

基于MIMO技术的无线胶囊内窥镜接收系统

胡渝¹ 朱红梅¹ 李抱朴¹ 胡超^{1,2}

¹ (中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

² (浙江大学宁波理工学院信息学院 宁波 315100)

摘要 本文旨在为胶囊内窥镜系统提出一种提高图像传输速率并降低误码率的方法——MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技术来提高传输可靠性。为了不增加发射端的体积和功耗,我们使用单个发送天线,而在接收端采用多个接收天线即SIMO (Single Input Multiple Output) 系统,同时我们仿真了各种分集接收技术的性能,选出一种最优的接收合并方式。

关键词 MIMO; 分集接收; 误码率; 信道容量; 胶囊内窥镜

A Receiving System for Capsule Endoscopy Based on MIMO

HU Yu¹ ZHU Hong-mei¹ LI Bao-pu¹ HU Chao^{1,2}

¹ (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

² (Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract To solve the poor quality image transmission, this paper proposes a method to improve the transfer rate and reduce error rate of the image by using-MIMO (Multiple Input Multiple Output) technology for capsule endoscopy. In order not to increase the size and power consumption of the transmitting end, we use a single transmission antenna, while at the receiving end, we use multiple receiving antennas, that's SIMO (Single Input Multiple Output). In the experiments, we simulated the performance of receive diversity techniques, and selected an optimal method of diversity combination.

Keywords MIMO; receive diversity; bit error ratio; channel capacity; capsule endoscopy

1 引言

胶囊内窥镜^[1,2]从2002年在我国少许医院进入临床应用以来,它就体现了在胃肠道疾病诊断领域的巨大价值,给医生就诊带来了便利,提高了诊断的准确性,同时无线胶囊内窥镜还极大地缓解了患者诊断过程中的痛苦,展现了很大的发展潜力与巨大的发展价值。当前,胶囊内窥镜的研究热点主要集中在如何提高胶囊内窥镜采集到的图像质量,进行胶囊内窥镜的精确定位和运动控制以及基于内窥镜图像的计算机自动诊断技术等方面。由于受到功耗、无线传输速率、图像传感器、成本等因素的约束,图像质量受到很大的限制,但由于图像质量对自动诊断的准确性至关

重要,所以研究新型高清图像的胶囊内窥镜十分有意义。

目前胶囊内窥镜采集到的图像的分辨率一般为 256×256 像素,帧率2 fps。由于图像分辨率低,以及拍摄角度、光线和镜头畸变等问题,图像质量不高,胶囊内窥镜拍摄到的图像对医生诊断的参考价值有限。为了提高图像质量,研究人员提出了设计针对胶囊内窥镜的专用CMOS图像传感器,如香港科大Ho Yeung Chan, Jie Yuan等人设计的低畸变、宽动态范围的胶囊内窥镜专用CMOS图像传感器。为了在不大增加功耗的前提下提高图像分辨率,清华大学谢翔^[3]等人采用基于无损压缩的视频采集和传输方案,从而加大图像像素,减少无线传输数据的数据量。为了解决图像拍摄角度问题, Giving Image公司开

作者简介: 胡渝, 硕士研究生, 研究方向为无线通信及嵌入式系统; 朱红梅, 博士研究生, 研究方向为无线视频传输; 李抱朴, 副研究员, 博导, 研究方向为生物医学工程、图像处理和模式识别; 胡超, 博导, 三江学者特聘教授, 研究方向为自动化、机器人控制和传感器技术。

发了多镜头的胶囊内窥镜 (如 PillCam ESO)^[4], RF SYSTEM Lab 设计了图像传感器位于胶囊侧壁的胶囊内窥镜系统 Sayaka。这几种方案的胶囊内窥镜在一定程度上弥补了目前胶囊内窥镜图像质量不高的缺陷, 但由此带来的体积上的增大和功耗的增加也为胶囊内窥镜的广泛应用带来了障碍。

为保证胃肠道诊断的准确性, 必须改善接收图像的性能, 一方面我们对拍摄图像的质量提出了很高的要求, 比如高清、超高清, 那么必然会造成大量的数据传输, 这就要求具有很高的数据传输速率; 另一方面必须保证图像传输的可靠性高, 即误码率低。一般通信系统中效率与可靠性往往是相互矛盾、相互制约的。为解决这一矛盾, 我们采用的是 MIMO 技术以增加信道容量, 该技术在增加带宽和发送功率的情况下, 频谱利用率成倍提高。

2 MIMO 技术

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 系统, 该技术最早是由 Marconi 于 1908 年提出的, 它利用多天线来抑制信道衰落。根据收发两端天线数量, 相对于普通的 SISO (Single-Input Single-Output) 系统, MIMO 还可以包括 SIMO^[5] (Single-Input Multiple-Output) 系统和 MISO (Multiple-Input Single-Output) 系统。我们对不同收发天线数量时的信道容量行 MATLAB 仿真, 可以看出, 信道容量随着天线数量的增大而线性增大。也就是说可以利用 MIMO 信道成倍地提高无线信道容量^[6], 在不增加带宽和天线发送功率的情况下, 频谱利用率可以成倍地提高。利用 MIMO 技术可以提高信道的容量, 同时也可以提高信道的可靠性, 降低误码率。前者是利用 MIMO 信道^[7]提供的空间复用增益, 后者是利用 MIMO 信道提供的空间分集增益。

2.1 MIMO 模型及信道容量

MIMO 系统原理框图如图 1 所示:

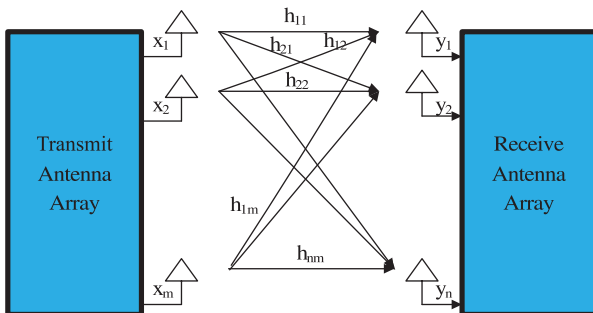


图1 MIMO 系统原理框图

如图所示的 MIMO 系统, 由 m 根发射天线和 n 根接收天线组成, 用列矩阵 \mathbf{X} 表示每个周期内的发射信号, 其中 x_i 表示第 i 根天线的发射信号, \mathbf{X} 的元素是零均值独立同分布的高斯变量; 用 $n \times m$ 的复矩阵 \mathbf{H} 来描述信道, h_{ij} 表示矩阵 \mathbf{H} 的元素, 代表从第 j 根发射天线到第 i 根接收天线时的信道衰落系数; 用 $n \times 1$ 的列矩阵 \mathbf{n} 来描述接收噪声, 它的元素是零均值独立同分布的高斯变量, 具有独立、方差相等的实部和虚部, 方差为 δ^2 。用 $n \times 1$ 列矩阵 \mathbf{Y} 来表示接收信号, 其中每一个复元素代表一个接收天线。使用线性模型可将接收矢量表示为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

即:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2)$$

信道容量定义为在保证误码率任意小的条件下的最大发射速率。一般情况下我们知道信道矩阵的接收端而发射端未知。有矩阵的奇异分解理论, 任何一个 $n \times m$ 矩阵 \mathbf{H} 都可以写成:

$$\mathbf{H} = \mathbf{S}\mathbf{D}\mathbf{V}^H \quad (3)$$

其中 \mathbf{S} 、 \mathbf{V} 分别为 $n \times n$ 和 $m \times m$ 的酉矩阵, \mathbf{D} 为 $n \times m$ 的非负对角矩阵, 设 d_k^2 是 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值, 则 \mathbf{D} 的对角元素是矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值的非负平方根, 则式 (2) 可以写成:

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}\mathbf{D}\mathbf{V}^H\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4)$$

将 (4) 引入以下变换:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{U}^H\mathbf{y} \quad \mathbf{x}' = \mathbf{V}^H\mathbf{x} \quad \mathbf{n}' = \mathbf{U}^H\mathbf{n}$$

则变为:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{D}\mathbf{x}' + \mathbf{n}' \quad (5)$$

若矩阵 \mathbf{H} 的秩为 K , 若天线之间的距离足够, 各个子信道相互独立, 则矩阵 \mathbf{H} 是满秩的, 即 $K = \min(m, n)$, 由此可将 MIMO 信道等效为 K 个去耦平行子信道组成, 则,

$$y'_k = d_k x'_k + n'_k \quad (6)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, K$ 。

由于矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的非零特征值的数目为矩阵 \mathbf{H} 的秩 K , 记矩阵 \mathbf{H} 的特征值为 d_k , 矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值为 $d_k^2 (k = 1, 2, \dots, K)$, 则高斯信道模型下接收信号表示为:

$$\begin{cases} y_i = d_i x_i + n_i, i = 1, 2, \dots, K \\ y_i = n_i, i = K + 1, K + 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

接收信号分量 $y_i (i = K + 1, K + 2, \dots, n)$ 并不依赖于发送

信号，只有特征值非零的K个信号分量与发送信号有关。

可以看出，信道幅度增益等于矩阵H中每个子信道对应的奇异值 d_k ，因此信道功率增益等于矩阵HH^H的特征值 d_k^2 。由于现在的MIMO信道模型中，子信道是去耦的，所以其容量公式可以直接相加，运用香农容量公式：

$$C=W\log_2(1+\zeta) \quad (8)$$

其中 $\zeta=\frac{E}{\sigma^2}$ 为信噪比（SNR），W为信道带宽。

可以估算出总的信道容量为：

$$C=W\sum_{k=1}^K\log_2\left(1+\frac{d_k^2}{m}\zeta\right) \quad (9)$$

由于不知道发射端信道矩阵H，故不能将H进行奇异分解，为了能进行奇异分解，我们对信道进行均衡化，根据对数加法运算法则：

$$\begin{aligned} C &= W\sum_{k=1}^K\log_2\left(1+\frac{d_k^2 E_k}{2m\sigma^2}\right) \\ &= W\log_2\prod_{k=1}^K\left(1+\frac{d_k^2 E_k}{2m\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

再根据 $\det(M)=\prod\lambda(M)$ 和 $\det(1+M)=\prod(1+\lambda(M))$ 可将(10)化为：

$$C=W\log_2\det\left(\mathbf{I}_x+\frac{\zeta}{m}\mathbf{Q}\right) \quad (11)$$

其中 $\mathbf{Q}=\begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^H, & m > n \\ \mathbf{H}^H\mathbf{H}, & m \leq n \end{cases}$ ， \mathbf{I}_x 为x阶单位矩阵， $x=\min(m,n)$ 。

由式(11)可知：MIMO系统的信道容量是由H的奇异值（在均衡状态下是它的特征值）决定的，它们可以决定并行独立信道的信道增益。下面具体分析单输入单输出（SISO）、单输入多输出（SIMO）和多输入单输出（MISO）三种情况下的信道容量及对比。

2.2 SISO

根据公式(11)由于发射天线 $m=1$ ，接收天线 $n=1$ ，设信道系数归一化，则 $\mathbf{Q}=1$ ，故有：

$$C=W\log_2\det(1+\zeta\mathbf{Q})=W\log_2(1+\zeta) \quad (12)$$

事实上，无线信道是时变的，H是一个信道系数的瞬时值，则C是一个随机变量。

2.3 MISO

对于多输入单输出信道，发射端配有m根天线，接收端只有一根天线，即 $n=1$ ，信道矩阵H也随之变成一个矢量 $\mathbf{H}=[h(1,1), h(1,2), \dots, h(1,m)]$ ，其中 $h(1,i)$ 表示从发射端的第i根天线到达接收端信道的信道系数。如果信道系数归一化，即 $|h(i,j)|=1$ ，且发射端功率不受限，则该信道的信道容量可以表示为：

$$C=W\log_2\det(1+\zeta\mathbf{Q})=W\log_2(1+m\zeta) \quad (13)$$

其中 $\mathbf{Q}=m$ 。

增加发射天线的数目，势必会增加发射端功耗，但在某些功率受限的情况下，假定信道系数固定，则：

$$C=W\log_2\det\left(1+\frac{\zeta}{m}\mathbf{Q}\right)=W\log_2(1+\zeta) \quad (14)$$

说明信道容量不会随着天线数目的增加而增大。

2.4 SIMO

对于单输入多输出信道，发射端只有一根天线，接收端配有n，其信道可以看成是一个n维列矢量： $\mathbf{H}=[h(1,1), h(2,1), \dots, h(n,1)]^T$ ，其中 $h(j,1)$ 是发射端的天线到接收端的第j根天线的信道系数。如果信道系数是固定的，则该信道的信道容量可以表示为：

$$C=W\log_2\det(1+\zeta\mathbf{Q})=W\log_2(1+n\zeta) \quad (15)$$

其中 $\mathbf{Q}=n$ 。

由于信道系数被归一化，从信道容量的计算公式可以看出，SIMO信道与SISO信道相比获得了大小为n的阵列增益。

3 空间分集接收技术

分集技术是另外一种用来补偿信道衰落的技术，它通常要使用两个或者多个的接收天线来实现。同均衡技术一样，分集技术改善了无线通信链路的质量，而且不用改变通用空中接口或者增加发射功率或者带宽。分集技术通常用来减少接收时由于移动造成的衰落的深度和持续时间。分集技术通常用在基站和移动接收机。最常用的分集技术是空间分集，即多个天线按照一定的策略被分割开来，并被连到一个公共的接收系统。其他的分集技术还有天线的极化分集、频率分集、时间分集。CDMA系统利用RAKE接收机^[8]，通过时间分集来提高链路性能。分集技术是通信中的一种用相对低廉的投资就可以大幅度改进无线链路性能接收技术，因而得到广泛应用。而分集技术中，由于空间分集是在不牺牲信号频率带宽和保证数据传输速率的同时获得分集增益，所以应用很广。

空间分集接收^[9,10]分为选择性分集接收、等增益分集接收和最大比率合并接收^[11]。空间分集的多输入多输出（Multi-Input Multi-Output, MIMO）技术就是一种改善信道性能的方案之一，有效地提高了系统的容量和频谱利用率。常见的分集接收框图如图2所示：

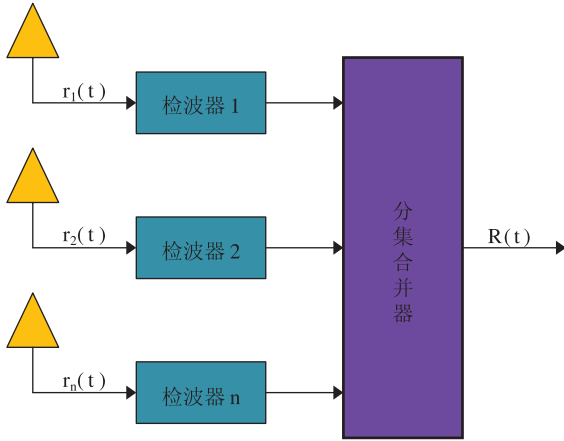


图2 分集接收框图

其中分集合并器可以是最大比合并、等增益合并、选择性合并之一或者他们的组合。下面分别接收三种合并方式。

3.1 最大比合并 (Maximum Ratio Combining, MRC)

在接收端 N 个统计不相关的分集支路经过相位校正, 并按适当的可变增益加权值 G_i , 使得组合信号的 $r(t)$ 信噪比最高, 再相加后送入检测器进行相干检测, 就得到最大比合并方式 MRC。

利用许瓦兹不等式, 可以证明当可变增益加权系数 $G_i = \frac{A_i}{\rho^2}$ 时, 分集合并后的信噪比达到最大值。其中, A_i 表示第 i 个分集支路的信号幅度; $\rho_i^2 = \rho^2$, 表示每个分集支路噪声功率相等, 经最大比值合并后的输出为:

$$A = \sum_{i=1}^N G_i A_i = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\rho^2} \times A_i = \frac{1}{\rho^2} \sum_{i=1}^N A_i^2 \quad (16)$$

可见, 信噪比越大的分集支路对合并后的信号贡献也就越大。

设最大比值合并后的平均输出信噪比为:

$$\overline{SNR}_M = N \cdot \overline{SNR} \quad (17)$$

公式中, \overline{SNR} 为合并前每个支路平均信噪比; \overline{SNR}_M 为合并后平均输出信噪比; 而 N 为分集支路数目, 即分集重数。

则合并增益为:

$$K_M \triangleq N \quad (18)$$

由此我们可以看出, 在接收端最大比合并下, 合并增益正比于接收天线数目。

3.2 等增益合并 (Equal Gain Combining, EGC)

若在上述最大比合并中, 取 $G_i = 1$, 当 $i = 1, 2, \dots, N$, 即为等增益合并。

等增益合并后的平均输出信噪比为:

$$\overline{SNR}_E = \overline{SNR} \left[1 + (N-1) \frac{\pi}{4} \right] \quad (19)$$

等增益合并后的增益为:

$$K_E = \frac{\overline{SNR}_E}{\overline{SNR}} = 1 + (N-1) \frac{\pi}{4} \quad (20)$$

显然, 等增益合并方式的合并增益同样正比于分集重数, 但效果不如最大比合并。当 N (分集重数) 较大时, $K_E \triangleq K_M$, 即两者差不多, 大约在 1 dB 上下。但由于等增益合并算法是经过相位校正后取各路信号相加, 算法复杂度小, 硬件实现比 MRC 要简单, 所以实际系统中当 N 较大时多用等增益合并方式。

3.3 选择合并 (Selection Combining, SC)

在接收端是从 $i = 1, 2, \dots, N$ 的 N 个分集支路的接收机 R_i 中利用选择逻辑电路选择其中具有最大基带信噪比 $\overline{SNR}_s = \overline{SNR}_{\max} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i}$ 的某一路的基带信号作为输出, 这种方式称为选择式合并。

选择合并的平均输出信噪比为:

$$\overline{SNR}_s = \overline{SNR}_{\max} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i} \quad (21)$$

选择合并后的增益为:

$$K_s = \frac{\overline{SNR}_s}{\overline{SNR}_{\max}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{i} = 1 + \frac{(N-1)(N+2)}{2N!} \quad (22)$$

选择合并的增益相比其他两种合并方式的效果最差, 但其硬件电路实现比较简单, 当 $N=2$ 时, 其增益为 1.5, 与单接收天线相比性能改善显著。

4 误码率 (BER: bit error ratio)

误码率是衡量数据在规定时间内数据传输精确性的指标。定义为:

$$EBR = \frac{\text{error}}{\text{sum}} * 100\% \quad (23)$$

其中 error 为误码数量, sum 为传输的总码数。

如果有误码就有误码率。另外, 也有将误码率定义为用来衡量误码出现的频率。在相同的传输速率下, 信道容量越大, 误码率就越小。

5 仿真结果与讨论

由式 (11), 我们仿真了不同发送接收天线组合情况下的信道容量, 相关实验结果将在此节进行详细

阐述。

在图3中,每个天线发射功率是相等的,由蓝色、黑色、红色、青色四条曲线可以得出:在同一信噪比下随着天线总数目的增加信道容量逐渐增加,随着信噪比的增强信道容量逐渐增加。经仔细观察发现图中黑色曲线与绿色曲线即“nt=2, nr=1”与

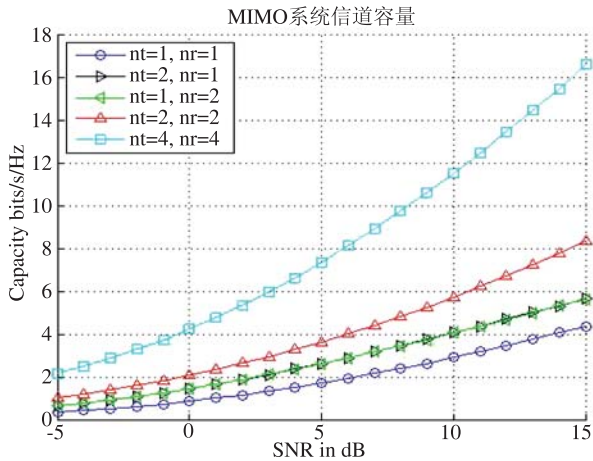


图3 每个发射天线功率相等时MIMO的信道容量

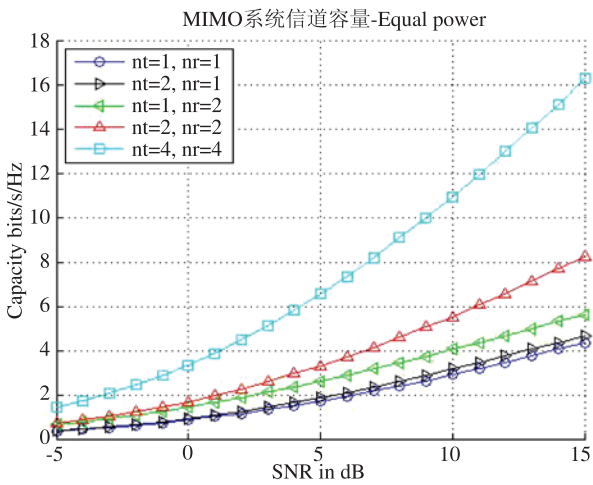


图4 总功率相等时MIMO的信道容量

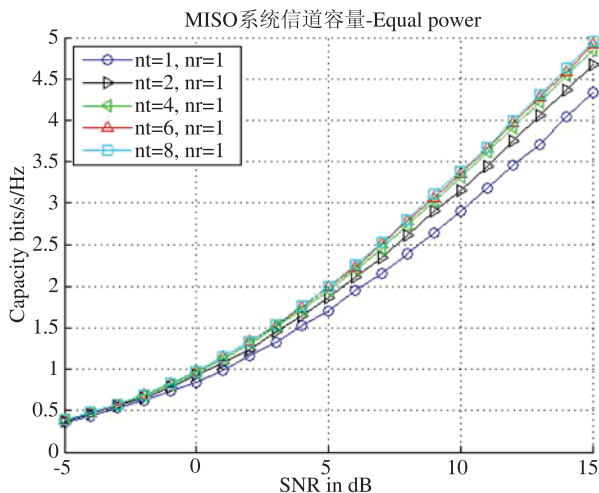


图5 总功率相等时MISO的信道容量

“nt=1, nr=2”相重合,是因为“nt=2, nr=1”的信道矩阵 H^T 是“nt=1, nr=2”的信道矩阵 H 的转置,由于 $|H^*H^T|=|H^T*H|$,即 $m=n$,由式(13)(15)可知,这两种情况的信道容量是一样的。

在图4中,发射模块的总功率是一定的,蓝色曲线与黑色曲线即“nt=1, nr=1”与“nt=2, nr=1”相差甚小,几乎接近,可以看出,此时增加发射天线,信道容量改善效果不是很好,出现这个原因是因为我们虽然增加了发射天线,但并没有增加发射功率,各个天线只是分摊了发射功率,公式(14)有力地证明了这一点。为更好地说明这一点,我们又仿真了一组MISO系统的数据,发送天线从1增加到2,4,6,8,但信道容量变化并不大,如图5所示。

在图3和图4中,由蓝色曲线与绿色曲线对比,还可以看出随着接收天线数量的增加,信道容量逐渐增大。为了更好地证明这一点,我们又仿真了SIMO系统的信道容量,如图6所示,当接收天线从1个增加到2个时,信道容量增加很明显,这是一个质变;从2个增加到4个时,再到6个,最后增加到8个,我们可以看出,信道容量都有增加,但增加的幅度有所减少,这只是一个量变的过程。

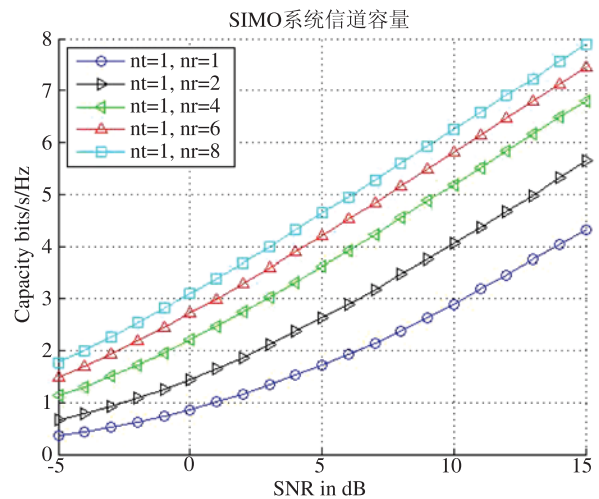


图6 总功率相等时SIMO的信道容量

为了进一步说明信道容量分别于接收天线和发射天线数目之间的关系,我们仿真了在以下五种信噪比情况下,接收/发射天线为1时,当发射/接收天线数量从1增加到20时的信道容量,如图7图8所示。

从图7可以看出,在功率一定的情况下且接收天线固定时,信道容量与发送天线数目之间的曲线趋于平坦,尤其是发送天线数目很大时,信道容量几乎没有得到改善。可以看出在低信噪比时使用发送分集达不到预期的效果。

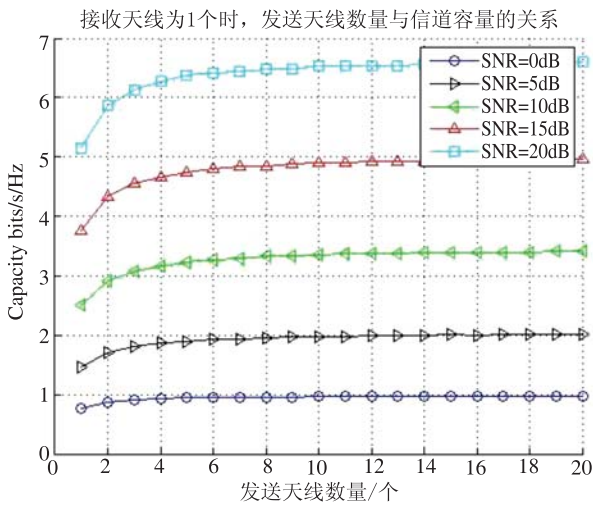


图7 信道容量与发送天线的关系

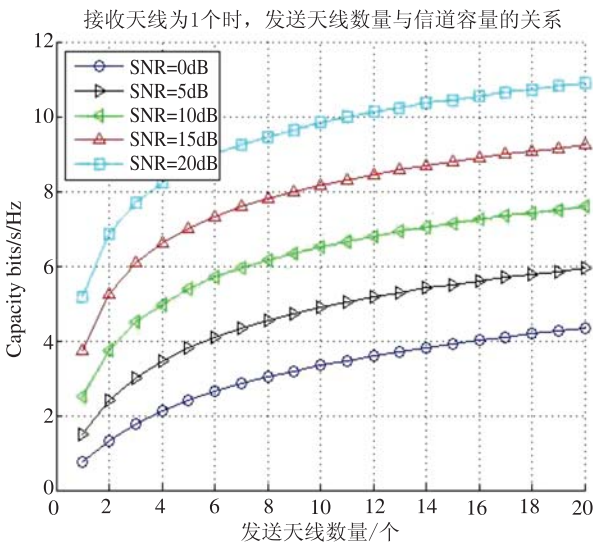


图8 信道容量与接收天线的关系

从图8可以看出, 当发送天线固定时增加接收天线的数量能够增加信道容量, 且信道容量与接收天线数量的对数成正比。这些仿真结果都将为选择收发天线组合方式奠定基础。我们综合考虑胶囊端的功耗、体积、性能等因素, 加上上述仿真结果, 说明不适合用多个天线发送, 接收端对这些因素不是很敏感, 所以我们可以采用多个天线接收来提高信道容量。

既然选择了分集接收, 那么不同的接收合并方式必然会给结果带来不一样的影响, 下面我们来看看接收合并方式与误码率之间的关系。

在图9~图11中, 黑色曲线表示单天线接收下的误码率与信噪比的关系, 红色曲线表示选择合并 (SC), 蓝色曲线表示等增益合并 (EGC), 洋红色表示最大比合并 (MRC), 可以看出, 当性噪比相同时, 最大比合并的误码率比等增益合并的误码率低,

等增益合并的误码率比选择合并的误码率低, 选择合并的误码率比单天线接收的误码率低; 随着天线数目的增加误码率降低越大; 从图9可以看出, 当接收天线为两个时, 虽然MRC优于EGC, EGC优于SC, 但

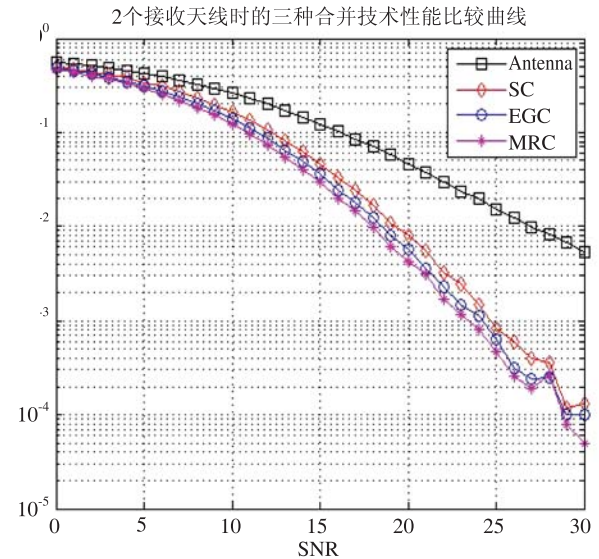


图9 两个接收天线时的合并性能对比

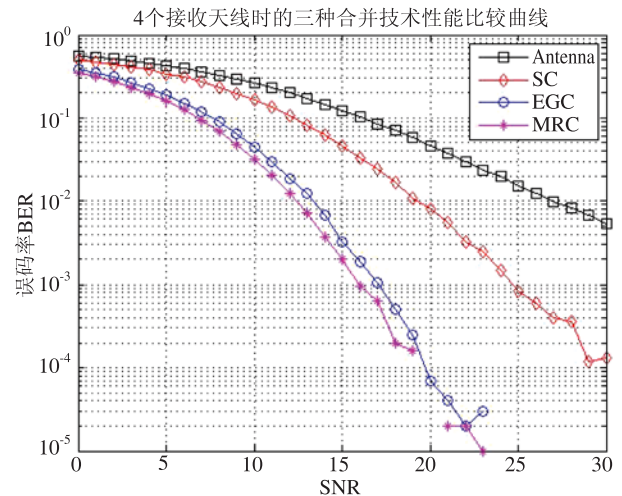


图10 四个接收天线时的合并性能对比

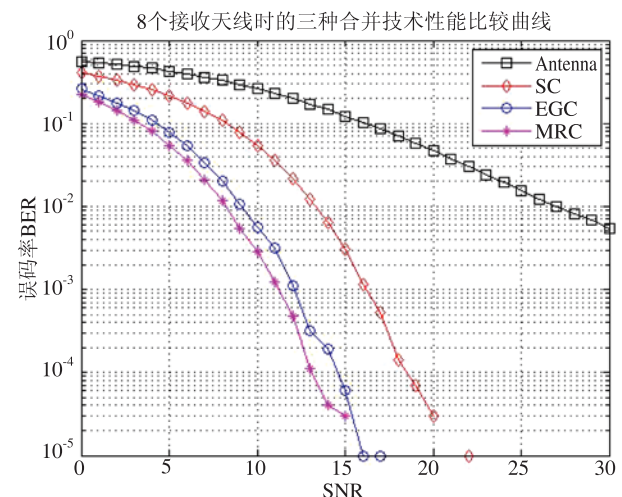


图11 八个接收天线时的合并性能对比

区别不是很明显,而且SC与单接收天线相比,误码率降低很显著。

6 结论

综合以上实验结果,我们可以看出MIMO技术很好地提高了信道容量,降低了误码率。由于胶囊内窥镜受体积与功耗因素限制,我们仍采用单个天线发送图像数据,而在接收端,以上实验结果告诉我们天线数量越多,信道容量就越大,误码率也就越小,但由于成本、体积、算法复杂度等因素,天线数量不宜过多。在分集接收的算法复杂度方面,经过相位校正后,SC是简单的判断选择,EGC是加法运算,MRC是乘加运算,故SC优于EGC,EGC优于MRC,在两个接收天线情况下,三种合并方式性能差别不大,故我们采取SC为宜;在多个天线的情况下,SC性能相比其他两种合并方式相差很多,EGC与MRC差别甚小,但EGC算法复杂度比MRC小,所以通常情况下,我们选择EGC为宜。综合考虑成本、体积、复杂度、性能等因素,最后我们折中选取了一个发射天线二个接收天线的组合方式来改善整个接收系统的性能。信道容量是在误码率可接受的条件下能传送数据的最大速率,我们使用两个接收天线提高了数据速率,同时在选择合并接收方式下,其误码率下降明显,接收效果得到了很大地改善。由此可见,将多天线技术运用

到胶囊内窥镜接收系统中,是一个一举多得措施。

参考文献

- [1] Iddan G, Meron G, Glukhovskiy A, et al. Wireless capsule endoscopy [J]. Nature, 2000, 405: 417-417.
- [2] 张伟, 谢德明. 胶囊内镜的技术进展及临床应 [J]. 生物医学工程与临床, 2012, 16(5): 499-503.
- [3] Xie X, Li G L, Li D M, et al. A new near-lossless image compression algorithm suitable for hardware design in wireless endoscopy system [J]. 2005 International Conference on Image Processing, 2005, 1-5: 313-316.
- [4] Wireless Capsule Endoscopy. Given-imaging inc. [EB/OL]. <http://www.givenimaging.com>.
- [5] 金凤, 李文元, 张玉林, 等. SIMO系统分集合并技术的性能分析 [J]. 现代电子技术, 2007, 30(5): 32-34.
- [6] 刘皎. MIMO系统中基于容量的接收天线选择算法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [7] 张丽果, 陈建安. 多输入多输出 (MIMO) 系信道容量技术 [J]. 无线通信技术, 2005: 36-38.
- [8] 齐丽娜, 干宗良, 朱洪波. 基于天线分集的一种超带宽Rake接收机 [J]. 通信学报, 2005, 26: 49-54.
- [9] 陈杨, 刘瑞华, 刘广. 空间接收分集合并技术的性能分析 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46: 73-76.
- [10] 卢辉斌, 陈鑫. 混合分集合并方式的性能分析 [J]. 电子测量技术, 2009, 34: 35-37.
- [11] 范哲源. 分集技术接收端三种合并方式的比较及仿真研究 [J]. 科技资讯, 2010, 50-51.