

第三讲 脉冲星观测技术

北京大学 吴鑫基

一、脉冲星观测的技术要求

- 能接收到来自脉冲星的微弱辐射

要求有很高的灵敏度

- 能分辨脉冲星短周期结构

要求有很高的时间分辨率

- 测量脉冲星的准确位置和自行

要求有很高的空间分辨率

(其他研究不要求高的空间分辨率, 允许方向主瓣中有多颗脉冲星!)

脉冲星: 极端微弱的射电源



拿起一根羽毛所付出的能量
微不足道!

但这点能量却是全世界的射电望
远镜在一年中接收到所
有脉冲星(1000多颗)的能量
的1百万倍!

观测太难了!

对周围环境的电磁波干扰太敏感了!

流量密度单位： 央斯基 (Jy)

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ erg/s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{m}^2$$

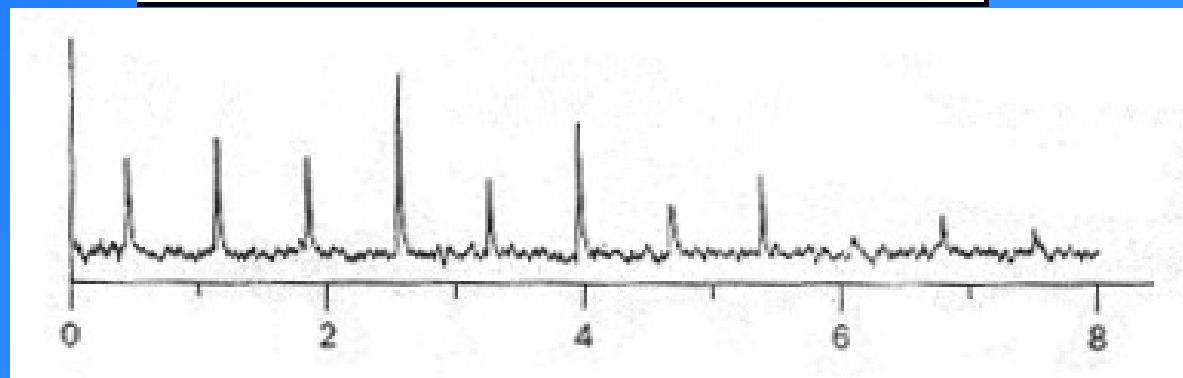
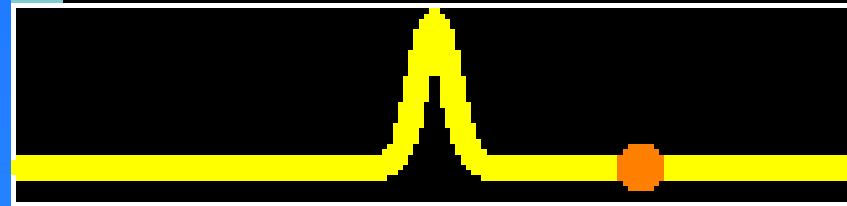
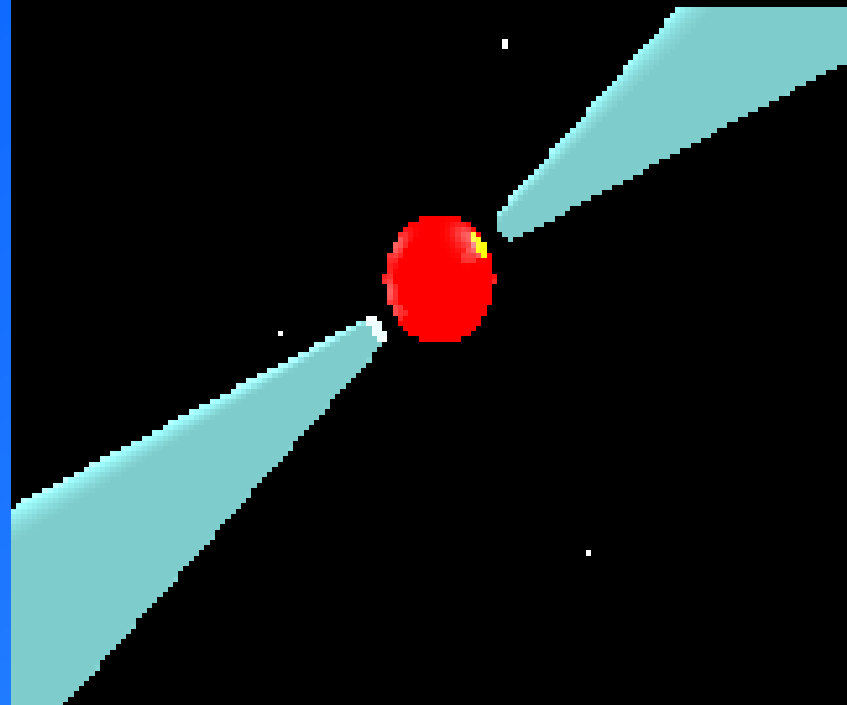
比较弱的脉冲星 0.5 mJy

25米直径天线

300MHz带宽

每秒到达天线的能量约为 7.5×10^{-19} 尔格

MPIfR-Bonn Pulsar Group



灵敏度公式

$$S_{\min} = \frac{C (T_{\text{sys}} + T_{\text{sky}})}{G \sqrt{N_p t_{\text{int}} \Delta \nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}$$

C 为信噪比; T_{sys} 系统噪声温度;

T_{sky} 天空背景噪声温度;

G 天线增益由口径和效率决定;

N_p 观测馈源的极化数; $\Delta \nu$ 频带宽度;

t_{int} 观测的时间; P 脉冲星周期;

W 脉冲等效宽度。

二、脉冲星的观测研究

- 1, 巡天发现脉冲星（包括银道面巡天、球状星团巡查和特殊区域或对象巡查）
- 2, 脉冲星脉冲到达时间的观测（包括周期特性、位置、自行等）
- 3, 脉冲星辐射特性的观测（包括脉冲特性、频谱、偏振等）

三、提高灵敏度的方法之一：大型天线

大型天线

加工精度 $1/20$ 波长（毫米波）

馈源及支架遮挡（GBT）

自重变形（主动反射面GBT和FAST）

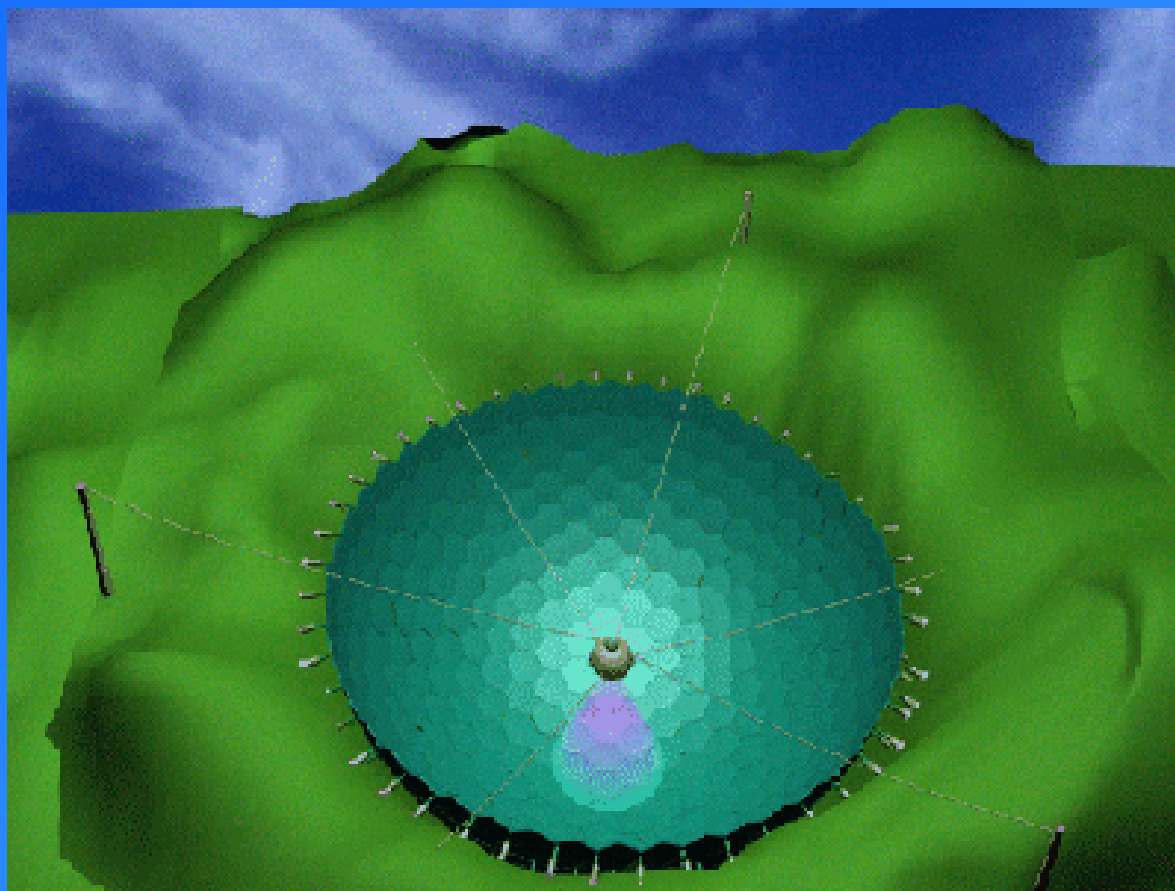
视场和可观测天区范围（Arecibo和FAST）

- 提高面板表面的精度：紫台13.7米，2008年望远镜完成建立温度自适应副面调焦系统，对天线主面板除尘清洁。

大型单天线射电望远镜浏览

- 美国Arecibo 305米射电望远镜
- 美国GBT100 × 110米射电望远镜
- 德国Bonn 100米射电望远镜
- 英国Jodrell Bank76米射电望远镜
- 澳大利亚Parkes64米射电望远镜
- 中国500米射电望远镜

国内外均对贵州500米射电望远镜
发现脉冲星以很高的期望，估计能发现超
过现今的几十年发现的总和。



四、提高灵敏度方法之二——消色散技术

1, 星际介质的色散

在银河系恒星之间空空荡荡，但仍然有着各种各样的物质。星际介质成分包括中性氢、电离氢、氦气、微量的轻元素原子和微小的固体粒子。

射电源的无线电波在星际空间中传播，必然要受到星际介质的影响。其中，自由电子的影响最大。

消色散技术是脉冲星观测的核心技术

$$S_{\min} = \frac{C (T_{\text{sys}} + T_{\text{sky}})}{G \sqrt{N_p t_{\text{int}} \Delta \nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}$$

- 灵敏度强烈地依赖于接收机的频带宽度。频带宽了，脉冲轮廓展宽了，导致形状变化，甚至使脉冲消失 ($W=P$)。观测到的脉冲宽度为：

$$W^2 = W_0^2 + t_{\text{samp}}^2 + t_{\text{DM}}^2 + t_{\text{scatt}}^2$$

$$W^2 = W_0^2 + t_{samp}^2 + t_{DM}^2 + t_{scatt}^2$$

观测到的脉冲宽度增加了采样误差、色散延时展宽及散射延时展宽。延时是指相对于真空中的传播导致的延时。

$$t_{DM} = 4.15 \times 10^3 \frac{DM}{V_{MHz}^2} \quad (\text{s})$$

$$t_{scatt} = \left(\frac{DM}{1000} \right)^{3.5} \left(\frac{400}{V_{MHz}} \right)^4 \quad (\text{s})$$

频率比较高时散射延时展宽比较小，主要是色散影响

无线电波在星际介质中的群速

群速 $V_g = c \left(1 - \omega_p^2 / \omega^2\right)^{1/2}$

等离子体频率 $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m}$

- 对一个连续的信号群速的减小不可能测量出来的。
- 对脉冲信号就能够测量。测量不同频率的脉冲到达时间的延迟。

- 从群速公式出发可以推出如下公式:

$$\star t_2 - t_1 = \frac{e^2}{2\pi mc} \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \times DM$$

$$\star DM = \int_0^d n_e dl \approx \bar{n}_e \cdot d$$

DM为色散量，是一个观测量，单位是秒差距/立方厘米

接收机带宽的上限公式

$$\star B_i = \frac{V_{\text{MHz}}^3}{8.3 \times 10^3 DM} \tau(s)$$

频率、脉冲宽度及距离的函数。18厘米消色散系统的单通道带宽是2.5MHz，当DM = 100时时延0.5ms。

13厘米时，8MHz带宽，DM = 100时时延0.5ms。

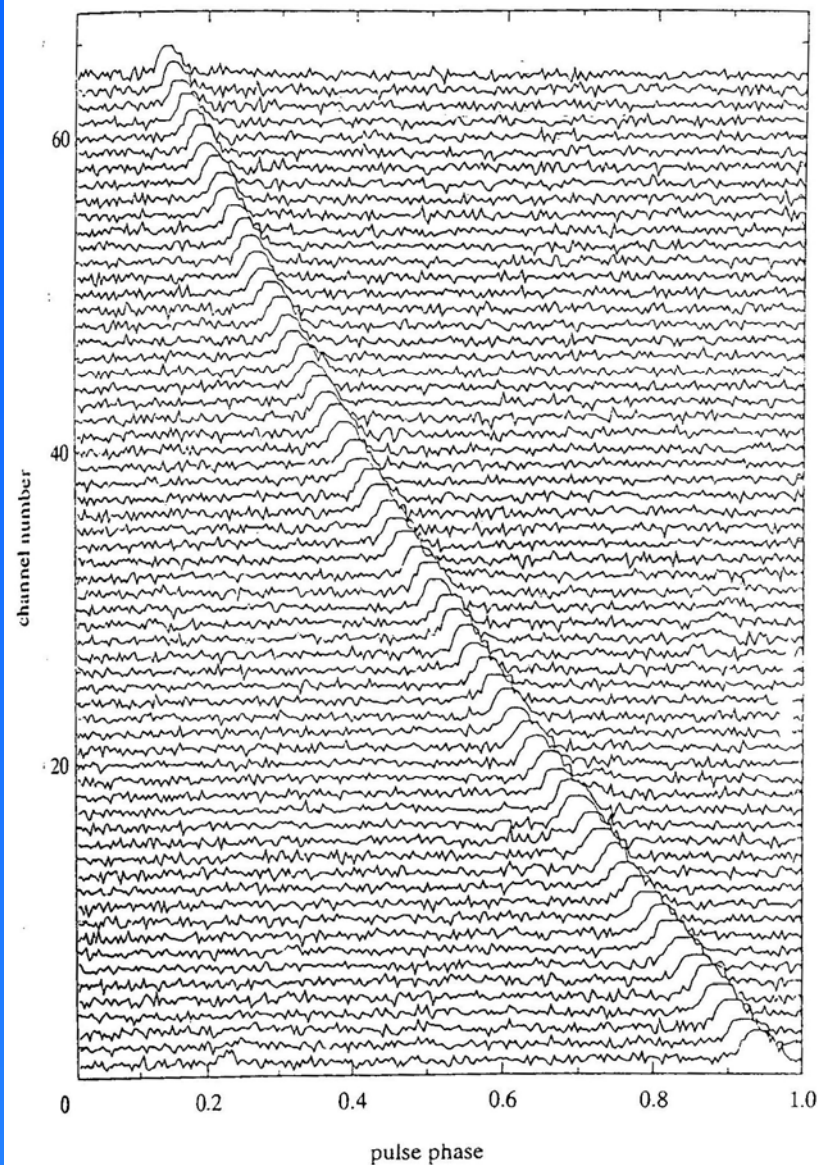
色散影响举例：蟹状星云脉冲星

- 接收机中心频率为232兆赫，带宽1兆赫，频率低端相对于高端的时间延迟将达39.4毫秒
- 脉冲星周期33毫秒。色散延迟超过周期，脉冲被平滑。
- 只容许33kHz频带宽度。这成为脉冲星观测的一个重要障碍。
- 低频观测色散效应严重！

2, 滤波式多通道消色散接收机

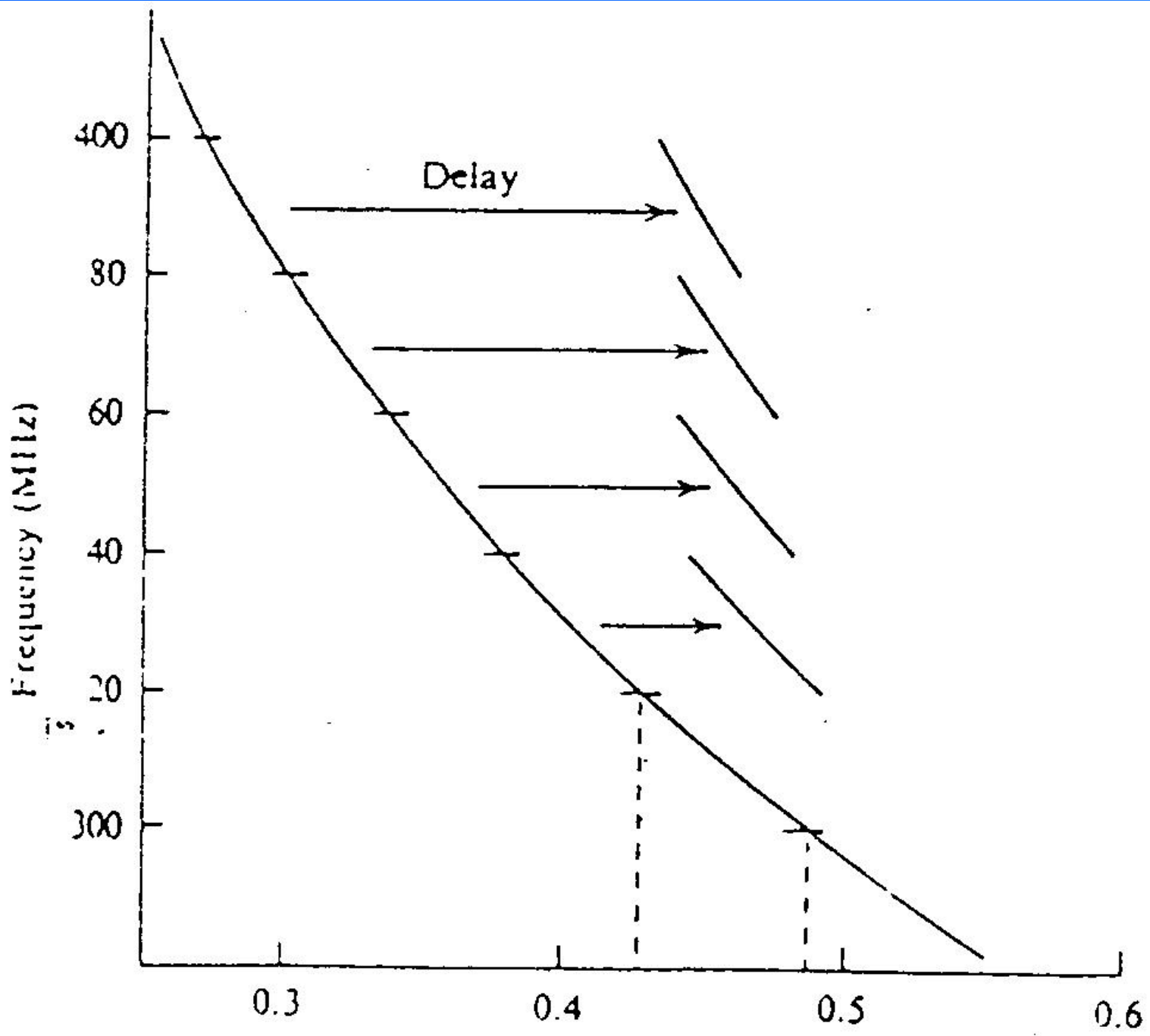
滤波式消色散的办法是把接收机总通频带分成许多窄带，每一个窄带的带宽小于可允许的带宽上限。计算出各窄带之间的相对时间差，消色散就是把各个频率通道的结果补偿各自对第一个通道的时间延迟后再加起来。

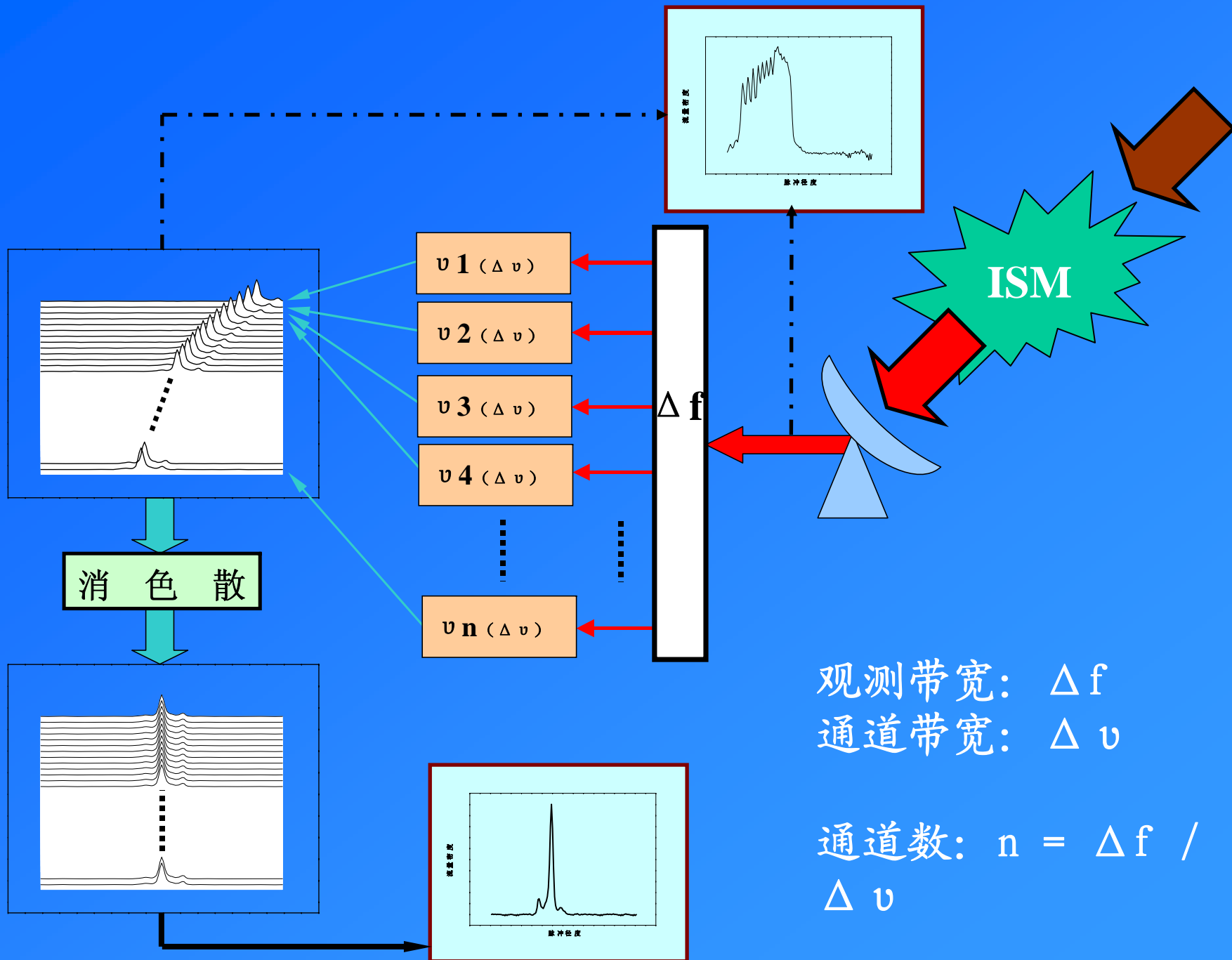
乌站1999年的消色散系统是 $2 \times 128 \times 2.5\text{MHz}$ ，每一路的总带宽为320MHz，比单通道单极化情况的灵敏度提高了 16倍。



纵坐标：频率通道数
横坐标：到达时间
(用周期表示)

图：PSR1641-45的
观测结果
高频信号先到达





观测带宽: Δf
 通道带宽: Δv

通道数: $n = \Delta f / \Delta v$

多通道消色散优缺点

- 优点：技术成熟、相对便宜、可靠性强。
- 缺点：观测的时间分辨率受到限制，因为它和子通道频带宽度成反比；
- 每个子通道频带宽度内的色散没有被消除，残存的色散展宽影响观测的精度。不适合特短周期或特大色散量的脉冲星的观测。
- 各通道的增益、通带带宽和形状差别很大，还随时间有变化。

2, 数字非连续消色散技术

- 将观测频段基带混频（如0 ~ 1024MHz）
观测带宽BMHz，采样 $2B$ Mb/s；共N个采样点
- 对观测数据分组，进行快速傅立叶变换；做m个通道（如8192）的软件模拟数字式滤波器组；
每通道宽 $\delta f = B/m$ （~ 0.125MHz）；
- 对m通道，N/m组频谱数据进行消色散处理
新产生的消色散平移后的m通道数据；
- 再做快速FFT，得到消色散后的时域数列，
折叠后获得消色散的脉冲轮廓。

澳大利亚ATNF PDFB (脉冲星数字式滤波器组)

- 总带宽：8、16、32、64、128、256、512、1024MHz等情况（国台为512MHz；乌站为1024MHz）；
- 通道数：8192；
- 每一个通道的带宽可以非常小
- 可以进行脉冲星消色散，也可以进行谱线观测

数字非连续消色散技术优缺点

- 优点:

 - 单通道可以很窄;

 - 通道频宽是可根据需要进行调整;

 - 避免多通道消色散各通道的增益、通带带宽和形状差别很大的问题。

- 缺点:

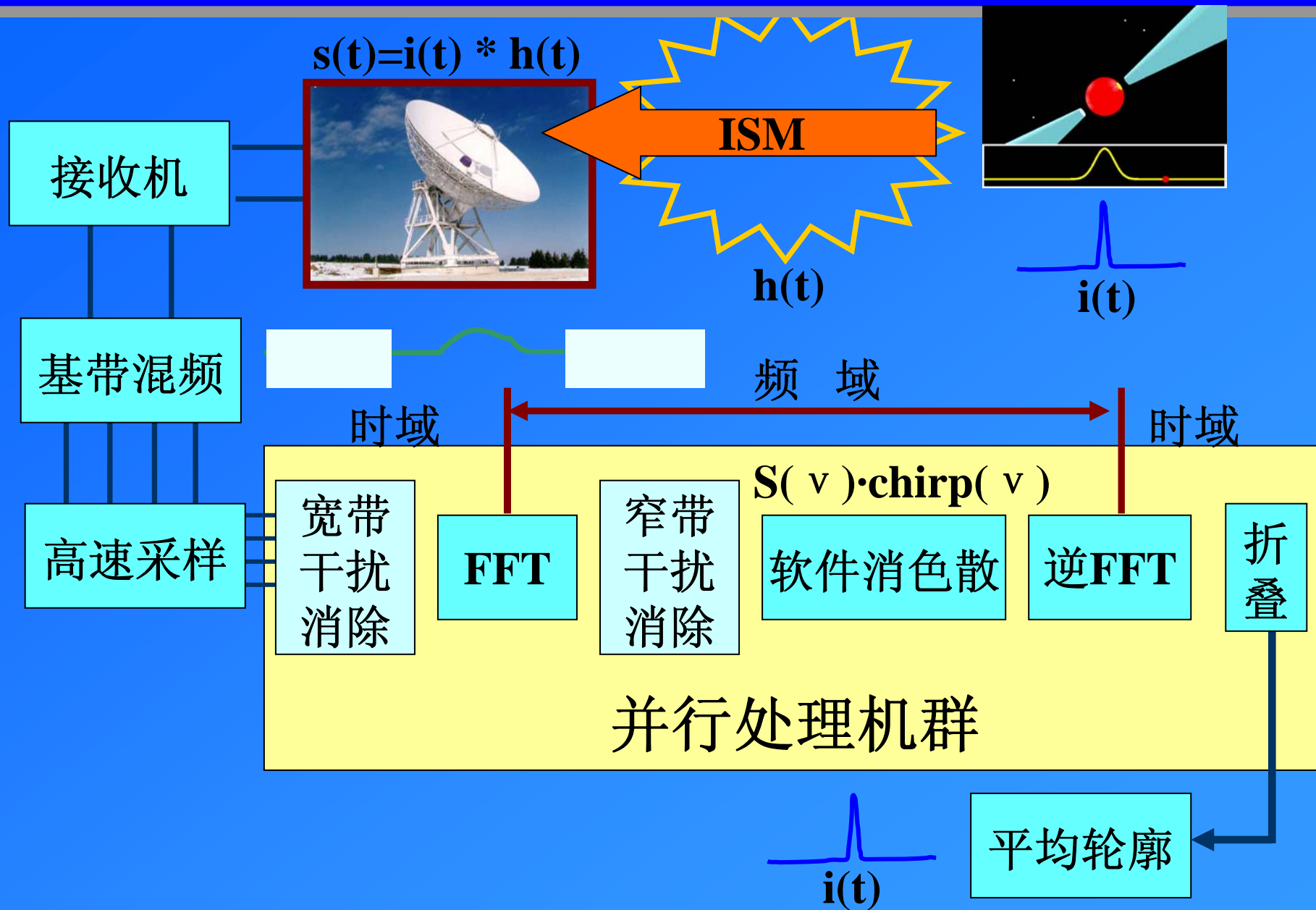
 - 相对复杂和昂贵。

3, 相干消色散

- 星际介质对无线电波的色散作用实际上相当于无线电波经过了一个具有星际介质传输函数的滤波器。
- 如果将观测信号通过一个具有星际介质传输函数反函数的滤波器，就可以消除信号中星际介质的色散效应。可以通过硬件实现也可以通过软件实现。是检波前消除技术，保持了所处理的观测信号的相位关系。

- 相干消色散过程可以简述为：对观测信号采样，获得海量数据；对采样数据作傅立叶变换，变换结果乘星际介质chirp函数，再反傅立叶变换回到时域得到消色散的时域信号。处理的计算量非常巨大。
- 整个系统分为三个单元：资料获得单元，数据传输单元，并行处理计算机群单元。

相干消色散接收机



相干消色散技术的优点

- 可以实现很高的时间分辨率。理论上的时间分辨率只受到观测带宽的限制，是观测带宽分之一。实际的限制是采样速度，它决定观测带宽，因为对观测带宽需进行Nyquist采样以避免频谱混叠（aliasing）。
- 减少损耗，能使灵敏度比采用多通道消色散技术高出约2倍；
- 具有很强的消干扰能力。

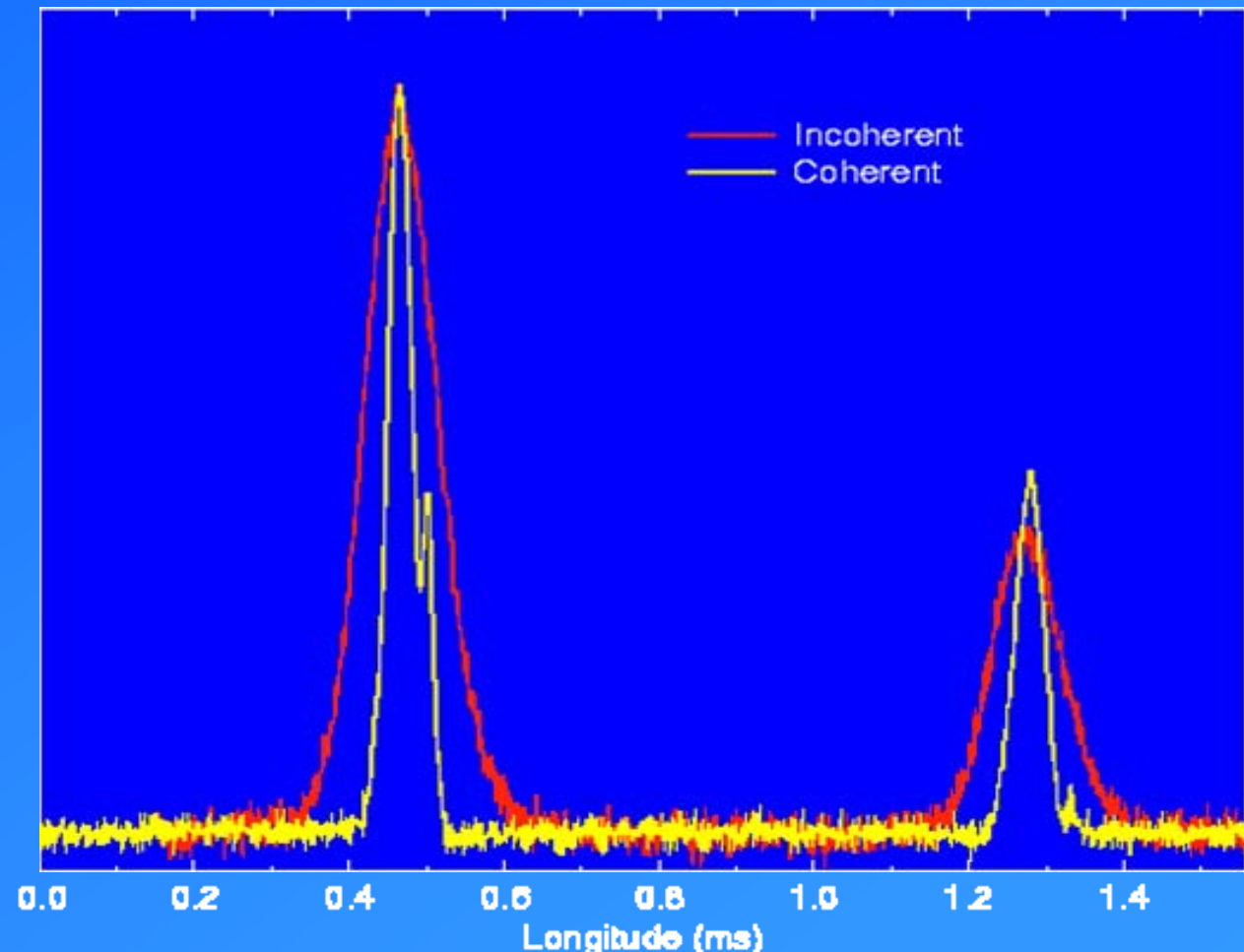
乌站和国台相干消色散系统

- 乌站相干消色散系统于2006年实验完成，频带宽度为30MHz。带宽选择30MHz是准备用于频率比较低的327和610MHz上的。1500MHz的观测需要带宽大于300MHz。正在研制这两个频道的接收机系统，尚未进行实际观测。（参见艾力博士论文）
- 国台相干消色散系统于2010年完成，频带宽度为25MHz。（参见金乘进验收报告）

相干消色散接收机

非相干 vs. 相干 消色散

- 相干消色散
彻底消除色散
对信号的影响
，提高观测精
度和灵敏度！



消色散技术使接收机频带宽度 大大增加,提高了灵敏度

- 乌站25米射电望远镜最初采用单频率通道观测脉冲星;
- 1999年采用消色散技术: $2 \times 128 \times 2.5\text{MHz}$, 频宽增加128倍, 灵敏度提高11倍多;
- 2008年采用数字式消色散系统, 频宽达到1000MHz, 比单通道的2.5MHz增加400倍, 灵敏度提高20倍。相当于, 天线面积增加了20倍, 相当于超过100米口径的射电望远镜。

五、前置放大器的噪声

$$S_{\min} = \frac{C (T_{\text{sys}} + T_{\text{sky}})}{G \sqrt{N_p t_{\text{int}} \Delta \nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}$$

噪声来源：接收系统噪声和银河系背景噪声。
实际上，还应包括环境噪声，环境的电磁干扰将导致无法观测。主要依赖台址的选择，其次是防干扰和抗干扰措施。

1、天空背景噪声

- 主要来自银河系背景射电辐射，很强，特别是银道面，银心方向更厉害。实际上比背景辐射更弱的脉冲星是观不到的，最终决定了灵敏度。
- 脉冲星辐射是幂律谱（平均-1.5），低频比高频段强得多，但是银河系背景辐射是更陡幂律谱（平均-2.6）。327MHz的背景辐射约300k；1.5GHz约5k，毫米波，接近0 K。

2, 系统噪声

系统噪声包括接收机、馈源、天线等。接收放大系统第一级最重要

$$T_e = T_1 + \frac{T_2 - 1}{G_1} + \frac{T_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

第一级采用低噪声放大:

- 米波: 一般低噪声线路 (上海天文台)
- 厘米波: 致冷放大器 (乌站和国台)
- 毫米波: 超导接收机 (紫金山天文台)

其原因是适应银河系背景噪声情况。

乌鲁木齐致冷前置放大系统 系统的性能参数

观测总带宽:320MHz

Filter-Bank: $2 \times 128 \times 2.5\text{MHz}$

2002年8月~至今

128通道、双偏振、致冷接收机

通道	常 温		制 冷	
	A	B	A	B
接收机 温度 (K)	50	65	10	10
系统 温度 (K)	86	95	21	22
灵敏度 (mJy)	10mJy		优于1mJy	



国台自主研发L波段脉冲星接收系统

L波段（1.2-1.8GHz），带宽500MHz

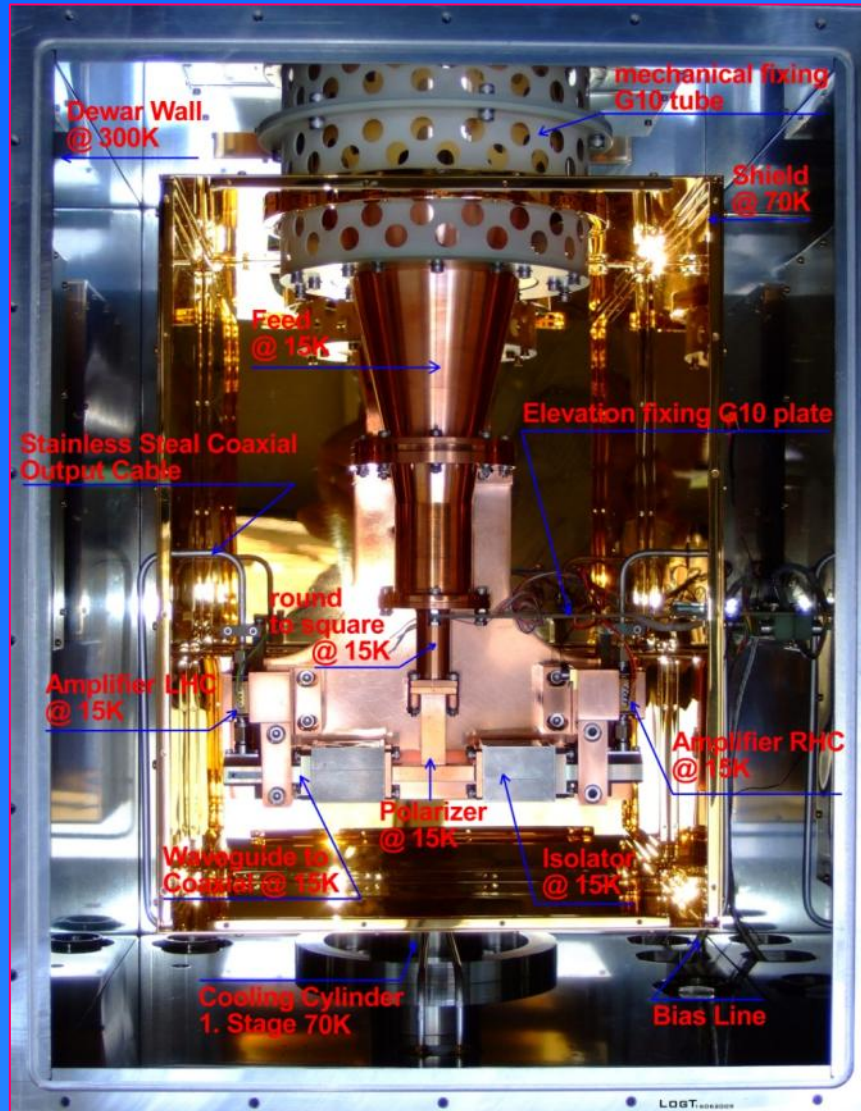
由馈源、极化器、低噪声放大器和制冷系统组成

接收机噪声温度20K

数字式消色散系统（500MHz带宽）

相干消色散系统（25MHz带宽）

1.3厘米接收机



乌站于2007年首次在国内研制世界上先进的厘米波段双极化制冷接收机

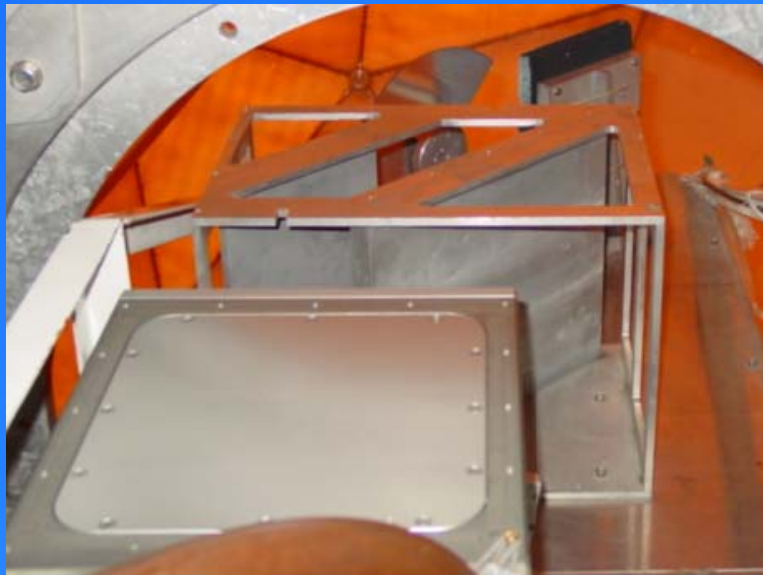
经过对低温制冷系统的初步测试，杜瓦漏率和制冷曲线等参数指标均达到设计预期

眼下——射频与中频系统、定标系统等



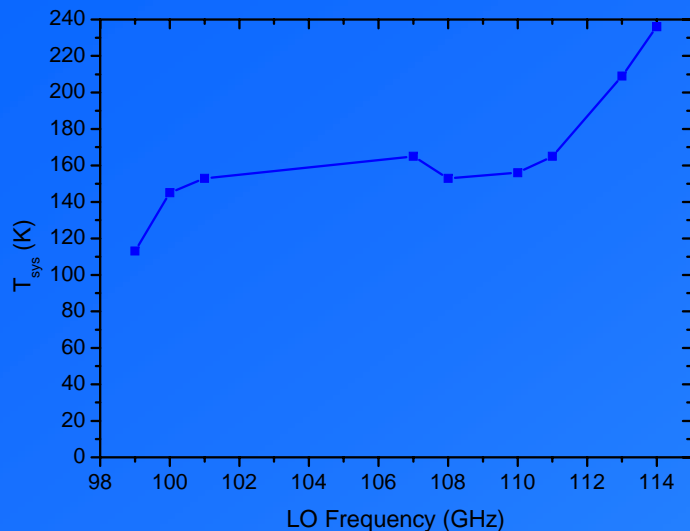
85-115GHz超导SIS接收机系统

- 超导接收机 (核心部件SIS混频器, 需4K工作环境)
- 4-K制冷系统 (杜瓦、制冷机、真空泵等)
- 准光系统 (透镜、平面镜、椭球镜等; 天线副面到接收机喇叭的耦合)
- 锁相本振系统 (为SIS混频器提供稳定的本地参考信号)





系统噪声及观测结果对比



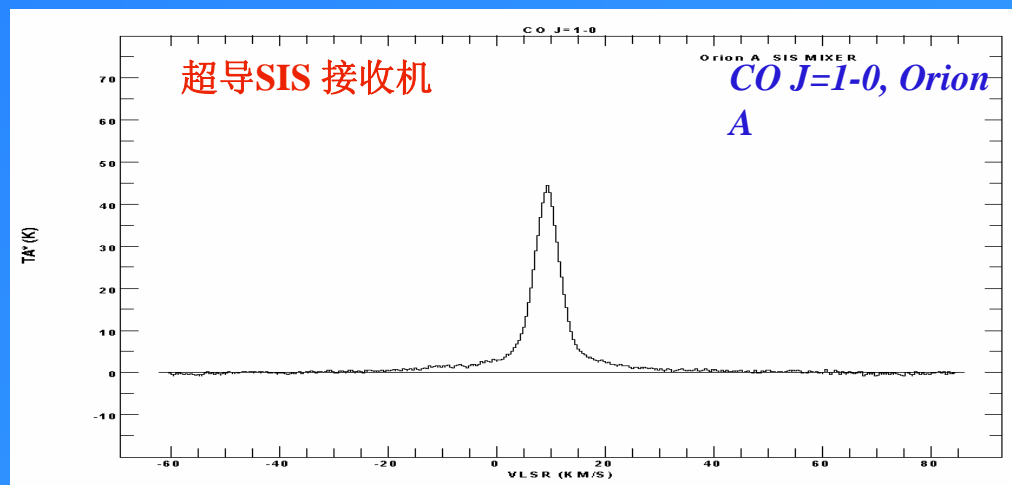
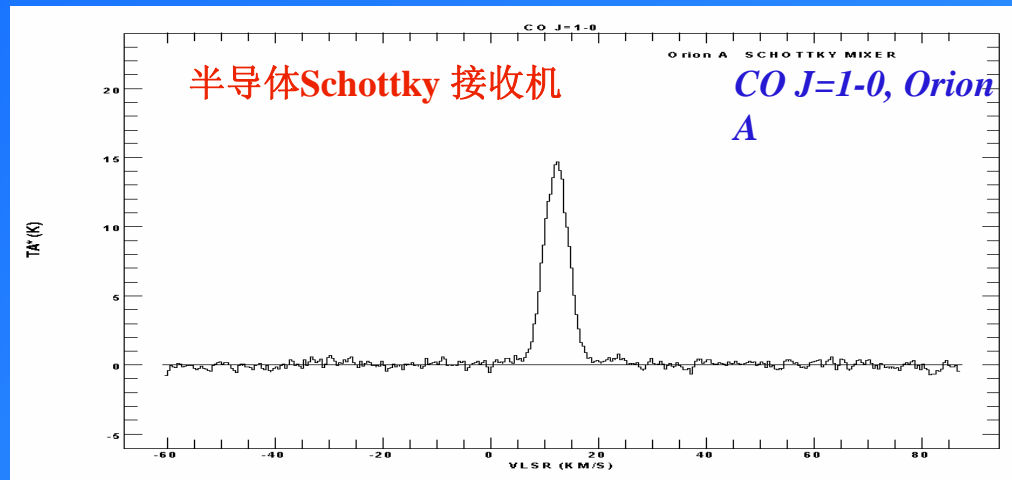
典型系统噪声温度(EL=60°)

SIS接收机

信噪比改善近一个量级!

本振系统更新

解决失锁频繁问题, 提高观测效率



3, 环境噪声

- 国际国内有频率保护，其实并不解决问题，主要是保护一些谱线，对于我们要求320MHz, 甚至1GHz, 决不可能。
- 调频电台、电视、手机以及无线电设备都有影响；
- 只能到荒无人烟的地方寻找合适的台址。

国内情况：上海佘山、北京密云、昆明凤凰山、乌鲁木齐南山等都在大城市附近。

德令哈13.7米；贵州500米；新疆21厘米阵；新疆80米新址；内蒙古日像仪；远离城市。

贵州500米（建设中）

在射电望远镜所在处的5千米以内，不允许有手机信号和其他无线电发射，还要求在150千米范围内设立“协调区”，对无线电环境也有一定的控制。

贵州无线电管理局确认，以大窝凼为中心，半径5公里范围内严禁设置任何无线发射设备。

观测条件好，特别难得的米波观测要充分利用。

新疆21厘米阵（已建成）

观测波段1.5~6米范围正是调频广播和电视所使用的，必须避开。

21厘米阵由因此21厘米天线阵共有阵列81组，单元天线10287架，等效接收面积达40000平方米。

台址在新疆天山乌拉斯台，海拔2650米，四周是3000米以上的群山环抱，能阻挡外界的无线电波。生态环境很差，气候寒冷，年平均气温零下1.7摄氏度，冬天气温往往在零下摄氏20到30度。

新疆80米（筹建中）

国内口径最大的全天可跟踪天线。新疆自治区同意提供5000万，加上中科院等提供的经费。新台址选择奇台县，比目前的南山站情况要好很多。

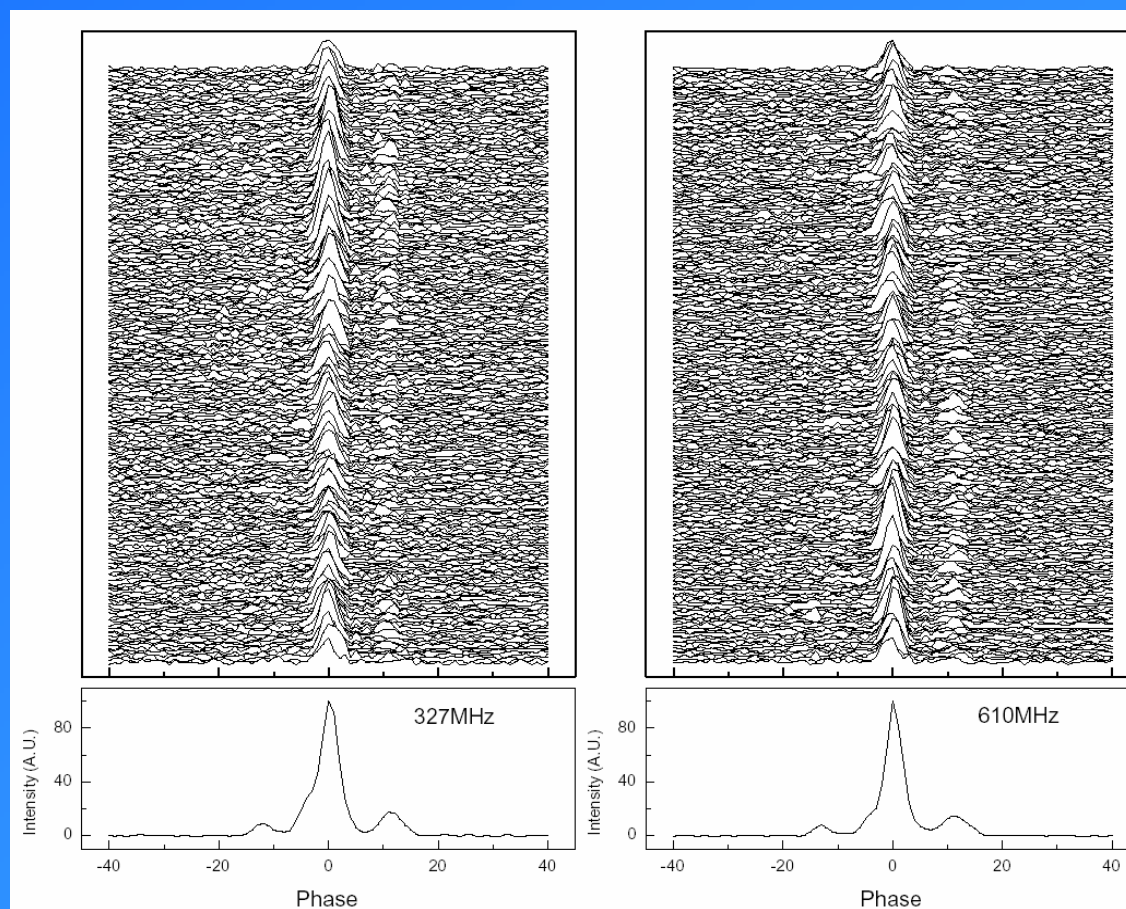
太阳射电日像仪（建设中）

由低频和高频阵两个系统构成：共100面天线（口径4.5米和2米）。共82个频率点成像。分辨率最低为1角分，最高我1.8角秒。是世界上最先进的射电日像仪。

台址选在内蒙古正镶白旗大草原。

五、微弱信号提取方法—按周期折叠后相加

- 现在已发现约2000颗脉冲星，其中绝大部分的流量密度都很弱，信号远远低于接收机的噪声，只有极少脉冲星能够直接获得单个脉冲。
- 右图是北天最强脉冲星的单个脉冲观测记录（乌站）



五、提取微弱脉冲信号——按周期折叠后相加

- 噪音和信号具有不同的性质，两个强度相同的信号相加，信号增强2倍。两个水平相当的噪音相加，其强度只增加大约1.4倍。
- 把观测记录的数据按周期折叠后相加就能提高信号和噪音的强度比。要求出观测当天的周期，周期不准不行。
- 按周期折叠相加后所得到的轮廓称为平均脉冲，它们的形状保持长期不变。
- 获得好的信噪比，需要比较长时间的观测。

六、望远镜空间分辨率问题

天文望远镜的空间分辨率

$$\theta (\text{弧度}) = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

- 脉冲星观测不追求空间分辨率，个别课题，如确定脉冲星的位置，采用综合孔径和干涉仪系统。
- 巡天观测要求空间分辨率差些，否则一次只能观测非常小的天区。巡天太慢。
- 可以分辨每个方向束中的多个脉冲星。

七、巡天发现新脉冲星

1, 脉冲星搜寻目标

第一是沿银道面的巡天，因为人们都相信，脉冲星是在离银道面很近的地方诞生的。

第二是高银纬巡天，脉冲星有很多自行速度，可能跑离银道面。

第二是有目标的搜寻，：

球状星团中；超新星遗迹中；

伽玛射线源；陡谱、强偏振射电源。

2, 单波束巡天和多波束巡天

- 脉冲星巡天有众多未知数：
位置、周期、脉冲宽度、强弱和色散量。
- 位置不知道，只能逐步进行观测，
每次观测只覆盖很小的面积，因为天线方向瓣更窄。每次观测时间只能很短，灵敏度不高。
- 1997年澳英采用多波束巡天，13个波束同时观测，观测时间增加，提高了灵敏度。比1988年单波束巡天增加了10倍以上。



3, 高频巡天

- 脉冲星辐射和银河系背景都是幂律谱。但银河系比较幂律谱更陡，故在高频可以发现低频观测不能发现的脉冲星。
- 星际介质的色散作用：高频段允许采用比较宽的频带，消色散的效果更好。
- 在脉冲星信号传播的路径上可能存在多次散射，这将导致脉冲加宽。但与观测频率的4次方成反比，高频时影响很小

4, 三个搜索技术:

- 1、周期和DM同时搜索——传统搜索技术
- 2、Acceleration Searches——
搜寻密近双星系统
- 3、DM搜索——搜寻射电脉冲源（事件）
和极端nulling脉冲星

巡天发现新脉冲星

未知：位置、周期、色散量、脉冲宽度

选择一个天区逐点普查；

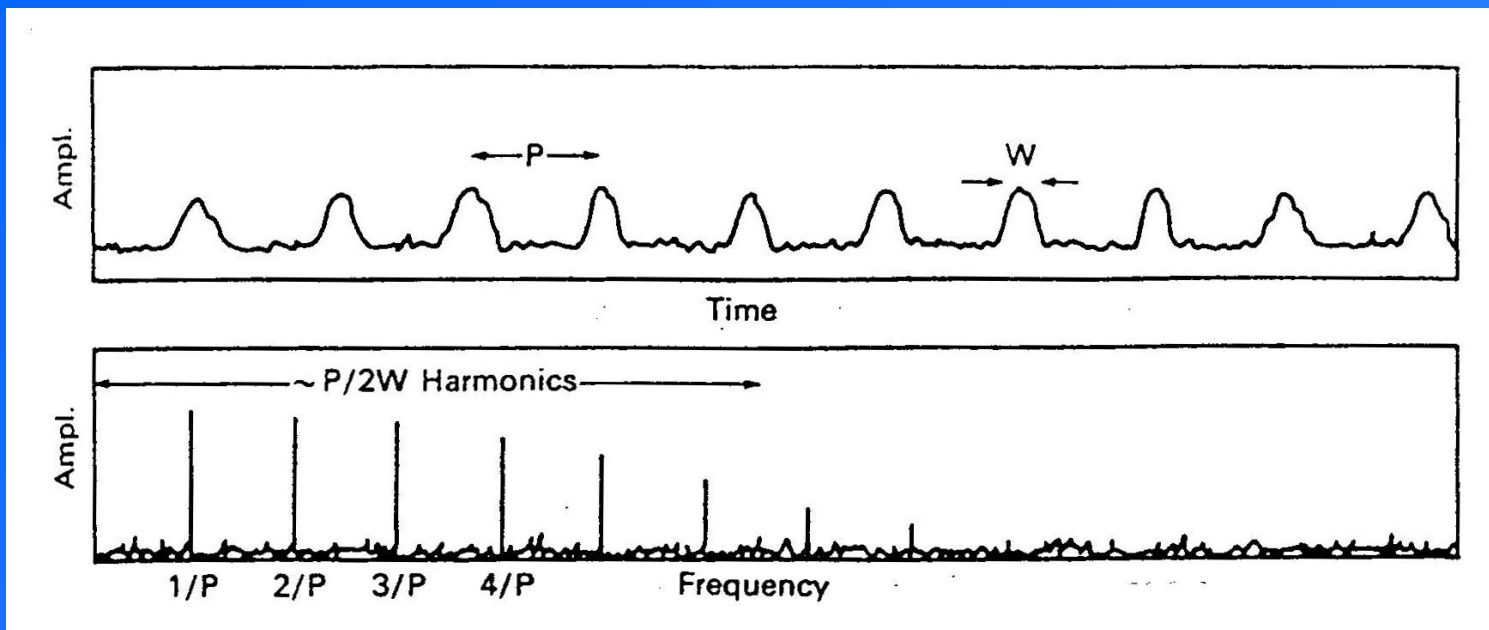
按周期折叠要假定周期范围；

消色散技术要假定色散量范围；

巡天观测得到一个时间序列的数据流，在进行富利叶变换以后，变成为频率序列的数据流，横坐标展现以 $1/p$ 为基频以及谐波频率 $2/p$ ， $3/p$ ， $4/p$。

(1)、周期和DM同时搜索

- 不知道周期和色散量，绝大多数脉冲星很弱，信号比噪声小许多，被掩盖在噪声之中。从数据流资料无法估计周期。用尝试各种周期值进行折叠以发现周期。只有准确的周期值才能把微弱的脉冲信号提取出来。
- 还可以用傅立叶方法找出周期。



- 由噪声形成的幅度很强、密密麻麻的频率谱线。

但噪声形成的谱线不具有谐波，这是脉冲信号和噪声完全不同的地方。

- 利用这个性质，可以把脉冲星的候选频率（周期）找出来。

DM搜索

- 知道周期或几个候选周期值后，先进行按周期折叠获得平均脉冲；
- 然后选取DM的范围，按一定的步长选DM值进行消色散。当色散量DM值选对了，平均脉冲的信噪比大大增加。
- 对于没有准确周期的RRAT，只能对数据流进行各种dm值的消色散试验，如果没有发现信号，可以扩大DM的范围，进行消色散试验。