关系,有

$$\beta_{ij}^{pq} = \begin{cases} \phi_j^{pq} - \phi_i^{pq}, & p=1 \\ \arcsin \frac{D_T^{pq} \sin[\phi_i^{pq} - \phi_i^{p(q+1)}]}{d_{ij}^{pq}}, & p \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $d_{ij}^{pq}$  为波束在散射体间传播的距离,其满足如下表达式:

$$d_{ij}^{pq} = \sqrt{(D_T^{pq})^2 + (D_T^{p(q+1)})^2 + 2D_T^{pq} D_T^{p(q+1)} \cos[\phi_i^{pq} - \phi_i^{p(q+1)}]} \quad (12)$$

由此得到  $\alpha_{ij}^{pq}$  的表达式如下:

$$|\alpha_{ij}^{pq}| = \begin{cases} \sum_{q=1}^Q |\pi - \phi_i^{pq} - \phi_j^{pq} - 2|\psi||, & p=1 \\ \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{q=1}^Q |\pi - 2\phi_i^{pq} - 2|\psi| - \arcsin \frac{D_T^{pq} \sin[\phi_i^{pq} - \phi_i^{p(q+1)}]}{d_{ij}^{pq}}| + \sum_{q=1}^Q |\pi - \phi_i^{pq} - \phi_j^{pq} - 2|\psi||, & p \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

### 4 散射链路

$D_{ij}^{pq}$  为链路的总长度。图4为信道链路的几何模型。

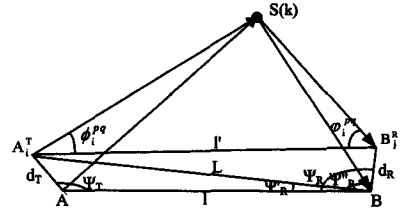


图4 信道链路的几何模型

由图4可知,  $D_{ij}^{pq}$  满足如下表达式:

$$D_{ij}^{pq} = \begin{cases} D_m^{pq} + D_n^{pq}, & p=1 \\ D_m^{pq} + D_n^{pq} + \sum_{p=1}^{P-1} d_{ij}^{pq}, & p \geq 2 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $D_m^{pq}$  为发射天线到散射体的链路长度,  $D_n^{pq}$  为散射体到接收天线的链路长度,  $d_{ij}^{pq}$  为各散射体之间的距离。由于  $d_{ij}^{pq} \ll \lambda$  ( $\lambda$  为信号的波长), 因此对信号相位的影响可以忽略不计, 有

$$D_{ij}^{pq} = D_m^{pq} + D_n^{pq} \quad (15)$$

如图4所示,  $A_i^T$  为第  $i$  根发射天线,  $B_j^R$  为第  $j$  根接收天线;  $A$  为发射天线阵列的几何中心,  $B$  为接收天线阵列的几何中心;  $\phi_T$  为  $AB$  连线与  $A_i^T$  的夹角,  $\phi_R$  为  $AB$  连线与  $B_j^R$  的夹角;  $d_T$  ( $d_R$ ) 表示发射端(接收端)天线阵列中天线单元到其几何中心的间距。

由图4有

$$L = |A_i^T B| = \sqrt{l^2 + d_T^2 - 2ld_T \cos\phi_T} \quad (16)$$

其中,  $L$  为  $A_i^T$  到  $B$  的直线距离。

再由正弦定理有

$$\phi_R' = \arcsin \frac{L}{d_T \sin\phi_T} \quad (17)$$

由图4可知

$$\phi_R'' = \phi_R - \phi_R' \quad (18)$$

由式(16)一式(18)得到收发天线间的直线距离  $l'$  的表达式如下:

$$l' = \sqrt{L^2 + d_R^2 + 2Ld_R \cos\phi_R''} \quad (19)$$

最后可以得到:

$$\begin{cases} D_{in}^{\rho_i} = \frac{l' \sin \phi_i^{\rho_i}}{\sin(\phi_j^{\rho_i} - \phi_i^{\rho_i})} \\ D_{ij}^{\rho_i} = \frac{l' \sin \phi_i^{\rho_i}}{\sin(\phi_j^{\rho_i} - \phi_i^{\rho_i})} \end{cases} \quad (20)$$

再根据式(15),就能得到链路距离  $D_{ij}^{\rho_i}$ 。

经过以上的分析计算,得到了式(5)中的所有关键参量的表达式,将损耗系数  $\rho_{ij}^{\rho_i}$  和链路距离  $D_{ij}^{\rho_i}$  代入式(5),并采用中心极限定理分析,可知信道的衰落系数  $h_{ij}$  的包络服从瑞利分布。由此可以得到信道矩阵  $H$ 。

## 5 仿真分析

使用 MATLAB 对本文所建 MIMO 散射信道模型的损耗系数与国际标准 ITU-R617、NBS-101 以及实测的数据进行了对比,验证了所提方法的有效性;同时,还分析了在不同的通信距离下,损耗系数随接收天线的仰角变化的规律。

本文参考赵玉超等人之前在华北地区实地测量的数据<sup>[10]</sup>,在华北地区对散射通信常规模式和越障模式各选取一条链路进行实验,将实测数据与 ITU-R617、NBS-101 和本文所提方法预计出的传输损耗进行比较。设定信号为单频正弦波,所选频段为 C 波段,将观察 6 个小时的中值电平折算成传输损耗,线路 1 为高邑到定州,通信距离  $d=107\text{km}$ ,实际散射角为  $1.4209$  度;线路 2 为官厅到高崖口,通信距离  $d=29.3\text{km}$ ,实际散射角为  $12.9087$  度。3 种方法的计算结果如表 1 所列。

表 1 3 种计算方法与链路实测数据的对比

| 线路                       | 线路 1 | 线路 2 |
|--------------------------|------|------|
| 通信距离 $d/\text{km}$       | 107  | 29.3 |
| 实测损耗/ $\text{dB}$        | 207  | 251  |
| ITU-R617 预计/ $\text{dB}$ | 207  | 306  |
| NBS-101 预计/ $\text{dB}$  | 206  | 243  |
| 本文方法预计/ $\text{dB}$      | 202  | 257  |

由计算结果可知,本文所提方法在通信距离较短的情况下计算结果更为精确。在通信距离  $d$  为  $29.3\text{km}$  时,ITU-R617 估计误差为  $55\text{dB}$ ,NBS-101 估计误差为  $8\text{dB}$ ,而本文所提方法误差仅为  $6\text{dB}$ ;而当链路距离增加至  $107\text{km}$  时,ITU-R617 能够准确估计信道损耗,NBS-101 的估计方法误差也仅为  $1\text{dB}$ ,但由于相关角度实测数据的误差对计算结果的影响比通信距离短时要大得多,导致本文所提估计方法误差为  $5\text{dB}$ ,估计误差较大,但仍然在可以接受的范围内。

设定两通信站天线阵列几何中心间距分别为  $25\text{km}$  和  $50\text{km}$ ,发射天线仰角为  $3$  度,云层高度为  $1.5\text{km}$ ,不考虑天气状况对散射体分布的影响和云层中电子云的碰撞现象,以接收天线仰角为自变量,分析不同角度下接收到信号的损耗系数,仿真结果如图 5 所示。

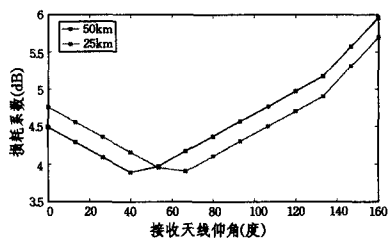


图 5 不同通信距离下接收天线仰角与损耗系数的关系

从图 5 可以看出,当通信距离为  $50\text{km}$ ,接收天线仰角等于  $38.5$  度时,由散射体与波束碰撞引起的损耗最小,即在此情景下波束与散射体的碰撞将会带来  $4\text{dB}$  的损耗;当通信距离为  $25\text{km}$ ,接收天线仰角为  $45$  度时,波束与散射体碰撞的损

耗最小,同样为  $4\text{dB}$ 。由此可知,当站点距离增大时,需要减小接收天线的仰角才能减少波束与散射体碰撞时的损耗。

通过以上分析可知:随着通信站点间距离的增大,接收天线的仰角需要不断调整才能适应散射体对波束损耗的影响;虽然波束与散射体碰撞对波束的损耗最小时仅有  $4\text{dB}$  左右,但是当接收天线仰角不理想时,这一损耗有可能会增加至  $10\text{dB}$  甚至更多,此时波束与散射体碰撞带来的损耗将不可忽略不计,甚至会对系统的设计带来一定影响。

**结束语** 本文根据湍流非相干散射理论,建立了考虑波束与散射体碰撞损耗的对流层散射通信的信道几何模型,推导得到基于 MIMO 对流层散射信道的衰落系数和信道矩阵。通过仿真分析以及和实测数据的对比,验证了本文所提模型在链路损耗估计问题上的有效性和准确性;同时,分析了不同通信距离下,接收天线仰角与波束散射时的损耗关系,为对流层散射通信系统的设计提供了理论参考。

## 参考文献

- [1] Huang J L, Signell S. On spectral efficiency of low-complexity adaptive MIMO system in rayleigh fading channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 9(8): 4369-4374
- [2] 张明高. 对流层散射通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [3] Gjessing D T, McCormick K S. On the prediction of the characteristic parameters of long-distance tropospheric communication links[J]. IEEE Transactions on Communications, 1974, 22(9): 1125-1133
- [4] Lum Y F, Lim C H. Performance of a long troposcatter link in the southeast Asia equatorial region[J]. IEEE Transactions on Communications, 1974, 48(8): 2201-2214
- [5] Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems; Rec. ITU-RP. 617-1 [S]. 1992
- [6] Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems; Rec. ITU-RP. 617-2 [S]. 2012
- [7] Transmission loss predictions for tropospheric communication circuits; NBS Technical Note No. 101[S]. 1967
- [8] Wiesel A, Eldar Y C, Shamai S. Semi-definite relaxation for detection of 16-QAM signaling in MIMO channels[J]. IEEE Signal Processing letters, 2005, 12(9): 653-656
- [9] Abdi M, Nahas H E, Jard A, et al. Semi-definite positive relaxation of the maximum likelihood criterion applied to multiuser detection in CDMA context[J]. IEEE Signal Processing letters, 2002, 6(9): 165-167
- [10] Zhao Yu-chao, Qin Jian-cun, Liu Li-zhe. Analysis of Troposcatter Communication Transmission Loss Prediction Methods[J]. Radio Engineering, 2013, 43(3): 62-64 (in Chinese)
- 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] Li Jiao-jun, Zhang Ting, Su Li-yun, et al. Multi-Carrier Communication Simulation Analysis Based on MIMO[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(12): 87-90 (in Chinese)
- 李皎军, 张婷, 苏理云, 等. 基于 MIMO 的多载波通信系统仿真分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(12): 87-90