基于海面散射的莱斯 MIMO 信道容量研究

朴大志 12, 李启虎 1, 孙长瑜 1

(1. 中国科学院声学研究所,北京 100080; 2. 中国传媒大学信息工程学院,北京 100024)

摘要:通过相关莱斯信道模型对海面散射水声多入多出(MIMO)信道容量进行了研究。从 Helmholtz-Kirchhoff 积 分和 Fresnel 近似出发,得到海面散射信号的空间相关性,由于信道的协方差矩阵不可以表示成发射相关矩阵和接 收相关矩阵的 Kronecker 积,通过 Monte Carlo 仿真研究了莱斯因子、接收信噪比和空间相关性对 MIMO 信道容 量的影响。从对 outage capacity 和信道容量的 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function) 的仿 真计算结果可以看出,莱斯衰落的 MIMO 信道容量并不总是小于瑞利衰落 MIMO 信道容量,当信道的空间相关性 较大和接收信噪比较小时,由于信道的衰落作用将起主要作用,对于较小的收发阵元数,以非衰落的直达信号为主 的莱斯 MIMO 信道容量将大于瑞利衰落的 MIMO 信道容量。

关键词: 莱斯 MIMO;空间相关;海面散射;信道容量 中图分类号: TN929.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2007)-04-0557-07

Rician MIMO capacity of sea-surface scattered underwater acoustic channel

PIAO Da-zhi^{1,2}, LI Qi-hu¹, SUN Chang-yu¹

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China,
 Information Engineering College, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: The effect of Rician Factor (RF) and spatial correlation on the Ricean MIMO capacity is studied based on the sea-surface scattered underwater acoustic Rician fading channel. The spatial correlation of the sea-surface scattered signal is derived with the integrel of Helmholtz-Kirchhoff and the Fresnel approximation. We find that covariance matrix of this channel cannot be expressed as the Kronecker product of the transmit correlation function and the receive correlation function. Therefore dependence of MIMO capacity on RF, received SNR and the factors affecting spatial correlation such as element spacing and wind speed are studied through Monte Carlo simulation. From the simulation results of the outage capacity and CCDF of the capacity, the MIMO capacity of Rician channels is not always lower than that of the Rayleigh channels. When there are strong spatial correlations and low receive SNR, fading is more significant in the MIMO channels. For a small number of transmitting and receiving elements, the Rician MIMO capacity composed mainly of deterministic LOS signal will be greater than the Rayleigh fading MIMO capacity. Key words: Rician MIMIO; spatial correlation; sea-surface scattering; channel capacity

1 引 言

与距离和频率有关的吸收损失,使水声信道中 可以提供的带宽非常有限,因此要达到更高的信息

收稿日期:2006-05-18; 修回日期:2006-09-10 基金项目:国家自然基金重点项目资助(60532040) 作者简介:朴大志(1977-),女,讲师,研究方向:无线通信,水声通信。 通信作者:朴大志,E-mail:piaodazhi@sina.com 传输率需要更有效的利用这有限的频带资源,另外, 由于水声信道的散射特性,使其具有多径传播现象, 因此在发射和接收端同时使用多个阵元的 MIMO 技术在提高水声信道的频谱效率方面具有很大的潜 力,从文献[1]~[3]可以看到,在平坦的 Rayleigh 衰 落环境中,当所有收发阵元对之间的信道传播系数 相互统计独立时,理论上 MIMO 通信系统的信道容 量随着收发阵元数的增加而线性增加,文献[4]中的 实验结果也证明了 MIMO 技术可以使水声通信获 得较高的频带利用率,因此水声 MIMO 技术也成为 高速水声通信研究的新兴热点,而通过对某种典型 的水声信道建模来进行 MIMO 信道容量的估计是 水声 MIMO 信道容量研究的另一种重要方向。

当无线通信的环境中充满了幅度接近的随机多 径信号时,瑞利信道可以用来描述它的衰落特性,然 而当收发之间存在较强的直达(line-of-sight)信号 时,莱斯衰落模型可以更好的描述这种信道。文献 [5] 通过仿真研究了不同 RF 下, 莱斯 MIMO 信道容 量随收发阵元数的变化, 文献[6] 得到了两个发射或 接收阵元情况下的莱斯 MIMO 信道容量的概率密 度和分布函数,在文献[7]中,当发射端没有信道的 衰落信息时,得到了信道容量的概率分布,当发射端 已知信道衰落过程的概率分布而不知道信道的瞬时 状态信息时,得到了信道容量的上、下界。在文献[5] ~[7]的研究中,均认为各个收发阵元对之间的信道 响应的衰落是相互独立的,然而在一些实际的无线 通信环境中,信道矩阵的各个元素的衰落会存在一 定的相关性,在文献[8]中考虑了空间相关的莱斯 MIMO 信道,得到了当发射或接收阵的某一端存在 相关性时,莱斯 MIMO 信道容量的均值的上、下界, 在文献[9]中,得到了发射和接收端同时存在相关性 时莱斯 MIMO 信道容量均值的上、下界,并采用高 斯近似分析了高信噪比时 outage capacity, 在文献 [9] 的相关性假设中, 认为信道的协方差矩阵可以写 成发射相关矩阵和接收相关矩阵的 Kronecker 积, 这也是在研究瑞利相关 MIMO 信道容量的一种常 用假设,然而这种假设在本文的在水声信道中是不 满足的,另外,对一个随机的信道容量,它的均值只 能提供一种粗略的估计,更完整的描述需要得到它 的分布函数, 而对于这种协方差矩阵不能表示成发 射相关矩阵和接收相关矩阵的 Kronecker 积的莱斯 MIMO 信道,在数学上得到它的信道容量的分布函 数很困难,因此本文通过蒙特卡罗仿真来进行研究。

在水声通信中,当收发端距离海面较近且通信 距离远大于收发阵的深度时,接收的信号将以海面 随机散射信号和非衰落的直达信号为主,这种信道 可以描述为莱斯衰落模型。其中来自海面的随机散 射部分可以看成瑞利衰落信号,并且各个收发阵元 对之间的衰落具有一定的空间相关性,因此,本文主 要研究这种情况下的水声莱斯 MIMO 信道容量。我 们首先利用 Helmholtz-Kirchhoff 积分和 Fresnel 近似得到海面散射信号的空间相关性,然后通过仿 真来研究莱斯因子、接收信噪比和空间相关性对 MIMO信道容量的影响。

2 Rician 信道模型与 MIMO 信道容量

考虑一个 MIMO 系统具有 n_T 个全向发射阵元 和 n_R 个全向接收阵元,发射和接收信号矢量的关系 可以表示为

$$y(t) = H(t) * x(t) + n(t)$$
 (1)

其中 x(t) 是 $n_T \times I$ 发射信号矢量, y(t) 是 $n_R \times I$ 接收 信号矢量, H(t) 是由复信道增益 $h_{ij}(t)$ 构成的 $n_R \times n_T$ 信道传播矩阵, n(t) 是 $n_R \times I$ 加性白高斯噪声矢量, 其 中的各个元素是 IID(independent and identically distributed) 的复高斯变量, 方差为 N_{oo}

在窄带通信系统中,可以看成具有平坦的频率 响应,则式(1)可以写成

y=Hx+n (2) 先考虑单用户 MIMO 系统, 信道状态信息在发射端 未知而在接收端已知时, 将发射功率均匀分配的平 坦莱斯衰落信道, 这种情况下 MIMO 系统的信道容 量(单位: bps/Hz) 可以表示为^[1,3],

C=log₂det(I_{n_k}+(SNR/n_T)HH⁺) (3) 其中 H⁺是 H 的共轭转置, det(·)是求矩阵的行列式, I_{n_k}是 n_R xn_R 单位阵, SNR 是每个接收阵元处的平均 信噪比。设由海面散射和 LOS(Line Of Sight)信号 组成的莱斯信道矩阵可以表示为

H_{Rice}=aH_{Los}+bH_{Rayleigh} (4) 在此定义 RF 为 RF=a²/b²,其中 a²+b²=1,用来描 述直达信号的强弱,当 RF=0 时相当于瑞利衰落。考 虑远场平面波,对于 H_{Los}中的元素

h_{ij}=exp(jkr_{ij}) (5) 其中 j=√-1, k= /c, 为波数,本文中假设水中声 速 c=1 500m/s, r_{ij} 为第 j 个发射阵元与第 i 个接收 阵元之间的距离。

3 海面散射信号的空间相关性

下面考虑由海面散射构成的 Rayleigh 衰落信 号的空间相关性,如图 1 所示,其中 ᠠ 与 ⊮ 分别 是发射和接收阵的水平角。根据 Helmholtz-Kirchhoff 积分[™],第i 个发射阵元与第j 个接收阵元间 的信道响应可以写成

 $h_{ij} = \frac{k \sin \theta_{T_i}}{r_{T_j} r_{R_i}} \int_{-} dsexpik(|R - r_{T_j}| + |R - r_{R_i}|)$ (6)

在文献[11] 中,得到了来自同一个发射源经过海面 散射的信号在空间不同位置接收的两个信号的空间 相关性,本文采用类似的方法,得到两个链路 T_i- R_j 和 T_{i1}- R_{j1} 之间的相关函数

$$h_{ij}h_{i1j1}^{*} = \frac{k^2 \sin \theta_{T_j} \sin \theta_{T_{j1}}}{r_{T_j} r_{R_j} r_{T_{j1}} r_{R_{j1}}} \int_{-} dsds expik$$

 $(|R - r_{T_{i}}| + |R - r_{R_{i}}| + |R - r_{T_{i1}}| + |R - r_{R_{i1}}|)$ (7) 通过 Fresnel 近似^[12],指数项可以写成 ik(r_{T_{i}} + r_{R_{i}} + \gamma_{ij} \xi(x, y) + \alpha_{ij} x + \beta_{ij} y + \delta_{ij} x^{2} + \varepsilon_{ij} y^{2} + v_{ij} xy) - ik(r_{T_{i}} + r_{R_{i}} + \gamma_{i1j1} \xi(x, y) + \alpha_{i1j1} x + \beta_{i1j1} y + \delta_{i1j1} x^{2} + \varepsilon_{i1j1} y^{2} + v_{i1j1} x y) (8)

其中, $\xi(x, y)$ 是海面高度(相对于平面 z=0),它是 x,y 的随机函数,一般假设为 Gaussian 分布,其中

$$\alpha_{ij} = -(\cos\theta_{T_{j}}\cos\varphi_{T_{j}}) - (\cos\theta_{R_{j}}\cos\varphi_{R_{j}})$$

$$\beta_{ij} = -(\cos\theta_{T_{j}}\sin\varphi_{T_{j}} - \cos\theta_{R_{j}}\sin\varphi_{R_{j}})$$

$$\delta_{ij} = \frac{1 - (\cos\theta_{T_{j}}\cos\varphi_{T_{j}})^{2}}{2r_{T_{j}}} + \frac{1 - (\cos\theta_{R_{j}}\cos\varphi_{R_{j}})^{2}}{2r_{R_{j}}}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 - (\cos\theta_{T_{j}}\cos\varphi_{T_{j}})^{2}}{2r_{T_{j}}} + \frac{1 - (\cos\theta_{R_{j}}\cos\varphi_{R_{j}})^{2}}{2r_{R_{j}}}$$

$$V_{ij} = \frac{2\cos^{2}\theta_{T_{j}}\cos\varphi_{T_{j}}\sin\varphi_{T_{j}}}{r_{T_{j}}} + \frac{2\cos^{2}\theta_{R_{j}}\cos\varphi_{R_{j}}\sin\varphi_{R_{j}}}{r_{R_{j}}}$$

$$\gamma_{ij} = -(\sin\theta_{T} - \sin\theta_{R_{j}}) \qquad (9)$$

通过化简可以得到

$$\begin{split} h_{ij} h_{i1j1}^{*} &= G[qQ(C_{xx}C_{yy} - C_{xy}^{2} / 4)]^{-0.5} \\ &= \exp[C_{1^{-}} (C_{x}^{2}C_{yy} - C_{x}C_{y}C_{xy} + \\ C_{y}^{2}C_{xx}) / (4C_{xx}C_{yy} - C_{xy}^{2})] \end{split}$$

其中 G= $\frac{k^2 \sin \theta_{T_j} \sin \theta_{T_{j+1}}}{r_{T_j} r_{R_j} r_{T_{j+1}} r_{R_j}} \exp[-(\gamma_{ij} - \gamma_{i1j})^2 \sigma^2/2 + i k(r_{T_j} + r_{R_j})^2 r_{R_j} r_{R_j}$

- r_{T,1}- r_{R,1})], 其它参数与文献[11] 中相同。两个链路 T_i- R_j 和 T_{i1}- R_{j1} 之间的归一化相关系数可以表示为

 $\rho_{ij,i1,j1} = h_{ij}h_{i1j1}^{*} / (h_{ij}h_{ij}^{*} h_{i1j1}h_{i1j1}^{*})^{1/2}$ (11)



图 1 收发阵几何关系示意图 Fig.1 Geometry for transmit and receive array

从式(9)~(11)中可以看到海面散射信号的空间相关 性与风速,收发阵参数如阵元间距、方向、深度、距离 等都有关系,图 2 和图 3 仅以|_{21,33}|为例,描述了不 同收发阵方向下,空间相关性与收发阵深度和阵元间 距之间的关系(其中假设 $n_{T}=n_{R}$,同时变化)。从图 2 中可以看出,当收发阵的方向变化时,空间相关性与 收发阵深度的关系也会改变,从图 3 中可以看出,随 着收发阵元间距的增加,空间相关性将逐渐减小,当 方向不同时以不同的速度减小,当 $n_{T}=n_{R}=90$ (垂直 收发阵)时减小的速度最大。图 2 和图 3 的计算参数为 f=10kHz, xt₁=-1000m, xr₁=1000m, 风速为 15kn。



图 2 不同收发阵方向下收发阵深度对相关系数[p_{21,38}]的影响 Fig.2 Dependence of [p_{21,38}] on array direction and depth(*dt=dr=0.5*λ)



图 3 不同收发阵方向下收发阵元间距对相关系数|p_{21,39}|的影响 Fig.3 Dependence of |p_{21,39}| on array direction and element spacing (*zt*₁=*zr*₁=100m)

在[9]中的相关性假设中,认为信道矩阵的每一 列都具有相同的协方差矩阵,即接收相关矩阵 R,也 就是认为接收相关矩阵与发射阵元的位置无关,类似 地,认为每一行的发射相关矩阵矩 S 与接收阵元的位 置无关,则信道矩阵的统计特性可以用 R^{1/2}H_wS^{1/2} 来 描述,其中 H_w 是零均值、单位方差的 IID 复高斯矩 阵。在这里,从式(7)~(10)和图 2、3都可以看出,由 于相关性与收发阵元的位置有关,所以,对于来自 不同的发射阵元的各个接收阵元的信号之间的相 关性是不同的,也就是说信道矩阵的每一列信号的 协方差矩阵是不相同的,同样,每一行信号的发射 矩阵也是不同的,因此信道矩阵不能写成 R^{1/2}H_wS^{1/2} 的形式。而基于发射和接收矩阵 kroneker 积的信道 相关性假设,可以利用一些关于非中心 wishart 矩 阵的分布来对 MIMO 信道容量进行分析,而当这种 相关性不满足时,很难从数学上得到相关莱斯 MIMO 信道容量的分布的表达式,因此,本文通过 Monte Carlo 仿真来进行信道容量的研究。

4 仿真结果

4.1 相关随机变量的产生

产生具有任意相关性的 M 个随机变量, 可以首





先分解它们的协方差矩阵 R, 即 R=GG, 然后将 M 个独立的高斯变量与 G 相乘, 就可以得到 M 个具 有协方差矩阵 R 的高斯随机变量^[13]。

4.2 仿真结果及简要分析

对于随机变化的信道,它的信道容量也是随机 变量,在这种情况下,一般用 C_{out} (outage capacity) 来描述信道容量,它与 P_{out} 有关, P_{out} 被定义为信道 容量小于 C_{out} 的概率,例如 C_{05} 意味着在信道容量 的各种实现中不能支持它的概率为 50%。

首先由式(11)得到海面随机散射信号的空间互 相关系数,然后得到具有这种互相关性的瑞利衰落 信道矩阵,并利用式(4)得到莱斯信道矩阵,然后根 据式(3)来计算信道容量,从而研究各种参数对相关 莱斯 MIMO 信道容量的影响。

在莱斯信道中, 莱斯因子 RF 是一个重要的参数,前文也提到,它描述了信道中直达的确定信号能



图 4 不同 RF下 MIMO 信道容量随收发阵元数的变化(SNR=0dB) Fig.4 Outage capacity versus array element number with different RF















图 7 不同收发阵元数下 RF 对信道容量随的影响(SNR=10dB) Fig.7 Outage capacity versus on RF with different element number









Fig.9 Dependence of outage capacity on element spacing with different element number (wind speed 15kn)

量与海面散射的随机信号能量之比,当 RF 较小时, 信道更接近于随机的瑞利衰落信道,从而信道容量 受互相关性的影响较大,所以本文将从 RF 和空间 相关性两个方面研究海面反射的水声莱斯 MIMO 信道容量。

对于如图 1 所示的均匀直线阵,设收发阵元数 为 m,则各个收发阵元的坐标可以表示为 $xt_j=xt_1+cos(h_T)(j-1)dt, zt_j=zt_1+sin(h_T)(j-1)dt, xr_i=xr_1+cos(h_R)(i-1)dr, zr_i=zr_1+sin(h_R)(i-1)dr, 其中 j=1:m, i=1:m, (xr_1, zr_1), (xt_1, zt_1)分别为收发阵第一个阵元的坐标, dt, dr 分别为发射和接收阵元间距,为了计算方便这里假设 <math>yt_i=yr_i=0$ 。

考虑两种极端的情况, 设收发阵元数为 m, 当 RF= 时, 对于非衰落的直达信号, 信道容量趋近于

C log₂(1+mSNR) (12) 对于 RF=0 的完全独立的 Rayleigh 衰落信道, 信道 容量的均值趋近于

C_{Rayleigh}mlog₂(1+SNR)(13)对于其他的 RF,信道容量将介于这两者之间。

图 4 ~图 7 分别从不同的方面描述了 RF 对莱 斯 MIMO 信道容量的影响。其中的仿真参数为 f= 10kHz, $(xt_1, xr_1, zt_1, zr_1) = (-1000m, 1000m, 100m, 100m)$, 100m), 风速为 15kn, hT= hR=30 % 由于信道空间相 关性受阵元间距的影响较大,这里选阵元间距为 0.1 和 1 两种情况($|_{21,34}$ 分别为 0.880 6 和 0.349 3), 从图 4 ~图 6 中可以看出,收发阵元间距从 0.1 到 1 变化时,当 RF 较大时更接近于直达声线构成的 确定信道,信道容量基本不发生变化,而当 RF 较小 时更接近于随机的衰落信道,信道的空间相关性会 发生较大变化,从而使信道容量随收发阵元数增加 的斜率发生变化。从图 4 中还可以看出,当 dt=dr= 1 时,对于 C_{0.01},使 C_{RF=1000}>C_{RF=0001}的 m 值为 6, 而 对于 C_{0.5}的 m 值为 2。

从式(12)和式(13)中可以看出,对于完全独立 的瑞利 MIMO 信道容量的平均值总是大于莱斯 MIMO 信道容量,然而由于瑞利信道的随机衰落作 用和空间相关性的影响,莱斯 MIMO 信道容量并不 总是小于瑞利 MIMO 信道容量,对于这一点从图 4~图 7 中都可以看到。

图 5 中描述了 RF 对信道容量的 CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function) 的影响,从图 5 中可以看到,当阵元间距从 0.1 到 1 变化时, CCDF 会向右平移,对于 m=4,平移的幅 度约为 5bps/Hz,对于 m=8,平移的幅度约为 10bps/ Hz; 另外, 当阵元间距等于 0.1 时, 当 m=4 时, 从 C_{0.5} 开始, C_{RF=1000} C_{RF=0.001}, 当 m=8 时, 从 C_{0.1} 开始, C_{RF=1000} C_{RF=0.001}, 从图 6 中也可以看出, 当阵元间距 等于 0.1 时, 对于 m=4, 当 SNR<30dB 时 C_{RF=1000} C_{RF=0.001}, 对于 m=8, SNR<15dB 时, C_{RF=1000} C_{RF=0.001}。

从图 7 中可以看出, 莱斯 MIMO 信道容量并不 总是随着 RF 的增加而减小, 尤其是当收发阵元数 较小和空间相关性较大时。当 dt=dr=1 时, 对于 m=1、2, 当 dt=dr=0.1 时, 对于 m=1、2、4、8, C₀₀₁ 都 随着 RF 的增加而增加。

由于空间相关性主要受到风速、收发阵元间距 等因素影响,图 8~图 9分别描述了这些参数对莱斯 MIMO 信道容量的影响(RF=1)。从图 8 和图 9 中可 以看出,信道容量随风速和收发阵元间距的增加而 增加,这是因为,空间相关性随风速和收发阵元间距 的增加而减小,从图 9 中还可以看出对于图中的仿 真参数,当收发阵元间距大于 0.5 时,信道容量将 不再增加,因为当收发阵元间距大于 0.5 时,信道 矩阵的各个元素之间基本上已经相互独立。另外, 从图 2 和图 3 中还可以看到,空间相关性与收发阵 方向、距离、深度等都有关系,因此,这些参数对 MIMO 信道容量产生影响,可以得到类似的结果,这 里就不再重复。

5 结 论

本文以海面散射的水声 MIMO 信道为例, 通过 仿真研究了空间相关莱斯 MIMO 信道容量随莱斯 因子、接收信噪比和空间相关性的变化情况。

当莱斯因子较大时,更接近于确定的 LOS 信 道,信道容量的随机变化较小,当阵元数和接收信噪 比较小时,莱斯 MIMO 信道容量将大于瑞利衰落的 信道容量。

当莱斯因子较小时,更接近于随机的瑞利衰落信 道,信道容量受空间相关性影响较大,当空间相关性 较大时,MIMO信道容量增益将大大减小,影响空间 相关性的因素如阵元间距,海面风速,收发阵方向、距 离、深度等都会对 MIMO信道容量产生较大的影响。

参考文献

- Winters J H, Salz J, Gitlin R D. The impact of antenna diversity on the capacity of wireless communication system[J]. IEEE Trans. Commun., 1994, 42(2, 3, 4): 1740-1751.
- [2] Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels

[R]. AT&T Bell Laboratories Murray Hill, NJ, Tech. Rep. # BI0 112 170-950-615-07 TM, 1995.

- [3] Foschini G J, Gans M J. On the limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Pers. Commun., 311-335, 1998, 6 (3): 311-335.
- [4] Zatman M, Tracey B. Underwater acoustic MIMO channel capacity[A]. Signals, systems and computers, conference record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference[C]. 2002, 2. 1364-1368.
- [5] Khalighi M A, Brossier J M, Fourdain G, Raoof K. On capacity of Ricean MIMO channels[J]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2001, 1(10): A150-154.
- [6] Smith P J, Garth L M. Exact capacity distribution for dual MIMO systems in Ricean Fading[J]. IEEE Communication letters, 2004, 8(1): 18-20.
- [7] Jayaweera S K, Poor H V. On the capacity of multiple antenna systems in Rician fading[J]. IEEE Trans. wireless

Commun., 2005, 4(3): 1102-1111.

- [8] McKay M R, Collings I B. Capacity bounds for correlated Rician MIMO channels[J]. IEEE International Conference on Communications, 2005, 2(5): 772-776.
- [9] McKay M R, Collings I B. General Capacity Bounds for Spatially Correlated Rician MIMO Channels[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2005, 51(9): 3121-3145.
- [10] Eckart C. The scattering of sound from the sea surface[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1953, 25: 566-670.
- [11] McDaniel S T. Spatial covariance and adaptive beamforming of high frequency acoustic signals forward scattered from the sea-surface[J]. IEEE J. Ocean. Eng. 1991, 16 (4): 415-419.
- [12] Melton D R, Hortom C W Sr. Importance of the Fresnel correction in scattering from a rough surface-I: Phase and amplitude fluctuations[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1970, 47: 295-303.
- [13] Leon-Garcia A, Probability and Random Processes for Electrical Engineering[M]. Addison-Wesley, 1990.