

# 第八讲 水声通信及其研究进展\*

蔡惠智<sup>1 †</sup> 刘云涛<sup>1</sup> 蔡慧<sup>1 2</sup> 邓红超<sup>1 2</sup> 王永丰<sup>1 2</sup>

(1 中国科学院声学研究所 北京 100080)

(2 中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 水声通信是当前唯一可在水下进行远程信息传输的通信形式, 由于其在民用和军事上都有重大意义, 水声通信的研究一直是国内外研究的热点. 文章介绍了水声通信的特点、系统组成、发展历史和国内外的发展现状, 最后简要介绍了文章作者在高速水声通信研究方面的成果和进展.

**关键词** 水声通信, 声纳, 正交频分复用, 声纳信号处理

## Acoustic communication and its recent progress

CAI Hui-Zhi<sup>1 †</sup> LIU Yun-Tao<sup>1</sup> CAI Hui<sup>1 2</sup> DENG Hong-Chao<sup>1 2</sup> WANG Yong-Feng<sup>1 2</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The only way to exchange information under water over a long distance is by acoustic means, so acoustic communication is becoming an active area of research. We shall describe the significance of acoustic communication, its principle and system architecture, and its history and development. Finally, we shall review the progress of high-speed acoustic communication research in our institute.

**Keywords** underwater acoustic communication, sonar, orthogonal frequency division multiplexing, signal processing

## 1 引言

当今世界已进入了飞速发展的信息时代, 通信是这一进程中发展最为迅速、进步最快的行业. 陆地和空中通信领域包括的两个最积极、最活跃和发展最快的分支——Internet 网和移动通信网日臻完善, 而海中通信的发展刚刚崭露头角. 有缆方式的信息传输由于目标活动范围受限制、通信缆道的安装和维护费用高昂以及对其他海洋活动(如正常航运)可能存在影响等缺点, 极大地限制了它在海洋环境中的应用. 另外由于在浑浊、含盐的海水中, 光波、电磁波的传播衰减都非常大, 即使是衰减最小的蓝绿光的衰减也达到了 40dB/km, 因而它们在海水中的传播距离十分有限, 远不能满足人类海洋活动的需要. 在非常低的频率(200Hz 以下), 声波在海洋中却能传播几百公里, 即使 20kHz 的声波在水中的衰减

也只有 2—3dB/km, 因此水下通信一般都使用声波来进行通信. 而在这个频率范围内, 声波在水中(包括海水)的衰减与频率的平方成正比, 声波的这个特性导致了水下声信道是带宽受限的. 采用声波作为信息传送的载体是目前海中实现中、远距离无线通信的唯一手段<sup>[1]</sup>.

水声通信最初是主要应用于军事领域, 最近十年, 随着人类对海洋资源的不断开发和利用, 如近年来环境系统的污染监测、海上石油工业的遥控以及不回收仪器设备而直接获取海底工作站记录的科学数据等等, 使得水下信息通信技术的商用前景越来越广阔. 相应地, 也促进了水下通信技术的发展. 早在第二次世界大战之后, 水声通信就已出现. 现在水

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-818-09-09)、“十五”国防预研基金(批准号: 10106050302)资助项目  
2006-06-06 收到初稿, 2006-07-17 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: chz@water.ac.cn

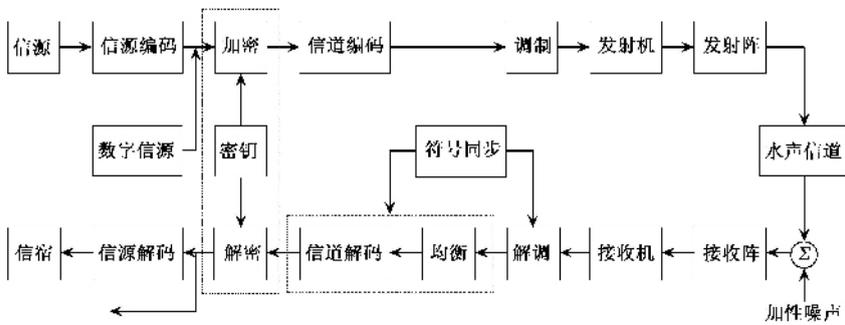


图1 水声通信系统方框图

声通信已广泛应用于潜艇之间的通信、水面舰艇与潜艇的通信、海上遥控和遥测、遥感、水下测量设备记录数据回送、水下图像传输、语音传输和水声局域网( ALAN )等多个方面。其具体的设备包括舰艇用水声通信机、水下通信浮标、水下应急通信设备、潜水员水声电话、水下机器人用的图像声纳和通信声纳等许多种<sup>[2]</sup>。

海洋水下信道是一个极其复杂的时间-空间-频率变化、强多径干扰、有限频带和高噪声的信道，这是至今还存在的难度最大的无线通信信道。研究水声通信必须综合物理海洋学、声学、电子技术和信号处理等多种学科和技术知识，现在水声通信的研究已经成为各国科学和工程技术人员研究的热点之一。另外，海洋声学技术尤其是水声通信技术是国际发达国家对我国实行封锁的领域，因此研制具有自主知识产权的水声通信技术意义深远。

## 2 水声通信特点和性能评价

水声通信是利用声波在海水里传播实现的。水声通信系统的工作原理是首先将文字、语音、图像等信息转换成电信号，并由编码器将信息数字化处理后，换能器又将电信号转换为声信号。声信号通过水这一介质，将信息传递到接收换能器，这时声信号又转换为电信号，解码器将数字信息破译后，电接收机才将信息变成声音、文字及图片。声音是由于震动而产生的。在海里面，我们要把我们讲话的信息传到远处也一样，仅仅是把空气换成是海水，这一传输就要另外一个嘴巴和耳朵，即水声换能器，通过它，声能和电能相互转换，在空气中、水中、固体中任意发射和接收不同频率、不同强度的声信号。图1给出了一个完整的水声通信系统的方框图。

水声信道是一个典型的时变多途衰落信道，由

该信道传输后的接收信号，可视为经由不同路径到达的、具有不同时延和幅度的多个分量的叠加。图2所示是一个简单的浅海信道上的声传播模型。

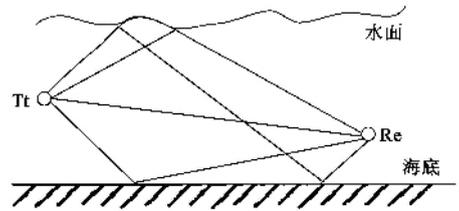


图2 浅海声道上声传播模型

在图2中， $T_t$ 为发射换能器， $R_e$ 为接收换能器。 $T_t$ 和 $R_e$ 之间的声传播主要由界面反射和直达路径组成。从图2可以看出，到达接收端换能器的各条路径的信号有着不同的路径长度，因而到达接收机的时间各不相同，同时各条路径的信号幅度也是随机变化的。所以信号在时域上被展宽，幅度呈频率选择性衰落，这称为多途干扰。多途干扰是由于声波在水声信道传播过程中遇到各种非期望反射体，如上、下表面、水中物体、非均匀水团等，引起反射和散射，这些反射或折射信号同直达信号在接收端相互干涉造成干扰，形成多途。水声信道中，在收、发两端始终存在着一条以上的传播路径，因此多途在任何时候都可发生，在长距离通信中，多途更是一个常见现象。更由于水声场的时间-空间-频率变化特性，使得多途现象尤为突出。因此如何克服多途干扰、时域和多普勒扩展、时变衰落，是水声通信中需要重点解决的问题。

水声通信的质量，通常用误码率和数据率这两个指标来衡量。无论是海上作业或作战，都要求通信最好是实时的，而图像传输的数据量又很大，所以要求通信必须采用高数据率；另外，图像通信时，误码率若超过1%，画面就会出现明显的“斑点”，而指令

表 1 近十几年的非相干系统试验情况

研究者	数据率/ bps	编码方案	带宽/ Hz	带宽利用率	距离	错误率
Morgera	0.5	格雷码	50	0.01	N/A	N/A
Garrod	40		N/A	N/A	4.0(S)	$<10^{-2}$
Catipovic	1200	汉明码	5000	0.24	3.0(S)	$10^{-2}$
Jarvis	$<2.3$	重复发	6000	$<4.0 \times 10^{-4}$	2.0(D)	N/A
Coates	75		1500	0.05	5.0(D)	$10^{-3}$
Hill	360		5500	0.07	6.0(D)	N/A
Freitag	2500	卷积码	20000	0.13	3.7(D)	$10^{-4}$
Freitag	600		5000	0.12	2.9(D)	$10^{-3}$
Mackelburg	1250		10000	0.13	2.0(D)	N/A
Scussel	2400	Hadamard 码	5120	0.47	10.0	N/A

通信对误码率的要求则更高,在现如今高科技的快速作战中,一个误码很可能导致一个指令的接收错误,从而贻误整个战机。要求高数据率和低误码率,这本身就是一对矛盾,我们通常所说的保证水声通信的质量,就是在保持高数据率的前提下,尽量降低传输的误码率。水下通信系统通常是在满足误码率要求条件下,用作用距离与通信速率的乘积来衡量该系统的性能,就是说,一般情况下,这个乘积值越大,说明系统的通信性能越强。水声通信的国内外学者的研究目的就是使水声通信系统误码率更低,使这个乘积值达到最大。例如,1999年国际上发表的各种水声通信机的指标一般以传输速率 $\times$ 作用距离 = 40kbps $\cdot$ km 为上限(见图3)。

硬件水平、信号处理芯片计算能力的不断提高,水声通信的调制方式、信号处理算法等都在逐渐使用各种新的、复杂的技术,比如空间调制技术、自适应均衡技术、盲均衡技术、分集接收技术等<sup>[3-6]</sup>。

下面从非相干通信和相干通信两个方面来介绍一下水声通信的发展过程,简单地说,相干通信是指接收机或已知或估计出发射机的载频频率和相位信息来进行解调处理,而非相干通信接收机一般不需要知道发射机载频的相位信息,所以相干通信的结构和算法通常要比非相干通信复杂。

### 3.1 非相干系统

根据水下信道传播的特性,信号的频率成分大部分仍然包含在其原始信号的带宽中,而信号的幅度和相位由于混响的作用就会在空间和时间域上变化的很大,因此多频移键控调制(MFSK)便自然地成了非相干调制方案选择。MFSK系统使用不同的音频脉冲来表示数字信息。在接收端判断是哪个音频被发送,是基于窄带滤波器的输出端的能量检测原理。这些滤波器可以是模拟滤波器,也可以是数字滤波器形式。世界上第一个水声通信系统是美国海军水声实验室于1945年研制的水下电话,主要用于潜艇之间的通信。该系统使用单边带调制技术,载波频段为8—11kHz,工作距离可达几公里。在其后的一段时间里,出现了很多使用模拟单边带或幅度调制的水声通信系统。这些模拟系统的功率利用率不高,为了在几公里的距离上进行通信,通常要用上百瓦的发射功率<sup>[7]</sup>。

最近十年,随着硬件处理器的速度越来越快,功能越来越强,非相干接收技术也逐渐发展起来。1991年,Woods Hole Oceanographic Institution(WHOI)在美国马萨诸塞州东南的钩状半岛科德海角进行了一次试验,使用MFSK调制方式,获得的指标为200bit/s,传输距离为5.4海里(1海里=1852m),采

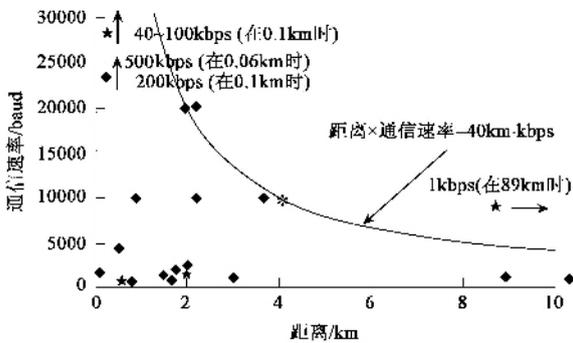


图3 1999年国际上水声通信系统能够达到的指标(传输速率 $\times$ 作用距离)及上限,上限由曲线表示,曲线上的\*号是我国当时达到的指标(纵坐标中baud是通信速率的单位,其中文译名为波特)

## 3 水声通信的发展过程

水声通信技术诞生于上世纪中叶,和其他信号处理技术的发展趋势相同,也经历了从最初的模拟通信阶段到现如今的数字通信阶段的过程。总的来说,水声通信,特别是高速水声通信,近十几年的发展趋势是由非相干通信向相干通信发展,并且随着

用了 60MHz 的 TMS30c44 处理器. 后来 ADATS( adjustable diversity acoustic telemetry system )达到了数据率为 1250bits/s 时, 传输 2 海里的指标, 信号带宽为 10kHz. 表 1 列出了近十几年国外的一些主要的非相干系统的试验情况.

表中 N/A 表示在发表的文献中没有提到该数据; “S”表示浅海的结果; “D”表示深海的结果, 一个垂直方向的信道. 带宽有效率为数据率与带宽之比, 强调这些系统的一个低有效带宽利用率的特点.

目前能够比较成功地提供非相干通信方式的水声通信设备的有 Aquatec Electronics Limited、Benthos、LinkQuest Inc. 等公司, 其主要产品见图 4.

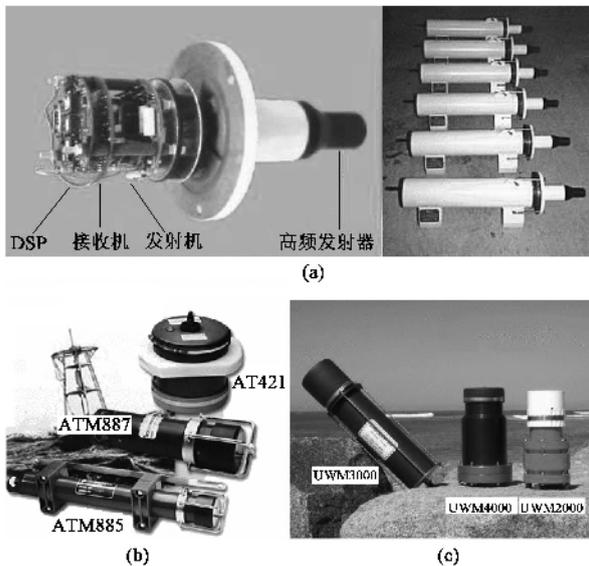


图 4 ( a ) Aquatec Electronics Limited 公司的 AQ203 声学遥测系统 工作频段为 55—65kHz 或 8—12kHz, 调制方式为 MFSK, 差错控制采用 Reed - Solomon 编码 ] ( b ) Benthos 公司的水声通信设备及换能器[ ATM885( 浅水 ), ATM887( 深水 ), 调制方式为 MFSK, 差错控制采用 Hadamard 编码或卷积编码 ]; ( c ) LinkQuest 公司的水声 Modem 设备[ 使用声宽带扩频技术、混合调制方案、抗多径影响的信道均衡技术, 高效的差错控制技术和自动通信速率调整 ]

### 3.2 相干系统

与非相干系统相比, 相位相干水下通信系统在最近的十年当中发展的更快、研究成果更多. 对于水下相位相干通信系统, 提高通信速率和降低误码的主要难点有两个方面: 一是减轻码间干扰( intersymbol interference, ISI)的影响; 二是水下多径传播的动态机制. 相干水声通信系统采用的调制方式主要有 PSK( 相移键控 ), DPSK( 差分相移键控 ), QAM( 正

交幅度调制 )等. 为了克服水下信道多径引起的码间干扰( ISI ), 接收机一般要进行 ISI 补偿处理, 主要处理方法有线性均衡( LE ), 判决反馈均衡( DFE ), 直接序列扩频( DS - SS )等. 表 2 列出了近年来研制的一些相干水声通信系统.

随着水声通信的发展, 对水下高速通信( 一般指速率大于 2kbit/s )的需求越来越大, 使得水下相干通信采用了一些移动通信中的许多先进和复杂的技术, 如正交频分复用( orthogonal frequency division multiplexing, OFDM )技术、多天线( multiple input multiple Output, MIMO )技术等. 其中 OFDM 技术是最近三年来国内外学者研究的热点, 并取得了一定的试验结果, 其核心思想是将整个可用频段分割成多个正交子信道, 将待传输的高速串行码流并行地调制在这些子信道载波上, 再加上循环前缀以后, 使其具有抗多径、频谱利用率高的特点. MIMO 技术是水声通信中刚刚兴起的技术, MIMO 也是第四代移动通信( 4G )的核心技术, 由于其具有提高信道容量、抗衰落、降低误码率等特点, 使其成为水下通信极有发展潜力的一项技术, 也可以将其与 OFDM 技术结合使用, 以充分发挥两者的优点.

现在, 水声通信已经发展到建立水声网络的阶段<sup>[8—11]</sup>. 当前水声通信的目标是建立水下自治采样网络( AOSN ). 这种网络能够提供多个网络节点间交换数据的功能, 与此同时, 也已经提出了能够传输包括图像、数据、控制命令、语言等多种信息的水声局域网络协议.

## 4 我们的工作

中国科学院声学研究所水声技术部在国家高技术研究发展计划和“十五”国防预研基金支持下, 在关于水下高速通信的项目中, 对水下通信系统, 特别是多进制 PSK 调制解调系统和水下 OFDM 通信系统进行了深入的理论和实验研究. 其中在水下信道估计技术、分集接收技术、均衡技术、QPSK 和 M - QAM 调制技术、OFDM 调制解调技术、差错控制编解码技术、抗时变多径技术、Doppler 补偿技术等方面有了大量的技术积累和研究成果, 这些成果在我们进行的十多次的高速水声通信湖试和海试中得到了验证<sup>[12, 13]</sup>. 目前我们海试结果已达到了误码率为零时, 距离与速率乘积为 132kbps · km 的水平, 在国内外的速率大于 2kbps 的高速水声通信公开发表的试验结果中, 还没有见到比这个更好的结果.

表2 近十年来研制的一些相干水声通信系统

研究机构	应用	信道	调制方式	ISI 补偿	载频	数据率
Oki Elec. Ind. Comp.	机器人通信 / 遥控	甚短距 浅海	16-QAM	LE( LMS )	1 MHz	500 kbps
JAMSTEC	图像传输	垂直( 6500m )	4 - DPSK	LE( LMS )	20 kHz	16 kbps
IFREMER/ORCA	图像和数据传输	垂直( 2000m )	2 - DPSK	无	53 kHz	19.2 kbps
ENST - Br. / IFREMER	数字语音传输	试验水池	4 - DPSK	DFE( LMS )	-	6 kbps
Microrlor	遥测	中距( 1km ) 浅海	2 - DPSK	DS - SS	30kHz/100kHz	600 bps
WHOI	遥测	冰下 浅海	QPSK	DFE( RLS )	15 kHz	5 kbps
Northeast 大学	图像传输	长距离 深海 185.2km	MPSK	DFE( RLS )	1kHz	1kbit/s
Northeast 大学	图像传输	长距离 浅海 92.6km	MPSK	DFE( RLS )	1kHz	2kbit/s



图5 接收解调后的 16QAM 星座图和解调后无误码的图像

我们设计的 OFDM 高速水声通信系统于 2005 年 12 月在南中国海进行了海洋水下试验, 试验海区为典型的浅海大陆架结构, 水深小于 100m, 试验海况 3 级, 涌稍大. 试验时发射船抛锚, 接收船以 4 节航速向背离发射船方向航行, 发射声源级 195dB. 试验系统采用了 QAM, MPSK, DPSK 等多种调制方式, 传送多幅图像信息. 下面给出了采用 16QAM 调制的 6.6km 远接收解调后的图像, 误码率为 0, 速率为 20kbit/s, 如图 5 所示.

## 5 展望

21 世纪将是利用和开发海洋资源的重要时期, 而水声通信作为水下唯一的通信手段, 必将成为各国研究的重点, 也必将得到快速的发展, 从而在人类探索海洋、认识海洋到最终征服海洋的过程中发挥重要作用. 和现在的无线电通信网一样, 未来也将在海洋建立水声通信网, 这样既可同时获取大范围的海洋信息, 也可快速、便捷地传递各种信息. 水声通信的应用既包括军事领域, 也包括民用领域, 可以总结为以下几个方面:

(1) 水声通信是水面舰艇、潜艇间相互通信的重要手段. 特别是潜艇处在潜航状态时, 无线电和其它通信方式都将失效, 唯一可能的通信方式就是水

声通信. 而在我国大陆架附近海域和远海域, 组建可靠的、大范围的水声通信网, 对于我国领海防御和未来海军远航作战必将起到重要的保障作用.

(2) 水声反潜网络. 在未来“以网络为中心的反潜战”中, 水声通信和水声数据链传输将发挥重要作用, 这需要在水下分布式监测器、水下无人航行体、潜艇和水面舰艇等之间建立声纳系统信息网络, 传递语音、数据乃至图像等多种信息. 网络通信将大大提高对水下目标的联合检测、定位和攻击的能力.

(3) 水下潜器的命令和数据传送. 这包括对水下机器人的状态控制和水下机器人的状态应答, 对水下机器人的状态控制, 水下采集系统的数据回送或深海目标图像的获取等. 在这些场合下不宜用电缆, 最好的办法是利用水声通信, 需要解决的关键问题有水下潜器通信系统的低功耗设计、高性能电池的设计及使用、采用低复杂度的通信算法.

(4) 海洋环境监测和灾难预警. 建立一个庞大的全球海洋温度、海流、潮汐数据和资源监测网络, 并能实现数据的可靠实时传输, 将对人类认识海洋、预警灾难性气候、环境保护等方面发挥非常重要的作用.

## 参 考 文 献

[ 1 ] Woodward B, Sari H. IEEE J. Oceanic Eng., 1996 21(2) 181

- [ 2 ] 刘孟庵, 连立民. 水声工程. 杭州 浙江科学技术出版社, 2002  
[ Liu M A, Lian L M. Underwater sound engineering. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2002 ( in Chinese ) ]
- [ 3 ] Catipovic J *et al.* An Acoustic Telemetry System for Deep Sea Ocean Mooring Data Acquisition and Control. In : Proc. OCEANS '89, Seattle, WA, October 1989. 887—892
- [ 4 ] Stojanovic M. IEEE Oceanic Eng, 1996 21( 2 ) :125
- [ 5 ] Proakis J G. IEEE Jour. Oceanic En. , 1991( 16 ) 21
- [ 6 ] Hinton O R *et al.* An adaptive high bit rate subsea communication system. In : European Conference on UWA. 1992, 75—79
- [ 7 ] Proakis J G, Sozer E M, Rice J A. Communications Magazine, IEEE, 2001 39( 11 ) :114
- [ 8 ] Xie G G, Gibson J H. A network layer protocol for UANs to address propagation delay induced performance limitations. In : OCEANS, 2001 MTS/IEEE Conference and Exhibition. 5—8 Nov 2001 4 2087—2094
- [ 9 ] Yeo H K, Sharif B S, Hinton O *et al.* Analysis of a multi-element multi-user receiver for a shallow water acoustic network ( SWAN ) based on recursive successive interference cancellation ( RSIC ) technique. In : OCEANS 99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. 13—16 Sept. 1999. 3 :1537—1541
- [ 10 ] Lapierre G, Chevallier L, Gallaud F *et al.* Design of a communication protocol for underwater acoustic modems and networks. In : OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. 5—8 Nov. 2001. 4 2220—2226
- [ 11 ] Johnson M, Herold D, Catipovic J. The design and performance of a compact underwater acoustic network node. In : OCEANS '94. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation. Proceedings. 13—16 Sept. 1994. 3 : III467—III471
- [ 12 ] 刘云涛, 蔡惠智, 杨莘元. 声学学报, 2006 31( 1 ) :79 [ Liu Y T, Cai H Z, Yang S Y. Acta Acustica, 2006 31( 1 ) :79 ( in Chinese ) ]
- [ 13 ] 刘云涛, 蔡惠智. 声学学报, 2005 30( 5 ) :435 [ Liu Y T, Cai H Z. Acta Acustica, 2005, 30( 5 ) :435 ( in Chinese ) ]

## · 物理新闻和动态 ·

### 隐身外衣的制作

美国杜克大学的 D. Smith 教授所领导的研究组利用变异性 ( metamaterials ) 材料制作出一种保护装置, 它能使被保护的對象不被雷达系统的微波辐射探测到. 他们是基于英国皇家学院 J. Pendry 提出的设计思想来制造的. 围绕在被保护对象外面的装置, 有点像一件隐身外衣, 它能使作用在上面的微波产生弯曲, 从而使雷达系统无法接收到被侦察对象产生的微波辐射.

隐身外衣是一个柱形的装置, 半径约为 6 cm, 它包围在一个由铜制成的对象外部. 这样的排列是为了能研究 10 GHz 的微波脉冲以及可移动天线对隐身外衣的作用. 虽然外衣表面可吸收与散射某些微波辐射, 但这些脉冲围绕着探测对象时已被弯曲了. 隐身外衣相当于是一些分裂状的环形共振器 ( split-ring resonators, 简称为 SRRs ) 它们都由一些薄薄的铜片组成, 并按一定的规则排列. 当改变 SRRs 的形状、大小和排列方式时, 它们就能改变隐身外衣各点处的电容率与磁导率. 藉助于变换光学的理论就能确定出, 当电容率与磁导率处于什么数值时, 微波脉冲就会光滑地绕过被测试对象, 就像水在一块光滑的石块上流过一样. 现在利用变异性材料后, 已使变换光学成为物理学中的一个新的和急待开发的领域. 目前隐身外衣是一种柱形装置, 它只能对微波辐射作二维的屏蔽. Smith 教授认为, 若能将形状改变为球形, 将可以在各个方向对微波辐射进行屏蔽. 这项工作对于国防和情报信息等方面具有重要的意义. 换句话说, 材料学的发展可以使我们对许多对象在一些好奇的观察者眼前得到隐蔽, 使它们成为一种看不见的事物.

( 云中客 摘自 Science 3 October 2006 )

### 飓风与气候的关系

在 Katrina 飓风发生三周后 Science 杂志发表了一篇论文, 文中提到了从 1970 年到 2004 年间热带旋风的次数并未增加, 但它们的强度却明显地增强. 除此以外, 在这段时间间隔的后半段, 4—5 级飓风的次数要比在前半段多 50%. 这样的气候变化在气候学家中存在着两种看法, 一种认为是由于近年来全球的温室效应引起的, 由于大气温度的升高使大西洋海面温度也随着增高, 从而促使大量飓风的诞生. 另一种看法认为是自然界中存在的大西洋长周期振荡 ( Atlantic multidecadal oscillation ) 形成的海洋温度的升高, 使飓风的数量增长. 两种意见涉及到变暖的大气对飓风的数量与强度究竟有多大影响.

美国佛罗里达州立大学的地球物理学家 J. Elsner 教授对此展开了研究, 他通过卫星和地面气候观察所, 收集了全球的气象记录, 从中选出记录中的峰值, 并将它们与大西洋北部海域的季平均海面温度作对比, 再利用特定的统计模型进行分析计算. 结果显示, 在大气温度的峰值后, 经常会有季节性的飓风出现. 由此可见, 确实是大气温度的升高导致了飓风的频频出现, 两者间具有一定的因果关系. 所以全球的温室效应是强飓风出现的原因.

( 云中客 摘自 Geophysical Research Letters, 23 August 2006 )