

海南发射场测控雷达海杂波建模与仿真

周 敏 蔡红维 阮 航 龚建泽
(中国西昌卫星发射中心 西昌 615000)

摘 要: 海南发射场雷达测控设备工作时面临着较严重的海杂波影响,为此需要建立准确的海杂波模型,研究和掌握海杂波的性质。研究了球不变随机过程法(SIRP)产生相参相关 K 分布海杂波的仿真模型;其中,采用了基于复倒谱的方法来产生相关高斯随机序列;最后,开展了仿真实验。结果表明,本方法模拟产生的海杂波在概率分布和功率谱特性上与理论值都吻合,说明该方法是准确和有效的。该方法对开展海杂波条件下测控雷达检测性能研究和杂波抑制方法研究都有重要意义。

关键词: 测控雷达;海杂波;相参相关 K 分布;球不变随机过程法;仿真

中图分类号: TN391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Modeling and simulation of the sea clutter for telemetry and control radars in Hainan launch site

Zhou Min Cai Hongwei Ruan Hang Gong Jianze
(Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China)

Abstract: Sea clutters impact seriously on the performance of telemetry and control radars in Hainan launch site. Therefore, it is necessary to establish a correct mathematical model to research the characteristics of the sea clutters. The simulation model for generating coherent correlated K-distributed sea clutters based on SIRP is researched, and the correlated Gaussian series are generated by a method based on the complex cepstrum technology. Finally, the coherent correlated K-distributed sea clutters are generated by computer simulations. Results show that the probability distribution and the power spectrum density of the simulated sea clutters match well with the expected theoretical results, which proves that the method is correct and valid. The proposed method will benefit researches on radar detection performance analysis and clutter suppression technologies.

Keywords: telemetry and control radars; sea clutter; coherent correlated K-distribution; SIRP; simulation

1 引 言

我国海南新一代航天发射场将承担地球同步轨道卫星、大吨位空间站、探月工程三期等航天发射任务^[1]。对于海南发射场配套测控雷达而言,其在濒海环境中工作时容易受到海杂波的干扰。通常,杂波信号强度都远超目标信号,且杂波谱与目标谱接近,这些都严重制约了测控雷达对目标的检测与跟踪性能,进而影响发射任务中对目标的有效测控。研究和掌握海杂波的性质,建立准确的海杂波模型,对研究测控雷达

在海杂波条件下的检测性能、杂波抑制能力,以及抗干扰都具有十分重要的意义^[2-3]。

海杂波的特性十分复杂,与发射信号的波长、极化、入射角等因素有关,且受海况影响较大^[4]。经过多年的努力,目前国内外已开展了大量针对海杂波特性的研究实验。现有研究表明,对于高分辨、低入射余角的海杂波,K 分布不仅可以在很宽的范围内与观测杂波数据幅度分布匹配,而且还能模拟杂波回波脉冲间的相关性,是目前公认能精确反映雷达杂波的模式^[5]。

实现高速有效地生成具有指定相关特性和幅度分布特性的杂波序列,是杂波模拟的重要任务。L. James 给出了相关 K 分布的零记忆非线性变换 (ZMNL) 仿真方法^[6-7],该方法虽能产生相关 K 分布杂波序列,但需要知道非线性变换前后杂波相关系数的非线性关系,且只能仿真自相关函数为实值的情况,即杂波的同相分量和正交分量是独立的。这样,模拟产生的非相参杂波只是检波后得到的杂波幅度包络,不含有相位信息。然而,当雷达进行最佳检测时不应该舍弃正交分量,且在雷达视频信号模拟时也应包含同相正交两路信号,因此,就需要研究相参相关 K 分布海杂波的模拟。

研究了一种基于球不变随机过程法 (SIRP) 的相参相关 K 分布海杂波建模和仿真方法,详细地给出了海杂波仿真的思路和步骤,仿真结果证明了该方法的有效性。

2 相关 K 分布杂波模型

在相关 K 分布模型中,海杂波的幅度被描述为 2 个因子的乘积,第 1 部分是散斑分量(快变化分量),由大量散射体的反射相干叠加而成,符合瑞利分布,相关时间大约 10 ms,可通过频率捷变实现脉间去相关;第 2 部分为基本幅度调制分量(慢变化分量),由与散射体结构有关的散射束在空间变化的平均电平所致,具有秒量级的相关时间,不受频率捷变的影响,它取平方根的 Gamma 分布表示。因此,相关 K 分布杂波可看成是用 Gamma 分布的随机变量在时间和空间上调制散斑功率。

相关 K 分布的概率密度函数如下:

$$p(z) = k[z; a, v] = \frac{2}{a\Gamma(v)} \left(\frac{z}{2a}\right)^v k_{v-1}\left(\frac{z}{a}\right), \quad z > 0, \quad a > 0, v > 0 \quad (1)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $k_v(\cdot)$ 为第 2 类修正 Bessel 函数; a 是尺度参数,由杂波的平均功率决定; v 是形状参数,对于大多数雷达杂波来说,形状参数 v 的取值范围是 $0.1 < v < \infty$ 。 $v \rightarrow 0.1$ 时,杂波有长的拖尾, $v \rightarrow \infty$ 时,杂波分布接近于瑞利分布。对于高分辨率低擦地角的海杂波, v 的值在 $0.1 \sim 3$ 。

Ward K. D. 通过对实验数据的分析,给出了 4.2 m 距离分辨率下海杂波形状参数 v 的估算公式^[8]:

$$\log v = \frac{2}{3} \log \phi + \frac{5}{8} \log l + \sigma - k_1 \quad (2)$$

(0.1° < ϕ < 10°, 100 < l < 800)

式中: ϕ 为入射角, l 为方位距离分辨率,垂直极化时参数 $K_1 = 1$,水平极化时为 $K_1 = 1.7$;顺风或逆风时的参数 $\sigma = 1/3$,侧风 $\sigma = -1/3$,无风时为 0。一般而言,随着海清级数的增加, v 值随之减小。

3 相参相关 K 分布海杂波的仿真

3.1 球不变随机过程法 (SIRP)

如图 1 所示,球不变随机过程法^[8-9]的基本思路:由高斯白噪声序列 $w(k)$ 产生一个相关的高斯随机序列 $y(k)$,然后由具有所要求的单点概率密度的实非负平稳随机变量 S 进行调制。该方法最大的优点在于输出序列 $s(k)$ 的幅度概率密度函数 PDF 和相关特性能够独立控制。

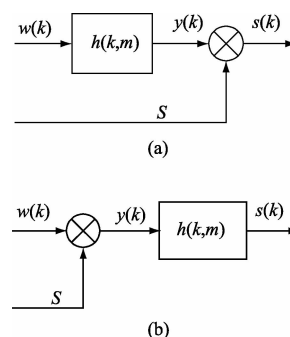


图 1 SIRP 法原理

3.2 相参相关 K 分布杂波建模

对于相参相关 K 分布,由于无法找到非线性变换前后相关函数之间的非线性关系,因而必须采用基于 SIRP 模型的杂波模拟方法。可以证明,对 SIRP 模型而言, K 分布杂波的调制分量的开方服从归一化 χ (chi) 分布^[8],其概率密度函数为:

$$p(s) = \frac{2b}{\Gamma(v)} (bs)^{2v-1} \exp(-b^2 s^2), \quad s > 0 \quad (3)$$

式中: b 为尺度参数, v 为形状参数,且满足 $b^2 = v/E(s^2)$, $E(s^2)$ 为杂波平均功率。

散斑分量服从瑞利分布,即:

$$p(x|s) = \frac{\pi x}{2s^2} \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4s^2}\right) \quad (4)$$

式中: s 由式(3)给出。调制分量和散斑分量相乘,得到 K 分布模型,其 PDF 即为式(1),满足:

$$a^2 = \frac{1}{\pi b^2} = \frac{E(s^2)}{\pi v} = \frac{\sigma^2}{2v} \quad (5)$$

式中: σ^2 为 K 分布杂波平均功率。

K 分布各阶原点距表达式为:

$$E(z^m) = \frac{2^m a^m \Gamma(0.5m+1) \Gamma(0.5m+v)}{\Gamma(v)} \quad (6)$$

式中:二阶距 $E(z^2) = 4\pi a^2$ 。

基于 SIRP 法的相参相关 K 分布杂波产生模型如图 2 所示。图 2 中, $w_1(k)$ 为一复高斯白噪声序列, $H_1(\omega)$ 由相参相关 K 分布序列 $z(k)$ 的自相关函数决定; $w_2(k)$ 为一与 $w_1(k)$ 相互独立的实高斯序列, $H_2(\omega)$ 的设计要使输出的高斯序列 $x(k)$ 具有高度的相关性,其相关系数

$r_x \approx 1$, 因而, $H_2(\omega)$ 可被设计为一个截止频率尽可能低的低通滤波器。这样设计的目的是为使 $x(k)$ 经过 ZMNL 变换后得到的输出序列 $s(k)$ 也具有较高的相关性, 即 $r_s \approx 1$, 因而, 在 $y(k)$ 与 $s(k)$ 相互独立的情况下, 输出序列 $z(k)$ 具有的相关性就只由 $y(k)$ 的相关性决定, 即 $r_z = r_y \cdot r_s \approx r_y$ 。

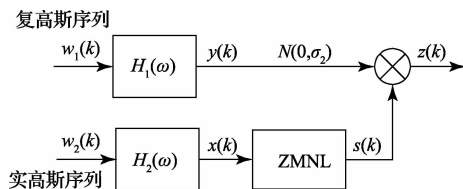


图2 基于 SIRP 产生相参相关 K 分布杂波原理

3.2.1 相参相关 K 分布的自相关特性分析

在图2中, 假设输出序列 $z(k) = u(k) + jv(k)$, $y(k) = p(k) + jq(k)$, 且该系统是时不变系统。由于调制分量 $s(k)$ 与散斑分量 $y(k)$ 相互独立, 因此得到:

$$r_z(k) = r_s(k)r_y(k) \quad (7)$$

$z(k)$ 的归一化自相关函数可以表示为:

$$r_z(k) = [R_{uu}(k) - jR_{uv}(k)]/R_z(0) = r_{uu}(k) - jr_{uv}(k) \quad (8)$$

$y(k)$ 的归一化自相关函数表示为:

$$r_y(k) = r_{pp}(k) - jr_{pq}(k) \quad (9)$$

由前述讨论知 $r_z(k) \approx r_y(k)$, 因而可以用式(8)确定滤波器 $H_1(\omega)$ 。对于滤波器 $H_2(\omega)$, 要产生高度相关的序列 $s(k)$, 要求其在频域的带宽很小, 因此只要采用一个带宽很窄的低通滤波器就可以, 没有必要对其形状进行额外的控制。

3.2.2 相参相关 K 分布概率密度函数的控制

在此, 有必要将式(3)重写如下:

$$p(s) = \frac{2b}{\Gamma(v)} (bs)^{2v-1} \exp(-b^2 s^2), \quad s > 0 \quad (10)$$

由前述讨论可知, 输出 K 分布杂波的自相关特性由 $y(k)$ 决定, 而概率密度函数则由 $s(k)$ 决定。接下来就是解决如何通过非线性变换 ZMNL 方法产生符合概率密度函数分布的序列。在此, 设非线性变换为 $g_1(x) = |g_0(x)|$, 其中 $g_0(x)$ 是 x 的奇函数, 变换产生了对称的概率密度函数:

$$f_s(s) = \frac{f_s(s) + f_s(-s)}{2} \quad -\infty < s < \infty \quad (11)$$

其概率分布为:

$$F_{s_0}(s) = \frac{1}{2} + \frac{F_s(s) - F_s(-s)}{2} \quad (12)$$

式中: $F_s(s)$ 是 $s(k)$ 的概率分布函数, $F_{s_0}(s)$ 是 $g_0(z)$ 变换产生结果的概率分布函数。若 $s' = F_x(x)$, 其中 $F_x(x)$ 是 x 的概率分布函数, 则 s' 是 $(0, 1)$ 上的均匀分布变量。同理, 若有一随机变量满足 $s' = F_s(s)$, s' 也是 $(0, 1)$ 上的均匀分布变量, 因此有:

$$F_x(x) = F_s(s) \quad (13)$$

且有:

$$F_x(x) = F_{s_0}(s_0) \quad (14)$$

由于 ZMNL 输入序列 $x(k)$ 服从 $N(0, 1)$ 分布, 有 $F_x(x) = 1 - Q(x)$, 其中 $Q(x)$ 为标准正态分布的尾部面积, 满足:

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{1}{2} [1 - \operatorname{erf}(x/\sqrt{2})] \quad (15)$$

式中: $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ 。

将非线性变换 $s_0 = g_0(x)$ 代入式(14)得:

$$F_{s_0}(g_0(x)) = F_x(x) \quad (16)$$

将式(16)表示成 $F_{s_0}^{-1}(\cdot)$ ($F_{s_0}(\cdot)$ 的反函数形式), 有:

$$g_1(x) = |g_0(x)| = |F_{s_0}^{-1}(1 - Q(x))| \quad (17)$$

将式(10)代入式(16)得到:

$$\int_0^s \frac{2b^{2v}}{\Gamma(v)} t^{2v-1} \exp(-bt^2) dt = 1 - Q(x) \quad (18)$$

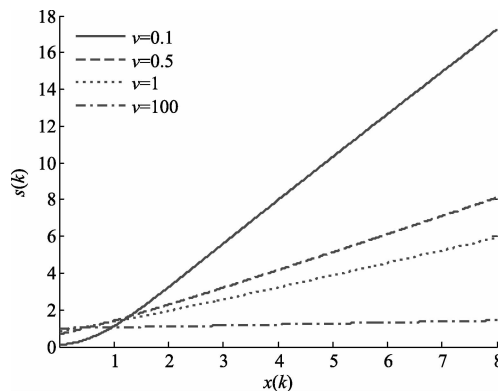
令 $vt^2 = t'$, 且满足 $E(s^2) = 1$ 时, $b^2 = v/E(s^2) = v$, 可将式(18)简化为:

$$\frac{\int_0^{vs^2} t'^{(v-1)} e^{-t'} dt'}{\Gamma(v)} = 1 - Q(x) \quad (19)$$

即:

$$\gamma(vs^2, v) = 1 - Q(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (20)$$

式中: $\gamma(vs^2, v) = \frac{1}{\Gamma(v)} \int_0^{vs^2} t'^{(v-1)} e^{-t'} dt'$ 为不完全伽马函数, 且式(20)隐含了 $s(k)$ 与 $x(k)$ 之间的非线性关系, 可用曲线表示如图3所示。

图3 非线性变换 $x(k)$ - $s(k)$ 曲线

从图中可见, 当 $v \rightarrow \infty$ 时, $s(k) = 1$, 即输出的调制分量恒为 1, 此时, K 分布变为只由散斑分量组成的瑞利分布。

4 相关高斯随机序列的产生

从以上分析中可知, 要产生相关 K 分布序列, 首先要将独立同分布的高斯随机序列通过线性滤波器

$H_1(\omega)$ 产生具有所要求相关特性的相关高斯序列(散斑分量)。相关高斯序列的产生方法有基于 AR 模型的时域参数化方法、基于复倒谱的频域法^[10]等。当要生成的随机序列长度很大时,用时域实现较为困难,采用基于复倒谱的频域法来产生相关高斯随机序列,其原理如图 4 所示:相关高斯序列的相关系数为 $r(n)$, 变换至频率域后,其功率谱密度为 $R(\omega)$, 将频域归一化后

得到线性滤波器的幅值 $|H(\omega)| = \sqrt{R(\omega)/r(0)}$, 利用基于最小相位特性和复倒谱技术求解,使得 $H(\omega)$ 为物理可实现。同时,将不相关、独立同分布的高斯序列 $x(n)$ 变换至频域 $X(\omega)$, 将其与 $H(\omega)$ 相乘得到 $S_w(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega)$ 。将得到的 $S_w(\omega)$ 进行傅里叶逆变换,就得到了功率谱密度为 $R(\omega)/r(0) = |H(\omega)|^2$ 的相关高斯随机序列。

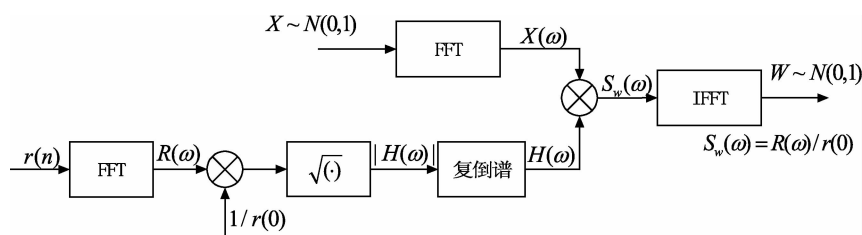


图 4 相关高斯序列频域生成法

利用最小相位特性和复倒谱技术求解物理可实现滤波器的过程如下^[10]：

- 1) 对 $|H(\omega)|$ 求对数, 即 $\hat{H}_R(k) = \ln |H(k)|$;
- 2) 对 $\hat{H}_R(k)$ 求反傅里叶变换, 得到 $\hat{h}_e(n) = \text{ifft}[\hat{H}_R(k)]$, $\hat{h}_e(n)$ 即为复倒谱 $\hat{h}(n)$ 的偶部;
- 3) 由于 $h(n)$ 为最小相位系统, 因此复倒谱 $\hat{h}(n)$ 是因果序列, 由 $\hat{h}_e(n)$ 恢复复倒谱 $\hat{h}(n)$, 即 $\hat{h}(n) = \hat{h}_e(n) \cdot u(n)$, 其中 $u(n)$:

$$u(n) = \begin{cases} 2, & n > 0 \\ 1, & n = 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (21)$$

- 4) 求复倒谱 $\hat{h}(n)$ 的傅里叶反变换, 即 $\hat{H}(k) = \text{ifft}[\hat{h}(n)]$;

- 5) 得到物理可实现的线性滤波器频率响应: $H(k) = \exp[\hat{H}(k)]$ 。

5 仿真实验结果与分析

仿真采用高斯型功率谱, 见式(22):

$$S(f) = \exp[-(\mu(f - f_0)/f_{3\text{dB}})^2] \quad (22)$$

式中: 为使 $S(f_{3\text{dB}}/2) = 0.5$, $\mu = 1.665$; $f_{3\text{dB}}$ 为杂波功率谱的半功率点宽度。

在频域对功率谱进行采样时, 频率间隔取 $\Delta f = 5f_{3\text{dB}}/N$, N 为所需产生的海杂波序列的长度。仿真参数设置如下: 半功率点宽度 $f_{3\text{dB}} = 60 \text{ Hz}$, 相参相关 K 分布形状参数取 $\nu = 1$, 尺度参数 $a = 1$, 杂波仿真点数 $N = 2048$ 。通过 100 次蒙特卡洛仿真实验获取其平均值, 实验中采用 Burg 法对杂波随机序列进行功率谱估计。仿真结果如图所示。图 5 为仿真获取的杂波实部和虚部波形。图 6 和图 7 中可见, 仿真获得的相参

关 K 分布杂波数据幅度的统计直方图和概率分布曲线与理论值拟合很好。图 8 中, 对仿真数据进行 Burg 法功率谱估计所得曲线与理论曲线拟合很好。说明利用 SIRP 法可有效模拟相参相关 K 分布海杂波的幅度概率分布特性和功率谱特性, 即可以准确有效地仿真相参相关 K 分布海杂波。

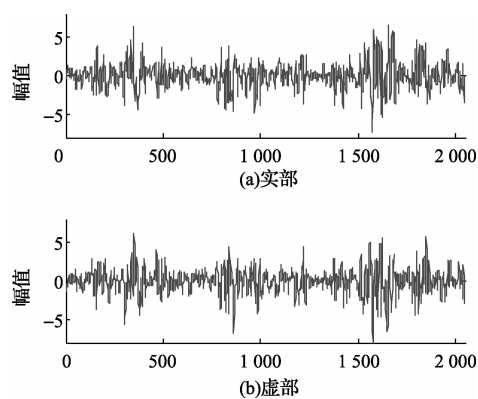


图 5 生成杂波实部和虚部

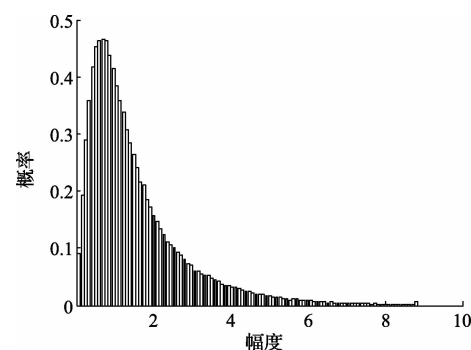


图 6 仿真杂波幅度分布直方

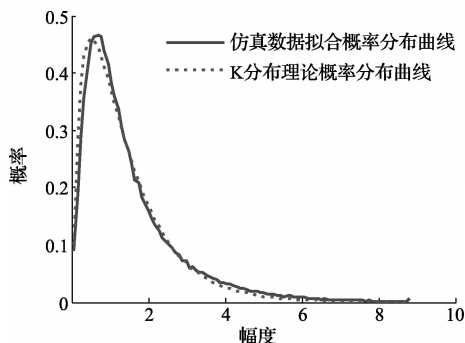


图7 仿真与理论概率分布曲线

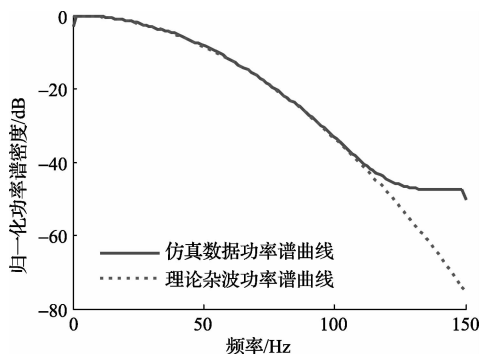


图8 仿真与理论功率谱密度曲线

6 结 论

对海南发射场测控雷达海杂波的建模与仿真进行了研究。着重分析了相参相关K分布海杂波的模型,基于相参相关K分布的统计分布特性,利用球不变随机过程法(SIRP)对符合一定概率分布和高斯功率谱分布的海杂波的仿真方法进行了理论分析和仿真验证。结果表明,产生的海杂波完全能符合所要求的幅度分布和功率谱特性。本方法产生的相参相关K分布杂波可用于海南发射场测控雷达系统仿真、雷达信号模拟、雷达信号检测等方向。

参 考 文 献

- [1] 张宇,曹建峰,谢剑锋,等. 基于地基无线电测量的月面目标精确定位技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10):907-915.
- [2] 韩雪谦,黄湘鹏,黄晓刚,等. 海杂波背景下小目标检测性能研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(7):19-21,26.
- [3] 丁一鹏,方广有. 一种高性能的连续波穿墙定位系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12):2781-2788.
- [4] 何艳丽,黄飞龙. 地波雷达在海面风场探测的应用[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12):80-83.
- [5] WATTS S. Modeling and simulation of coherent sea clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(4):3303-3317.
- [6] 杜勇,李依林,杨海粟,等. 基于ZMNL法的相关雷达杂波建模与仿真[J]. 火控雷达技术, 2012, 41(4):11-14.
- [7] 张宝宝,胡艳辉,罗丰,等. 相关K分布海杂波的建模与仿真[J]. 现代雷达, 2007, 29(4):24-27.
- [8] 王海滨,许馨元,解传军,等. 基于SIRP法的机载脉冲雷达杂波仿真[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(1):85-88.
- [9] 周万幸. 基于SIRP的时空相关K-分布海杂波仿真研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12):2672-2676.
- [10] 姜斌,王宏强,和湘,等. 一种改进的ZMNL雷达杂波仿真方法[J]. 信号处理, 2007, 23(3):348-351.

作 者 简 介

周敏,1974年出生,工学学士,高级工程师,主要研究方向为航天测控系统总体等。

E-mail:dragonhang9@163.com