

非稳态三维散射场景的时域自相关特性分析

曾孝平, 周雨, 简鑫, 黄杰, 李静

(重庆大学通信工程学院 重庆 沙坪坝区 400044)

【摘要】结合航空移动通信环境的三维非稳态特征, 推导了立体空域内散射体相对于收发节点随机运动散射场景的时域自相关函数的数学表达式。该表达式为有限区间内的高维积分, 结合蒙特卡洛高维积分法和射线跟踪法验证了该表达式的正确性。数值结果表明: 节点运动速度、散射体速度和散射体数量越大, 相应的时域自相关函数衰减越快。该表达式和求解办法具有较强的推广性, 通过降维可等效为二维散射场景, 令散射体相对于收发节点静止可等效为稳态散射场景。相关结论可为下一代航空移动通信宽带传输体制的相干时间与相干距离的确定提供理论支撑。

关键词 自相关函数; 移动通信; 非稳态散射; 射线跟踪法; 三维多径信道

中图分类号 TN011 **文献标志码** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2015.06.002

Temporal Autocorrelation Properties for Non-Stationary 3D Multipath Scattering

ZENG Xiao-ping, ZHOU Yu, JIAN Xin, HUANG Jie, and LI Jing

(College of Communication Engineering, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044)

Abstract The expression of the temporal autocorrelation function for the three dimensional (3D) and non-stationary aeronautical scattering environment is derived, where the scatters are in random motion relative to transceivers. The expression involves high dimensional integration with finite interval, thus a ray-tracing based model is proposed to verify its validity. Numerical results show that as the increase of the velocity of transceivers or the velocity and density of the scatters increases, the temporal autocorrelation function would attenuate more rapidly. The deduced expression and the proposed ray-tracing based model can be extended to other scenarios. Both the two dimensional (2D) multipath scattering and the stationary multipath scattering are two special cases. These results allow engineers more appropriate determination on the coherence time and coherence bandwidth for the future broadband aeronautical mobile communication.

Key words autocorrelation; mobile communication; non-stationary scattering; ray-tracing; 3D multipath channel

航空自组网是指利用空中节点(如民航客机)构建的移动自组织网络, 为节点间或节点与地基站间提供航空通信/导航/监管/空管(CNS/ATM)等服务。与卫星通信相比, 航空自组网具有时延低、部署容易、数据传输率高等特点^[1], 成为学术界近年的研究热点^[2-5]。现有研究成果主要集中于参照航空通信环境设计更优的空空路由或接入协议, 较少关注空空链路的物理层传输体制与信道特性^[2-3]。空空链路作为航空自组网的唯一数据传输通道, 在FAA和EUROCONTROL联合提出的L波段数字航空通信系统(L-DACS)中具有非常重要的研究价值^[6]。为确定空空链路物理层的各关键参数, 如符号周期、子载波间隔、分集距离等, 研究其散射环境的二阶统计

特性, 如时域自相关、多普勒扩展等, 以期为下一代航空移动通信的高效空空组网提供必要的物理层信息。

信道二阶统计特性与诸多通信指标有关, 尽管研究较为复杂, 却一直受到业界的广泛关注^[7-8]。文献[9]首次推导了二维场景下基站固定、终端移动、散射体静止时接收信号包络的时域自相关函数和功率谱, 为后续通信系统的设计与性能分析提供了理论和技术支撑。文献[10]将该研究结果推广到三维场景。然而航空自组网中作为收发端的空中节点均在三维立体空域内作高速运动(如民航客机速度可达1 000 km/h)^[11], 这类无线通信环境为典型的移动-移动(mobile-to-mobile, M2M)散射环境。除地表上静

收稿日期: 2014-06-10; 修回日期: 2015-04-16

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91438104); 国家自然科学基金面上项目(61171089); 国家自然科学基金青年科学基金(61501065); 重庆市研究生科研创新项目(CYS14005)

作者简介: 曾孝平(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事下一代航空移动通信等方面的研究。

止的各类散射体以外(如高山), 大气层中还广泛分布着相对于空中节点作高速的随机运动的各类散射体(如云、雨、雾、尘埃、电离层反射等), 由此造成的多径效应将表现出明显的非稳态特性。为分析航空自组网空空链路的二阶统计特性, 必须将为地面蜂窝网建立的Clarke模型推广到三维, 并融入运动节点与非稳态散射体的影响。以车联网为应用背景, 文献[12-13]推导了二维非稳态M2M散射场景的时域自相关函数, 但未将其结果推广到三维。文献[14-18]研究了收发节点相对静止或匀速直线运动、散射体分布于给定三维区域内(如圆柱体、球体、椭球体等)的M2M散射场景的时域自相关函数, 但没有考虑散射体相对于收发节点作随机运动的情况。上述研究为航空自组网非稳态三维M2M散射场景的时域自相关特性的分析提供了可参考的解决思路。针对航空移动通信环境, 文献[19-20]通过实测分析了空空链路几个典型场景的接收信号强度的统计特性(即信道的一阶统计特性)。文献[21]采用有限马尔科夫模型研究了三维M2M散射场景下接收信号幅度的统计特性。遗憾的是上述研究均没有研究空空链路的二阶统计特性, 也没有考虑散射体相对于空中节点作随机运动对接收信号统计特性的影响, 不能全面评估航空自组网非稳态三维M2M散射信道的统计特性。

结合航空移动通信环境的三维非稳态特征, 本文推导了立体空域内散射体相对于收发节点随机运

动的M2M散射场景的时域自相关函数的数学表达式。该表达式为高维积分, 本文采用蒙特卡洛方法求得数值解。用射线跟踪法建立仿真验证模型进一步证明该表达式的正确性, 并用该模型对不同节点运动速度、不同散射体速度和不同散射体数量情况下的时域自相关函数进行了分析。

1 理论分析

1.1 非稳态三维散射模型

图1为非稳态三维散射场景示意图。设收发端周围有 N_s 个运动散射体 S^n ($n=1, 2, \dots, N_s$), 图1详细展示了第 n 条散射路径的主要参数:

1) 任意时刻 t , 坐标原点为收端 A_R 所在空间位置, 三维坐标的 x 轴为收发节点的直视路径, x 轴的正方向由发端 A_T 指向收端 A_R 。

2) 发端相对于收端的速度大小为 v_T , 其运动方向的水平角和仰角分别为 α_T 和 β_T ; 由于本文模型考虑的是相对速度, 故可以模拟收发节点运动的M2M场景。

3) 发端 A_T 到第 n 个散射体 S^n 的发射角的水平角和仰角分别为 α_T^n 、 β_T^n ; 第 n 个散射体 S^n 到收端 A_R 的到达角的水平角和仰角分别为 α_R^n 、 β_R^n 。

4) 第 n 个散射体 S^n 以固定速度、沿随机方向相对于收发节点运动, 其运动速度、运动方向的水平角和仰角分别为 v_{S^n} 、 $\alpha_v^{S^n}$ 、 $\beta_v^{S^n}$, 以此模拟散射体随机运动造成的非稳态散射场景。

5) $\alpha_R^{LOS} = \pi$ 表示直视路径水平角。

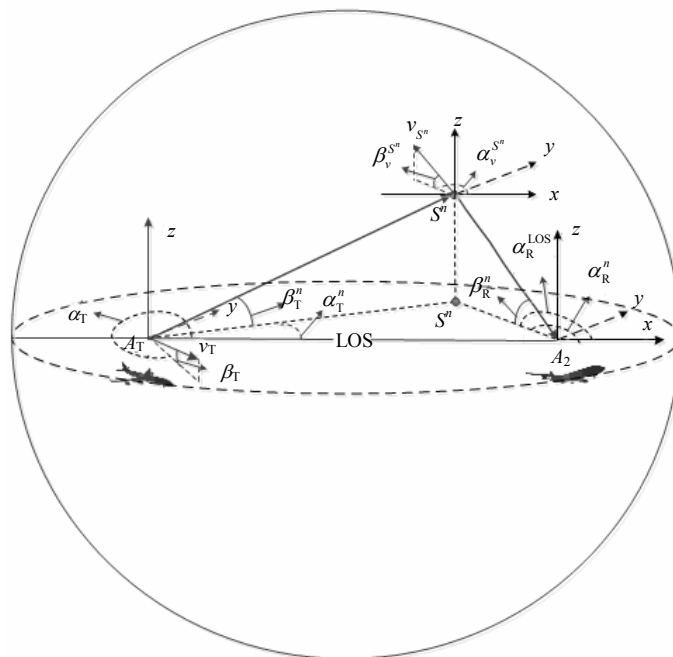


图1 非稳态三维散射场景示意图

1.2 非稳态三维散射场景的时域自相关函数

第1.1节所描述的三维非稳态散射模型将文献[12]提出的二维模型扩展到三维。研究表明由多径造成的复信道增益可表示为^[22]:

$$\mu(t) = \sum_{n=1}^{N_s} c_n e^{j(2\pi f_n t + \theta_n)} \quad (1)$$

式中, c_n 表示衰减因子; f_n 表示由收发节点、散射体移动产生的多普勒频移; θ_n 表示路径的相移。将二维场景推广到三维场景的难点在于把仰角 β 引入到 f_n 的表达式中。沿用文献[12]的思路, 把 f_n 分成 f_n^T 、 f_n^{TS} 、 f_n^{SR} 共3个部分, 即:

$$f_n = f_n^T + f_n^{TS} + f_n^{SR} \quad (2)$$

图2为按照文献[10]的三维模型思路建立的散射体到收端的散射路径示意图。设散射体 S^n 在三维坐标下的初始位置坐标为 $(0, 0, 0)$, 设电磁波传播方向为 (α_R^n, β_R^n) , 散射体运动方向为 $(\alpha_v^{S^n}, \beta_v^{S^n})$, 经过单位时间后散射体移动至 (x_0, y_0, z_0) 。多普勒频移是由收发端相对运动给电磁波传播带来光程差造成的, 则第 n 条路径的多普勒频移可表示为^[10]:

$$f_n^{SR} = \frac{1}{\lambda} (x_0 \cos \alpha_R^n \cos \beta_R^n + y_0 \sin \alpha_R^n \cos \beta_R^n + z_0 \sin \beta_R^n) \quad (3)$$

又因为单位时间内接收端的运动距离可表示为 $(v_{S^n} \cos \alpha_v^{S^n} \cos \beta_v^{S^n}, v_{S^n} \cos \beta_v^{S^n} \sin \alpha_v^{S^n}, v_{S^n} \sin \beta_v^{S^n})$, 将其代入式(3)并依次代替 (x_0, y_0, z_0) , 三角函数化简

$$a(\tau) = 2\sigma_0^2 \int \int \int_{S \times S} \int \int \int_{S \times S} \int \int \int_{S \times S} e^{j2\pi f_n \tau} p(\alpha_v^{S^n}, \beta_v^{S^n}) p(\alpha_T^n, \beta_T^n, \alpha_R^n, \beta_R^n) p(v_s) d\alpha_v^{S^n} d\beta_v^{S^n} d\alpha_T^n d\beta_T^n d\alpha_R^n d\beta_R^n \quad (6)$$

把式(5)代入式(6), 可得到非稳态三维信道场景

$$a(\tau) = 2\sigma_0^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e^{j \left\{ 2\pi \frac{v_{S^n}}{\lambda} \left[\cos(\alpha_v^{S^n} - \alpha_T^n) \cos \beta_T^n \cos \beta_v^{S^n} + \sin \beta_T^n \sin \beta_v^{S^n} + \cos(\alpha_v^{S^n} - \alpha_R^n) \cos \beta_R^n \cos \beta_v^{S^n} + \sin \beta_R^n \sin \beta_v^{S^n} \right] \tau \right\}} \times e^{j \left\{ 2\pi \frac{v_T}{\lambda} \left[\cos(\alpha_T - \alpha_T^n) \cos \beta_T^n \cos \beta_T + \sin \beta_T^n \sin \beta_T \right] \tau \right\}} \frac{\sin \beta_T^n}{4\pi} \frac{\sin \beta_R^n}{4\pi} \frac{\sin \beta_v^{S^n}}{4\pi} d\alpha_v^{S^n} d\beta_v^{S^n} d\alpha_T^n d\beta_T^n d\alpha_R^n d\beta_R^n \quad (7)$$

式(6)到式(7)的推导过程为:

1) 设发射角和到达角相互独立, 故联合概率密度函数 $p(\alpha_n^T, \beta_n^T, \alpha_n^R, \beta_n^R)$ 可表示为 $p(\alpha_n^T, \beta_n^T)$ 与 $p(\alpha_n^R, \beta_n^R)$ 的乘积。

2) 设发端在三维球面内等概率发出电磁波信号, 则球面上单位面积能接收到电磁波辐射的概率为 $dp = d\Omega / 4\pi$, 其中 $d\Omega = \sin \beta_T^n d\beta_T^n d\alpha_T^n$, 故 α_T^n 和 β_T^n 的联合概率密度函数 $p(\alpha_T^n, \beta_T^n) = \sin \beta_T^n / 4\pi$ ^[23]。

3) 设电磁波信号在三维球面内等概率到达收端, 故到达角的水平角 α_R^n 和仰角 β_R^n 的联合概率密度函数 $p(\alpha_R^n, \beta_R^n) = \sin \beta_R^n / 4\pi$ 。

后, 可得:

$$f_n^{SR} = \frac{v_{S^n}}{\lambda} [\cos(\alpha_v^{S^n} - \alpha_R^n) \cos \beta_R^n \cos \beta_v^{S^n} + \sin \beta_v^{S^n} \sin \beta_R^n] \quad (4)$$

式中, λ 为载波波长。令 $\beta_R^n = 0$, $\beta_v^{S^n} = 0$, 则 $f_n^{SR} = \frac{v_{S^n}}{\lambda} [\cos(\alpha_v^{S^n} - \alpha_R^n)]$, 退化为二维情况。类比式(4)可分别得到 f_n^T 和 f_n^{TS} 表达式, 故 f_n 表示为:

$$f_n = \frac{v_T}{\lambda} [\cos(\alpha_T - \alpha_T^n) \cos \beta_T^n \cos \beta_T + \sin \beta_T^n \sin \beta_T] + \frac{v_{S^n}}{\lambda} [\cos(\alpha_v^{S^n} - \alpha_T^n) \cos \beta_T^n \cos \beta_v^{S^n} + \sin \beta_T^n \sin \beta_v^{S^n}] + \quad (5)$$

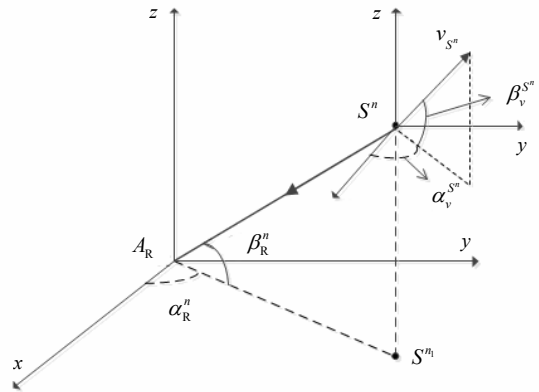


图2 散射体到收端散射路径示意图

文献[12]提出的自相关函数求解办法可得到非稳态三维散射场景下的时域自相关函数表达式为:

下的时域自相关函数为:

4) 设散射体以恒定速度在三维空间内沿任意方向作随机运动, 参考步骤2), 散射体速度的水平角 $\alpha_v^{S^n}$ 和仰角 $\beta_v^{S^n}$ 的联合概率密度函数满足 $p(\alpha_v^{S^n}, \beta_v^{S^n}) = \sin \beta_v^{S^n} / 4\pi$; 散射体运动速度 v_s 的概率密度函数 $p(v_s) = 1$ 。

如果多径数目趋于无穷, 故复信道增益等价为一个高斯过程, 根据中心极限定理得到该过程的方差 $2\sigma_0^2 = 1$, 但实际情况中多径数目不可能趋于无穷, 因此式(7)中保留了该常数项。式(7)为一个相当复杂的六重积分, 难以用符号积分给出其精确值, 但可采用数值积分求解。传统的辛普森或梯形法在解决

高维积分时, 因求解时间会随积分重数增加而迅速增加, 严重影响计算效率。蒙特卡洛数值积分方法是一种以概率统计理论为指导的一类数值计算方法, 具有较高的运算精度且计算效率不受积分重数影响, 因此本文采用蒙特卡洛方法计算该六重积分的数值解。

2 基于射线跟踪法的仿真验证模型

为进一步验证式(7)的正确性, 本文建立图1所示散射方式的射线跟踪仿真验证模型。由文献[24]可得: 多普勒频移 $f_n = 1/(2\pi\Delta t)\Delta\varphi$, 其中 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta l/\lambda$, Δl 表示 Δt 时间内的路程差, 将其代入式(1), 可简化为:

$$\mu(t) = \sum_{n=1}^{N_s} c_n e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta l\right)} \quad (8)$$

结合式(8)与射线跟踪法, 本文可给出非稳态三维散射场景的仿真验证办法, 具体实现流程如下:

1) 设置初始参数: 包括收端坐标, 发端坐标, 载波频率 f_c , 散射体个数 N_s , 散射体运动速度 v_{s^n} , 发端相对于收端的运动速度大小 v_T 、相对速度水平角 α_T 和仰角 β_T 。

2) 计算散射体 Δt 时刻的三维坐标: 设散射体最初随机分布在收端(原点)周围, 不局限于任何球形或柱形空间, 随机产生第 n 个散射体运动方向的水平角 $\alpha_v^{s^n}$ 和仰角 $\beta_v^{s^n}$, 最小时间间隔 t_d 内散射体的运动路程 $\Delta S = V_{s^n} t_d$, 将该路程分解到 (x, y, z) 3个方向上, 其中, $\Delta S_x = \Delta S \cos \beta_v^{s^n} \cos \alpha_v^{s^n}$, $\Delta S_y = \Delta S \cos \beta_v^{s^n} \sin \alpha_v^{s^n}$, $\Delta S_z = \Delta S \sin \beta_v^{s^n}$, 再把 Δt ($\Delta t = N t_d$, 即 N 个时间间隔)时间内 (x, y, z) 方向上的路程分别进行累加, 加上散射体初始位置坐标, 可得每个散射体 Δt 时刻后的三维坐标。

3) 计算 Δt 时刻的路程差 Δl : 计算第 n 个散射体 S^n 与发端 A_T 、收端 A_R 之间的欧式距离 $|S^n A_T|$ 和 $|S^n A_R|$, 两段距离相加得到 Δt 时刻 A_T 与 A_R 的散射路程长度 $|A_T A_R|$; 若 $\Delta t = 0$ 时, A_T 与 A_R 的散射路程长度为 $|A_{T0} A_{R0}|$, 那么 $\Delta l = \left| |A_T A_R| - |A_{T0} A_{R0}| \right|$, 具体可参见图1。

4) 计算时域自相关函数: 把 Δl 带入式(8)得到多径信号 Δt 时刻的合成信号, 结合自相关函数的定义 $a(\tau) = E\{\mu^*(t)\mu(t+\tau)\}$ 即可求得非稳态三维散射场景的时域自相关函数。

采用射线跟踪模型可避开高微积分求解难的问题, 从几何学角度直观地模拟非稳态三维散射场景。

该模型可模拟三维空域内空中节点的相对运动和散射体以不同密度随机分布的情况; 令 $\beta_T^n = 0$, $\beta_R^n = 0$, $\beta_v^{s^n} = 0$, 该模型还可模拟非稳态散射二维场景。

3 数值仿真结果

数值仿真验证部分的初始参数为: 收端坐标 $(0,0,0)$, 发端坐标 $(-2\ 000,0,0)$ (单位: m), 载波频率 $f_c=900$ MHz, 散射体个数 $N_s = 1\ 000$, 发端相对运动方向的水平角 $\alpha_T = \pi/4$, 仰角 $\beta_T = \pi/3$ 。除特别说明, 均按以上参数设置。

令 $\beta_R^n = 0$ 、 $\beta_v^{s^n} = 0$ 、 $v_T = 0$ m/s, 式(7)退化为文献[12]中的二维非稳态散射场景下的时域自相关函数。图3是文献[12]和本文式(7)的数值结果, 分别采用了蒙特卡洛高维积分法和第3节的射线跟踪法。3条曲线具有较好的重合度, 尤其是当 τ 较大时, 验证了式(7)的正确性, 也说明本文所建三维模型可将文献[12]的二维场景作为一个特例。

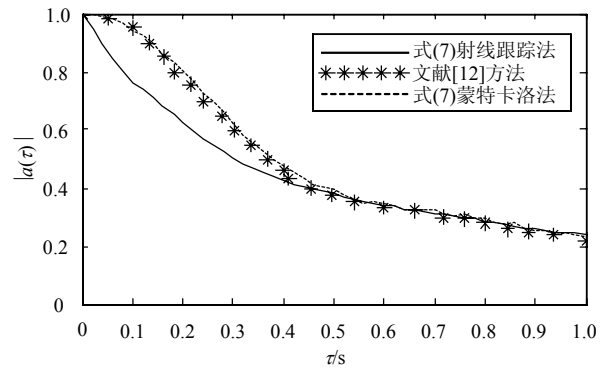


图3 二维场景下式(7)与文献[12]的对比

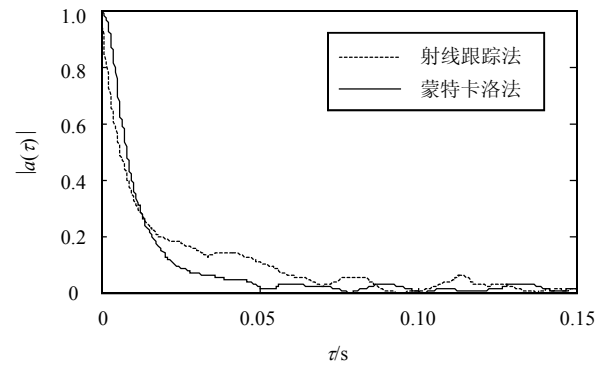


图4 三维场景下射线跟踪法对式(7)的验证结果

令 $v_{s^n} = 100$ m/s, $v_T = 100$ m/s, 图4为三维场景下射线跟踪法对式(7)的验证结果。两者具有较强的一致性, 进一步验证了三维场景下式(7)的正确性。

令 $v_T = 10$ m/s, 图5为散射体速度从 $v_{s^n} = 0$ m/s 到 $v_{s^n} = 20$ m/s 的时域自相关函数。令 $v_T = 500$ m/s,

图6为散射体速度从 $v_{s^n} = 0 \text{ m/s}$ 到 $v_{s^n} = 400 \text{ m/s}$ 变化时的时域自相关函数。前者模拟空中节点相向飞行(相对速度较小)的情况,后者则对应空中节点相背运动(相对速度较大)的场景。当收发节点之间的相对速度较小时,尽管散射体速度比较小,但仍可影响接收端信号的时域自相关函数;当收发节点之间的相对速度较大时,时域自相关函数变化明显加快,散射体速度大到一定程度才能对接收端时域自相关函数产生影响。

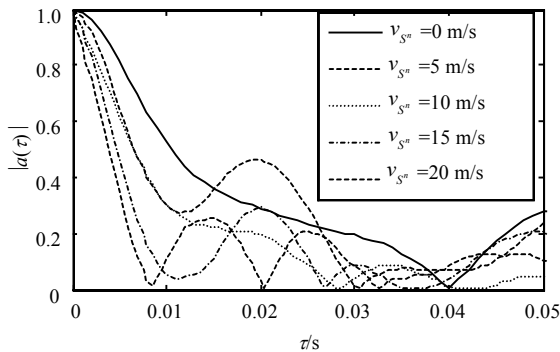


图5 $v_T = 10 \text{ m/s}$, 不同 v_{s^n} 对应的 $|a(\tau)|$

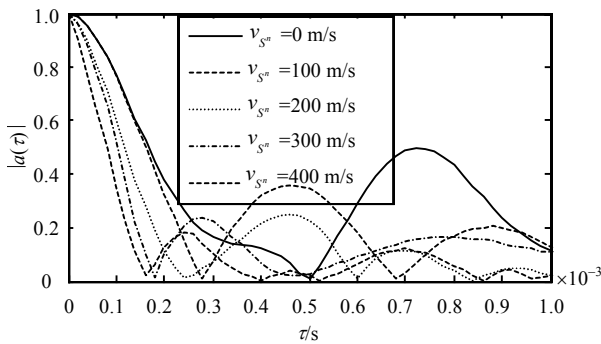


图6 $v_T = 500 \text{ m/s}$, 不同散射体速度对应的 $|a(\tau)|$

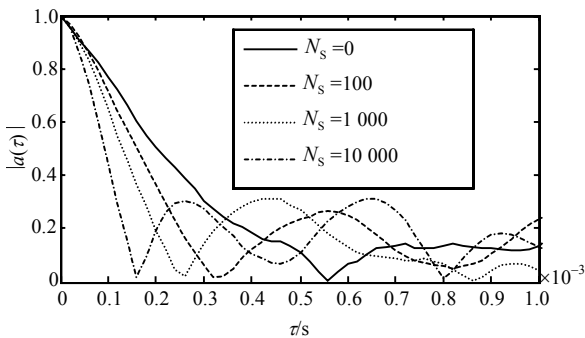


图7 $v_T = 500 \text{ m/s}$, $v_{s^n} = 300 \text{ m/s}$ 时, 不同 N_s 的 $|a(\tau)|$

航空移动通信中散射体数目会随着天气和飞行高度变换而变化。大气层中云层稀薄或节点高空飞行时,散射体数目较少;而当大气层中云层比较厚或节点近地飞行时,散射体数目将明显增加。令 $v_T = 500 \text{ m/s}$, $v_{s^n} = 300 \text{ m/s}$, 图7散射体个数 N_s 从

10~到10 000时的时域自相关函数。散射体密度越大,时域自相关函数衰减得越快,表明运动散射体确实是产生多普勒频移的重要源头。

上述曲线给出了不同节点运动速度、不同散射体运动速度和不同散射体数量情况下,非稳态三维散射场景时间自相关函数的变化趋势。该信息可估计信道建模的重要参数。对时间自相关函数 $|a(\tau)|$ 进行傅里叶变换可得到信道的多普勒功率谱 $S(f_d)$,多普勒功率谱衰减到一定程度的频带宽度为信道的多普勒扩展 B_d ,由此可得到信道的相干时间 $T_c = 1/B_d$ ^[25]。研究成果可为下一代航空移动通信的高效空空组网提供必要的物理层信息。如下一代航空移动通信的OFDM、MIMO系统的符号周期应小于相干时间以减小时间选择性衰落,时域导频间隔应小于相干时间以保证信道估计质量,天线之间的相干距离 $d = vT_c$ (v 为电磁波传播速度),发射分集时间应大于相干时间以达到多径分集抗衰落的作用。

4 总 结

本文将二维非稳态散射场景的自相关函数求解办法推广到了三维场景,给出该数学表达式,建立射线跟踪法的仿真模型,通过与蒙特卡洛高微积分数值解进行比较验证了该表达式的正确性。数值仿真表明三维非稳态散射场景的时域自相关函数的衰减速度随节点运动速度、散射体运动速度和分布密度的增加而增加。该模型与求解办法具有较强的推广性:1) 通过降维可等效为二维散射场景;2) 可在三维空域内模拟空中节点相对运动;3) 可模拟空中节点周围散射体不同密度随机分布的情况。研究成果可为下一代航空移动通信的高效空空组网提供必要的物理层信息。若融入地面通信环境的基本特征,还可用于车联网等典型地面移动自组网的通信链路的统计特性分析。本文后期将进一步研究融入MIMO体制的非稳态三维散射场景下的信道二阶统计特性。

参 考 文 献

- [1] MEDINA D, HOFFMANN F, AYAZ S, et al. Feasibility of an aeronautical mobile ad hoc network over the north atlantic corridor[C]//5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. San Francisco, CA: IEEE Press, 2008: 109-116.
- [2] NEJI N, LACERDA R D, AZOULAY A, et al. Coexistence between the future aeronautical system for continental communication L-DACS and the distance measuring equipment DME[C]//IEEE First AESS European

- Conference on Satellite Telecommunications. Rome: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [3] TAKIZAWA K, ONO F, TSUJI H, et al. Air-to-air radio channel measurement at 2.3 GHz for unmanned aircraft services[C]//16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Atlantic City, NJ: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [4] ZHOU Qi, GU Wen-zhe, LI Jing-lin, et al. A topology aware routing protocol based ADS-B system for aeronautical ad hoc networks[C]//8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China: IEEE Press, 2012: 1-4.
- [5] LEI Lei, WANG Dan, ZHOU Liang, et al. Link availability estimation based reliable routing for aeronautical ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 20: 53-63.
- [6] FISTAS N. Future aeronautical communication system-FCI [C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). [s.l.]: [s.n.], 2009: 13.
- [7] 刘竹林, 高清. 被动式电离层信道参量实时探测系统[J]. 电子科技大学学报, 1991, 20(2): 133-137.
LIU Zhu-lin, GAO Qing. Real-time detecting parameters system for passive ionospheric channel[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1991, 20(2): 133-137.
- [8] 李忻, 聂在平, 伍裕江. 移动性对MIMO无线信道性能的影响[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 503-506.
LI Xin, NIE Zai-ping, WU Yu-jiang. Impact of mobility on performances of MIMO wireless channels[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(5): 503-506.
- [9] CLARKE R H. A statistical theory of mobile-radio reception [J]. Bell Systems Technologies. 1968, 47(6): 957-1000.
- [10] AULIN T. A modified model for the fading signal at a mobile radio channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1979, 28(3): 182-203.
- [11] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. The global in-flight internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(9): 1748-1757.
- [12] BORHANI A, P'TZOLD M. Modeling of vehicle-to-vehicle channels in the presence of moving scatterers[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Quebec City: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [13] BORHANI A, P'TZOLD M. Correlation and spectral properties of vehicle-to-vehicle channels in the presence of moving scatterers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(9): 4228-4239.
- [14] ZAJIC A G, STÜBER G L. A 3-D simulation models for wideband MIMO mobile-to-mobile channels[C]//IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE Press, 2007: 1-5.
- [15] ZAJIC A G, STÜBER G L. Three-dimensional modeling, simulation, and capacity analysis of space-time correlated mobile-to-mobile channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2042-2054.
- [16] SAMARASINGHE P, LAMAHEWA T, ABHAYAPALA T, et al. 3D mobile-to-mobile wireless channel model[C]//Australian Communications Theory Workshop. Canberra, ACT: IEEE Press, 2010: 30-34.
- [17] WU T M, TSAI T H. Novel 3-D mobile-to-mobile wideband channel model[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Toronto, Canada: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [18] RIAZ M, NAWAZ S J, KHAN N M. 3D ellipsoidal model for mobile-to-mobile radio propagation environments[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 72: 2465-2479.
- [19] WALTER M, GLIGOREVIC S, DETERT T, et al. UHF/VHF air-to-air propagation measurements[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Barcelona, Spain: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [20] WALTER M, SCHNELL M. Statistical distribution of line-of-sight and reflected path in the aeronautical channel[C]//IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference. Seattle, WA: IEEE Press, 2011.
- [21] PAN Q, LIU S, XU M, et al. Finite-state markov model for the aeronautical channel[C]//5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing, China: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [22] PATZOLD M. Mobile radio channels[M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [23] CLARKE R H. 3-D mobile radio channel statistics[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1997, 46(3): 798-799.
- [24] 张更新, 张杭. 卫星移动通信系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
ZHANG Geng-xin, ZHANG Hang. Mobile satellite communication system[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2001.
- [25] 庄铭杰, 郭东辉. 移动通信中无线信道特性的研究[J]. 电讯技术, 2004(5): 35-40.
ZHUANG MING-jie, GUO Dong-hui. Study on the characteristic of wireless channels in mobile communication [J]. Telecommunication Engineering, 2004(5): 35-40.