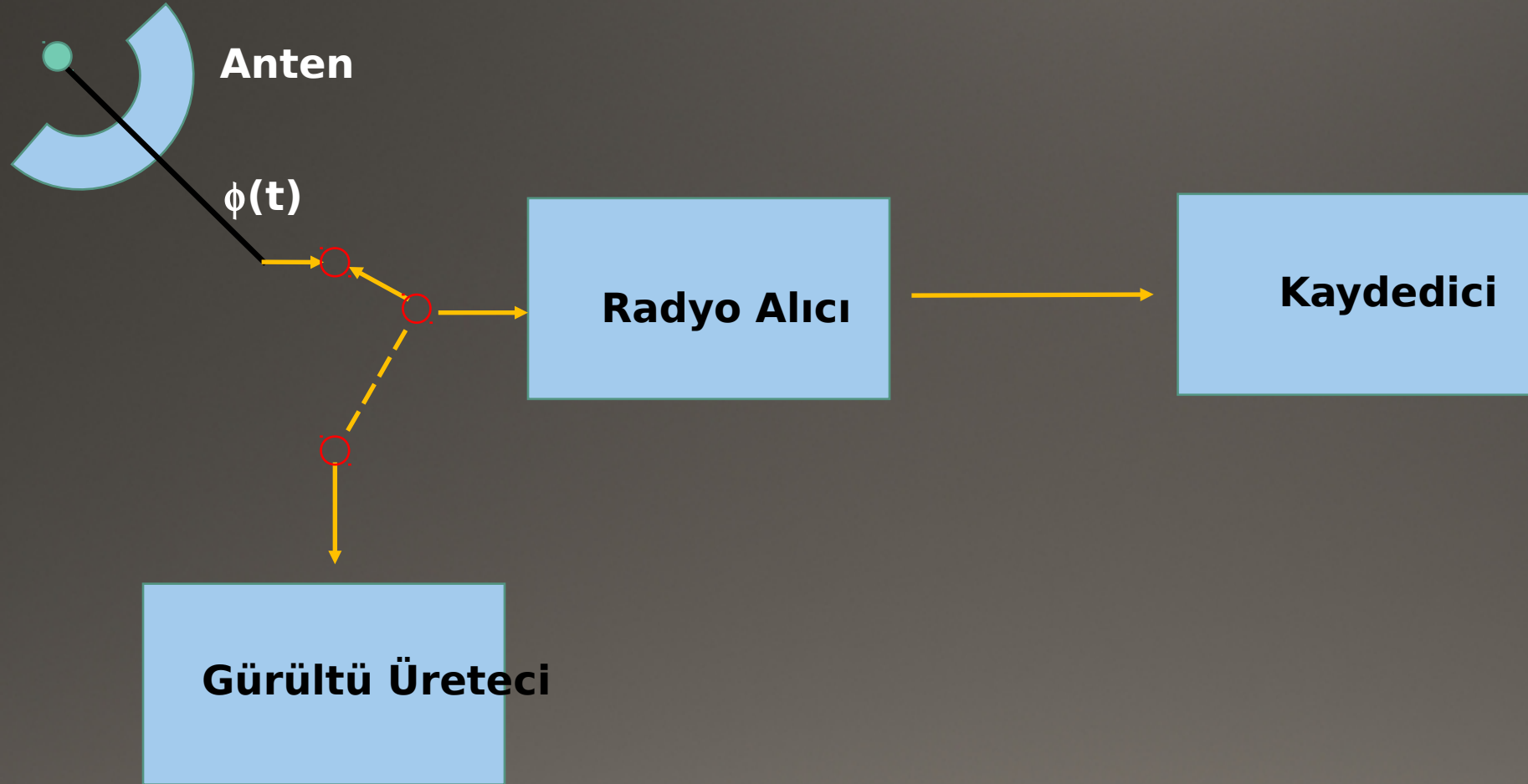


AST406

UZUN DALGA ASTRONOMİSİ

# Radyo Teleskoplar



# ALICILAR :

Optik bölgede bir ışınım demetinin tayfsal dağılımı, yani  $S(\nu)$  ya da  $S(\lambda)$  fonksiyonu, tayfsal aletler yardımıyla incelenerek bulunabilir. Ancak, "beyaz" ışınımın tayfını elde etme işlemi basit bir işlem değildir. Bir kaynaktan gelen ışınım, elektromanyetik alan vektörü ile temsil edilir. Alıcının birim zamanda aldığı enerji, gelen elektromanyetik dalganın  $E_0$  genliğine bağlıdır ve bu nedenle zamandan bağımsızdır. Fakat ölçülen anlık sinyal, gelen sinyalin tayfsal bileşimine bağlı olarak, zamanın düzensiz ve hızlı değişen fonksiyonudur. Genelliği koruyarak, bu anlık sinyalin bir kutuplanma bileşeni  $\Phi(t)$  ile gösterilmiş olsun. Eğer bu

$$\Phi(t) \sim \cos(2\pi \nu t + \alpha)$$

şeklinde zamanın dönemsel bir fonksiyonu olsaydı, ışınımın tayfsal özelliğini veren  $\nu$  frekansı da aynı ifadeden bulunabilirdi.

Ancak doğada tek renk elektromanyetik salınımlar yoktur, "sinyal harmoniklerin" (yani farklı dalga boylarının) bir karışımıdır, öyle ki her birinin genliği sürekli değişir ve evreleri de farklıdır. Örneğin hidrojenin  $\lambda = 21$  cm çizgisi gibi tayf çizgileri bile sonlu genişliğe sahiptir. Dolayısıyla  $\Phi(t)$  zamanın düzensiz değişen fonksiyonudur. Radyo kaynakla ilgili bilgiler bu fonksiyon içindedir ve onları "ayıklamak / ayırt etmek" gerekir.

$\Phi(t)$  nin düzensiz değişimi frekans ve genlik hakkında bilgi vermediği için bir  $\tau$  zaman aralığında bir çeşit ortalama olarak işlem yapılabilir. Bunun için  $\Phi(t)$  nin Fourier transformu yapılır.



$t = 0$  dan  $t = \tau$  ya olan bir zaman aralığı için,

$$A_{\tau}(\nu) = \int_0^{\tau} \Phi(t) e^{2\pi i \nu t} dt$$

Bir başka zaman aralığı  $t = \tau$  dan  $t = 2\tau$  ya olan aralık için,

$$A'_{\tau}(\nu) = \int_{\tau}^{2\tau} \Phi'(t) e^{2\pi i \nu t} dt$$

yazılabilir. Eğer kaynak değişken değilse ve  $\tau$  yeteri kadar uzun bir süre ise, bu iki Fourier katsayısı (yani genlik) birbirine eşit olmalıdır ancak genellikle  $A(\nu)$  ler değişir ve evreleri de farklı olur. O zaman bir ortalama almak ve ortalamalardan olan sapmaları incelemek yararlı olur.

$$A_{2\tau}(\mathbf{v}) = A_{\tau}(\mathbf{v}) + A'_{\tau}(\mathbf{v})$$

yazalım. Bu bir karmaşık sayıdır. Mutlak değeri

$$|A_{2\tau}(\mathbf{v})|^2 = |A_{\tau}(\mathbf{v})|^2 + |A'_{\tau}(\mathbf{v})|^2 + 2|A_{\tau}(\mathbf{v})||A'_{\tau}(\mathbf{v})|\cos(\theta - \theta')$$

Eğer  $A_{\tau}(\mathbf{v})$  için çok sayıda gözlem varsa, böyle denklemlerde **son terim sıfıra yaklaşır**. Çünkü evreler gelişigüzel dağılmış olacaktır. O halde ortalama Fourier katsayısı, bütün  $|A_{\tau}(\mathbf{v})|^2$  lerin ortalamasını alarak bulunabilir.  $\tau$  yeteri kadar uzun seçilirse  $|A_{\tau}(\mathbf{v})|^2$  ler  $\tau$  ile orantılı olacak ve ortalamadan sapmalar küçük olacaktır.

Bu durumda,

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} |A_{\tau}(\mathbf{v})|^2 = S(\mathbf{v})$$

şeklinde bir limit ya da,

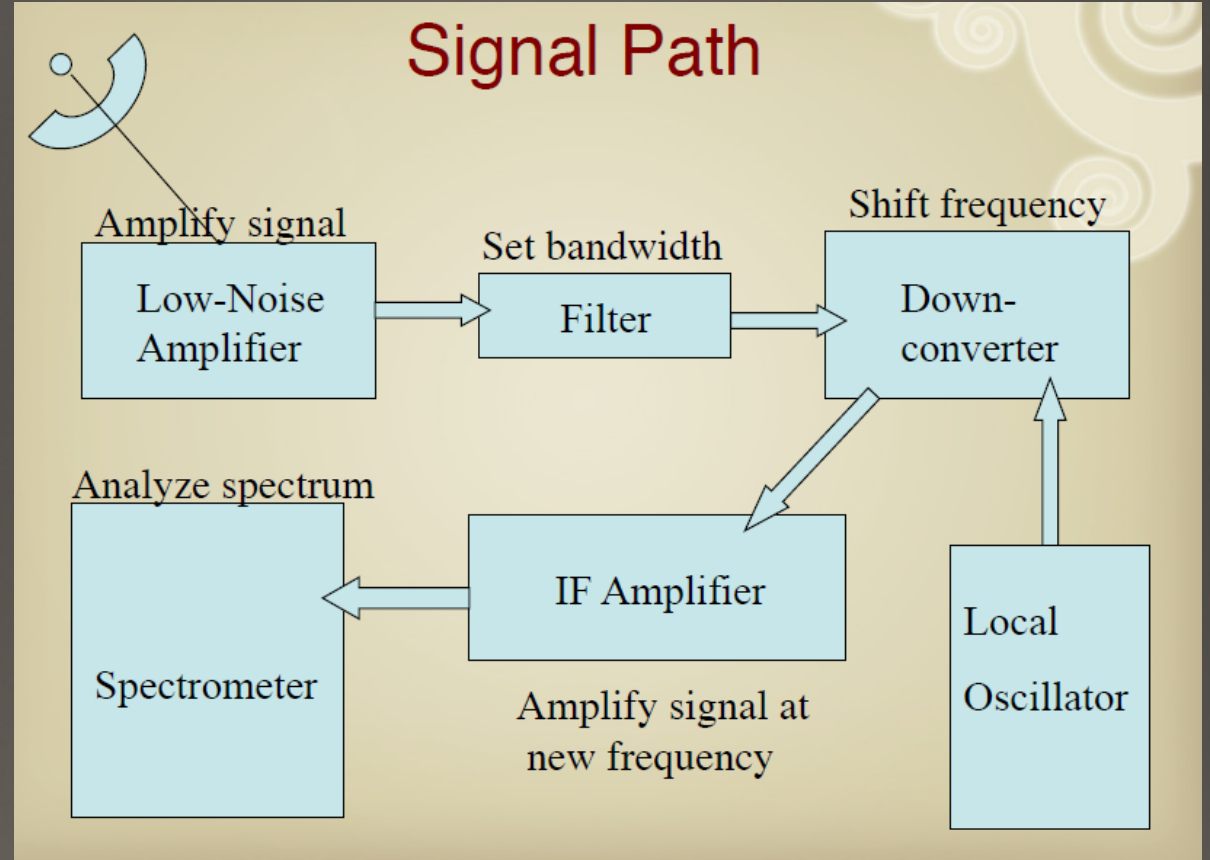
$$S(\nu) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{\tau} \left| \int_0^{\tau} \Phi(t) e^{2\pi i \nu t} dt \right|^2 \right\}$$

yazılabilir.  $\nu$  frekansındaki akının tanımı budur.  
Toplam akı ise

$$S = \int S(\nu) d\nu$$

olur. Bu  $S$  toplam akısı, aynı zamanda  $\tau$  aralığındaki ortalama akıdır.

Modern radyo teleskop alıcıları, bilgisayarlara bağlı yükselteçler, süzgeçler, çözümleyiciler, karıştırıcılar, redresörler gibi çeşitli bileşenlerden oluşurlar. Çok kullanılan bir alıcının bileşenleri şekilde gösterildiği gibidir. Anten tarafından toplanan radyo dalgaları enerjisi özel koaksiyel kablo ya da dalga güdücü ile alıcı girişine aktarılır.



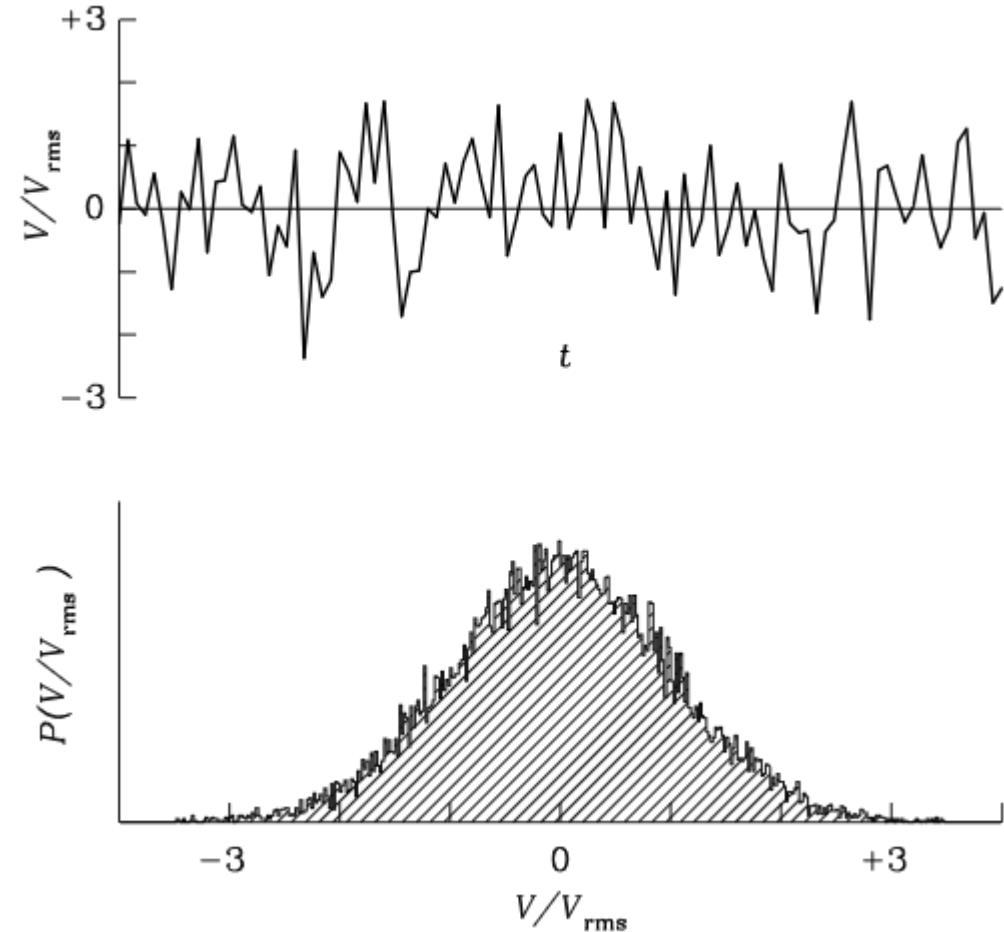


Elektromanyetik titreşimler burada **yükseltilir** ve **rektifiye** edilir. Alıcı çıkışı kaydedici ortama verilir. Kalibre etmek için, ürettiği ışınım gücü bilinen bir kaynak alıcı girişine bağlanır. **Yani alıcının görevi antenden gelen zayıf sinyali ölçülebilecek düzeye yükseltip kaydedici ortama vermektir.** Bu frekansı değiştirmeden büyük bir yükseltme, dalganın biçiminde ve tayf özelliklerinde karmaşık değişikliklere neden olur. Bu işlemler elektronik devrelerle yapılır. Bu değişiklikler şöyle özetlenebilirler :

a) Anten tarafından alıcıya gönderilen sinyal, orta frekansı  $V_{RF}$  olan geniş bir tayfa sahiptir (bir sonraki şekle bkz). Bu zamanın düzensiz fonksiyonu  $\Phi(t)$ , yukarıda belirtildiği gibi genliği ve evresi sürekli değişen harmoniklerin karışımı gibi düşünülebilir. Bütün antenler, farklı tayfsal bileşimli elektromanyetik alanlara farklı davranırlar, yani frekanslara karşı seçicidirler. Fakat asıl frekans seçme ya da “süzme” işlemi alıcı tarafından yapılır.



- Radyo alıcıları çok iyi tanımlanmış belirli bir frekanstaki sinyali ölçer. Sinyal ortalama sıfır civarındadır ve rastgele olarak kısa zaman içerisinde değişmektedir. Ancak güç yasası ile bu sinyalin kuvveti alınarak güçlü bir sinyal haline dönüştürülür.
- Sinyalin dağılımı da Gauss dağılımı verir.



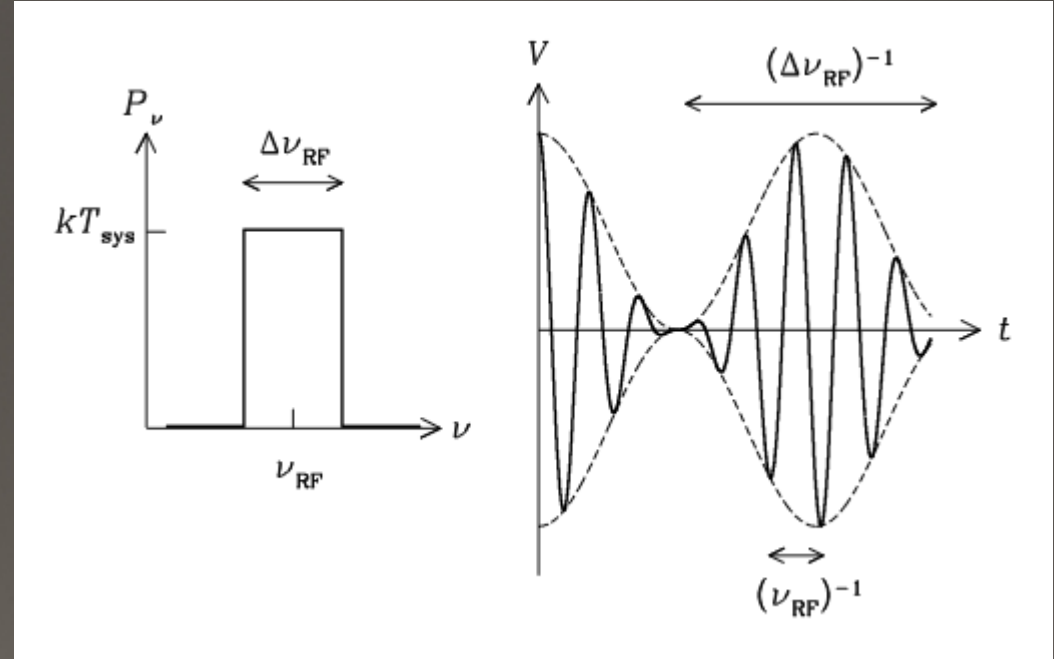
b) Antenden gelen ve orta frekansı  $v_{RF}$  olan sinyal, bir radyo frekansı (RF) yükseltecinde yükseltilir (örneğin,  $10^8$  katı kadar). Band genişliğini RF yükselteci belirler. Sinyal bu durumda gürültü tarafından modüle edilmiş  $v_{RF}$  frekanslı bir dalgadır. Genliğin değişme hızı band genişliğine bağlıdır (bkz. sonraki şekil).

c) RF yükseltecinden gelen sinyal ile bir yerel osilatörden gelen  $v_o$  frekanslı sinyal, karıştırıcı tarafından karıştırılır. Karıştırıcının çıkışı, daha düşük  $v_{AF}$  frekanslı bir dalgadır. Ara frekans (AF) sinyalin gücü, RF sinyalinin gücüyle doğru orantılıdır. Gözlenen radyo frekansın bir ara frekansa çevrilmesiyle kablolardaki güç kaybı azalmakta, elektronik parçalar ucuzlamaktadır. Ayrıca gözlenen frekansı değiştirmek için yalnız karıştırma işleminin önündeki bileşenleri ve yerel osilatördekileri (YO) değiştirmek yeterli olmaktadır.

- Radyo alıcıların temel görevi zaman göre çok iyi tanımlanmış belirli radyo frekanslarında (RF) ortalama bir güç sinyali elde etmektir.

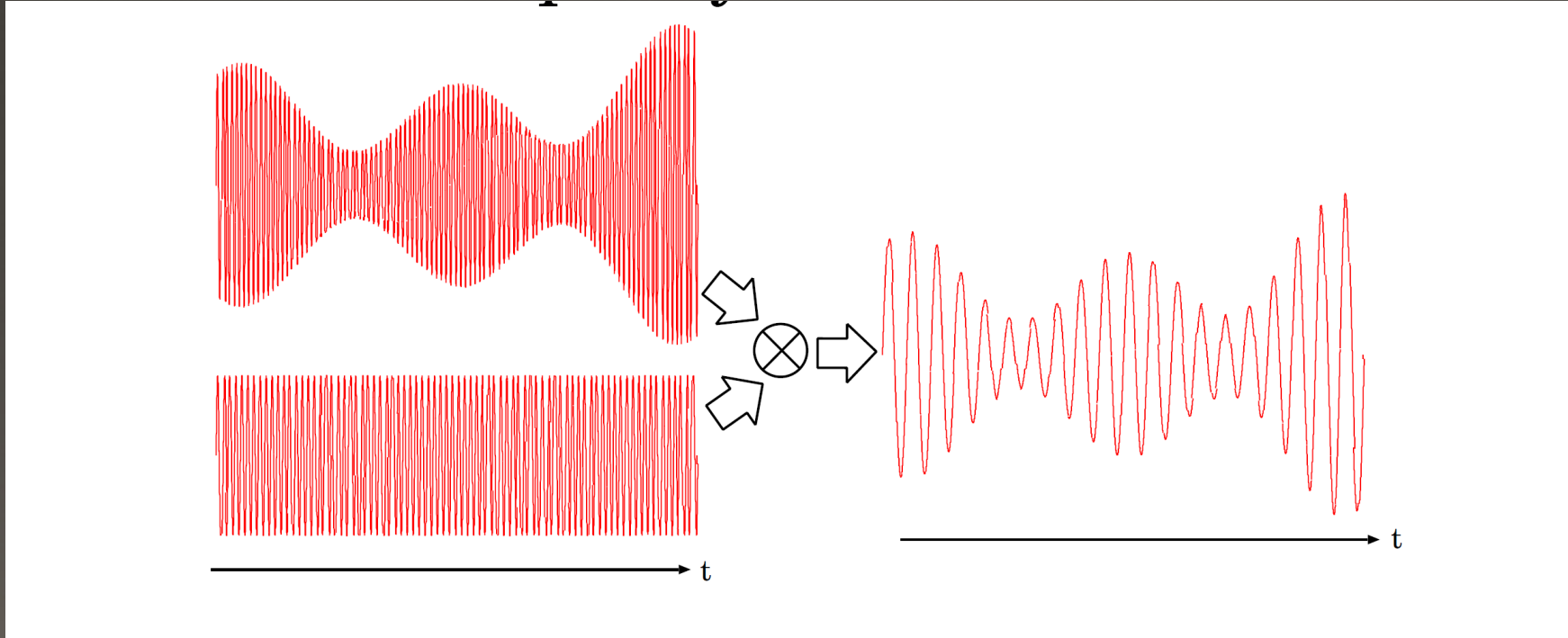
$$\nu_{\text{RF}} - \frac{\Delta\nu_{\text{RF}}}{2} \text{ to } \nu_{\text{RF}} + \frac{\Delta\nu_{\text{RF}}}{2},$$

- Burada  $\Delta\nu$  alıcının bant genişliğini göstermektedir. Bu nedenle radyo alıcılardaki bant genişliğinin kullanılmadaki amaç istenen belirli frekanstaki sinyalin geçmesini sağlamaktır.



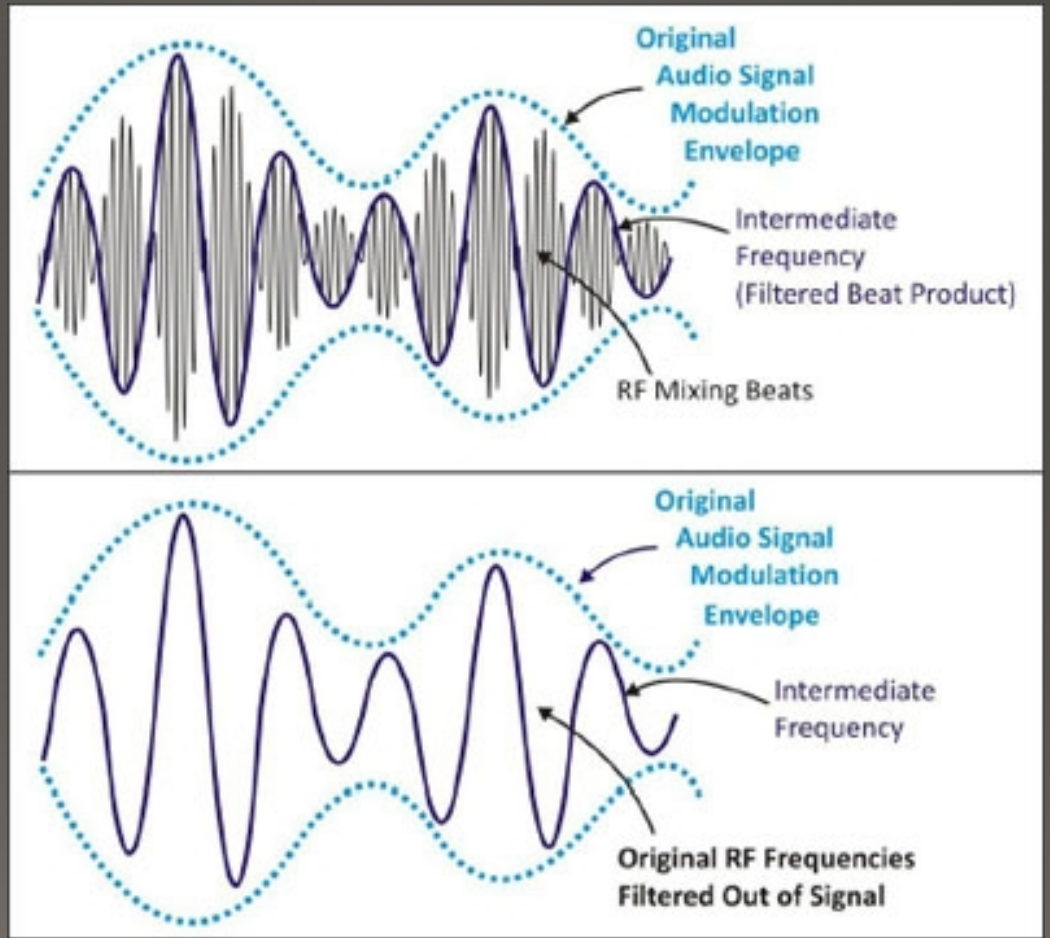
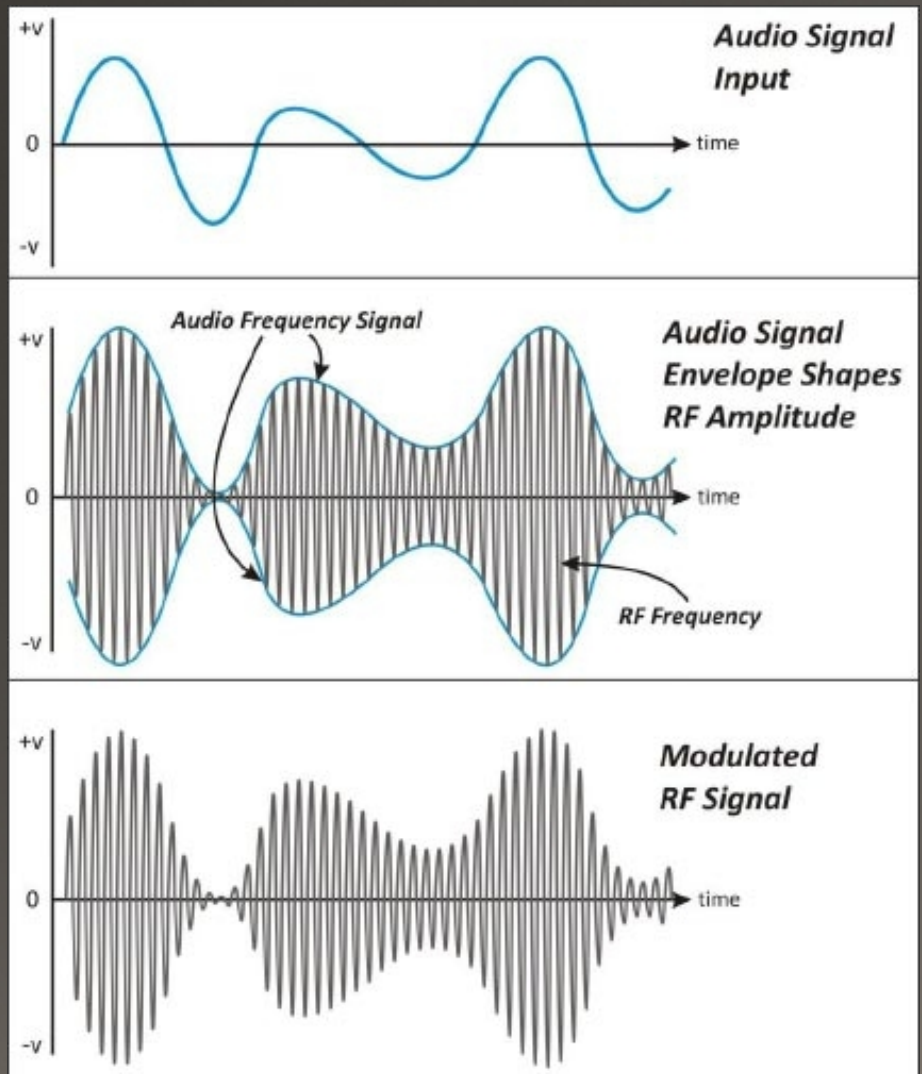
# Mikser ve Yerel Osilatör

- Yerel osilatör belirli bir frekansta referans bir sinyal üretir ve mikser de bunları konvüle eder.





- d) Karıştırıcıdan çıkan ara frekans sinyali yeniden yükseltilir. Yükseltmenin büyük bir kısmı burada yapılır. Etkin band genişliğini bu AF yükselteci belirler. AF çıkış voltajı (sinyal), gelişigüzel module edilmiş  $V_{AF}$  frekanslı bir taşıyıcı dalgaya benzer .
- e) Sinyal sonra redresörde düzeltilir, yani **rektifiye** edilir. Bir redresörde çıkış DC voltajı, giriş voltaj genliğinin karesi ile doğru orantılıdır. Görüleceği gibi redresörde yapılan işlem, Fourier katsayılarının mutlak değerinin karelerini ( $=|A_{\tau}(v)|^2$ ) bulma işlemine karşılık gelmektedir.



f) Alıcıda daha sonra bir algılayıcıda üretilen düşük frekanslı gürültü voltajını süzmek için bir süzgeç olabilir. Bunun yerine uzun bir zaman sabiti kullanılabilir. Daha sonra bir integre edici bölüm bulunabilir : bu gözlenen sinyali, önceden belirlenen bir süre için integre eder. Uygulamada bu süre (zaman sabiti) saniye düzeyindedir ve öyle ayarlanır ki çıktı gürültüsü ne çok olsun (kısa zaman sabiti) ne de bilgi kaybı olacak kadar “düz” olsun (uzun zaman sabiti).

g) Sinyal artık düzeltilmiştir; bunu kısmen elektronik devreler, kısmen çıktı ortamı, örneğin yazıcı kalemi yapar. Etkin zaman sabiti  $\tau$ ,  $(1/\Delta\nu)$  ye göre uzundur.



# DUYARLILIK

- **Sinyal-gürültü oranı :**

$S(v)$  nün denklemine göre gözlemlerden  $S(v)$  yü elde etmek için uzun bir ortalama alma zamanı gerekir. Uygulamada  $\tau$  zamanı sonlu (çoğunlukla 1-100 saniye arasında) olduğu için aynı  $\tau$  süresinde fakat farklı zamanlarda alınan  $S(v)$  değerleri birbirinden farklı olacaktır. Bu durumda kaydedici çıkışında saçılma görülecektir. Bu saçılmanın kaynağı genellikle radyo kaynağın kendisi değil, istenmeyen gürültüdür. İstenmeyen gürültü çoğunlukla şunlardan olur :

- 1) Alıcıda her zaman var olan elektronların ısısal hareketlerinden ileri gelen gürültü. Bu alıcının giriş bölümünün sıcaklığına da bağlıdır.
- 2) Tüm sıcak cisimlerin ürettiği ısısal arka alan (arkafon) gürültüsü, örneğin hava, toprak, antenler, enerji hatları v.b.
- 3) Elektrik motorları, bujiler, şimşek, Yer radyo istasyonları, radarlar, uydular gibi kaynaklardan gelen genel gürültü.



# DUYARLILIK

Bir radyo teleskop, gök cisminden gelen sinyali, yani istenen gürültüyü her türlü istenmeyen gürültüden ayırmalıdır. Bu da **sinyal / gürültü** oranına bağlıdır.

Normal radyo iletişimde, gelen sinyal alıcı gürültü düzeyinden çok yüksektir. Radyo astronomide çoğu zaman istenen sinyal alıcıda üretilen gürültünün bir kesri kadardır.

Bu durumda da sinyallerin dalga biçimlerini hemen tamamen alıcı gürültüsü belirler.

Eğer iç gürültü kararlı (yani sabit) olsaydı nabızlar halinde gelen zayıf bir sinyal bile algılanabilirdi. Fakat gürültüde düzensiz iniş - çıkışlar vardır ki bu duyarlılığı azaltır.

$S(\nu)$  için yukarıda verilen denkleme uygun olarak  $\tau$  zaman sabiti ile kaydedilen  $S$  deki değişme miktarı ne kadardır diye hesaplama yapmak istersek ;  $S$  deki değişimin ölçüsü olarak standart sapma alınarak işlem yapılabilir. Bunu  $\sigma_s$  ile gösterelim.  $\sigma_s$  şöyle hesaplanabilir :

Alıcıdaki akım,  $\Delta\nu$  frekans aralığında seçici yükseltme işleminden sonra yaklaşık yalnız  $(1 / \Delta\nu)$  kadar bir zaman için sabit genliğe ve evreye sahiptir. O halde  $(1 / \Delta\nu)$  süresi içinde  $S(\nu)$  için bir bağımsız gözlem yapıldığı varsayılabilir.  $\tau$  zamanı içinde  $n = \tau \Delta\nu$  kadar bağımsız gözlem yapılmış demektir. Başka bir ifadeyle,  $\Delta\nu$  bir saniyedeki nabız sayısını temsil ettiğine göre  $\tau$  saniyede  $(\tau \Delta\nu)$  nabız vardır. İstatistik kurallara göre,  $S$  deki standart sapma  $n^{-1/2}$  ile orantılı olmalıdır, yani

$$\frac{\sigma_s}{S} = \frac{c}{\sqrt{\tau \Delta\nu}}$$

Burada  $c$ , alıcının yapılışına bağlı ve birim komşuluğunda bir sabittir. Bu denklem radyo astronominin temel formüllerinden

birisidir. Teleskobun duyarlılığındaki sınırlamayı gösterir. Alıcıda gürültü olmasa da geçerlidir. Çünkü ölçülmesi istenen radyo sinyalin kendisi de, uzun zaman aralıkları ile gelen kısa nabızlardan oluşmuş rastgele sinyal gibidir. O halde bu formül, ortalama sinyalin yanılığını verir.

Temel sorun  $\sigma_s$  yi küçük tutmaktır, aksi durumda gök kaynağından gelen sinyal, alıcı gürültüsünden seçilemez. Şöyle ki, teleskop kaynaksız bir bölgeye yöneltilip ölçü yapılırsa yalnız alıcı gürültüsü kaydedilir :

$$\sigma(\text{alici}) = \frac{cS(\text{alici})}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

Teleskop bir kaynağı gözlerse, kaynağın seçilebilmesi için

$$S(\text{kaynak}) > \sigma(\text{alici}) = \frac{cS(\text{alici})}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

olmalıdır.

O halde ya  $S(\text{alıcı})$  çeşitli önlemlerle küçük tutulmalı ya da  $\Delta\nu$  büyük, veya  $\tau$  uzun seçilmelidir.

1 Å dalgaboyu aralığında çalışan bir optik aygıtta,  $\lambda=5500$  Å için,  $\Delta\nu=c/\lambda^2=10^{11}$  Hz dir.  $\tau = 0.1$  saniye bile olsa bu durumda  $\sigma_s/S$  çok küçüktür ( $10^{-5}$  dolayında).

Bir radyo teleskop için durum oldukça farklıdır. Çünkü  $\Delta\nu$  için mekanik güçlükler vardır, alıcıdan geçebilen frekans aralığı 1 MHz - 10 MHz komşuluğundadır.  $\tau = 100$  saniye alınırsa  $\sigma_s / S = 10^{-4}$  komşuluğunda olur.



## • İç gürültü :

İç gürültü kaynağı iki çeşittir :

1°) Antenin kendi  $T$  sıcaklığı,

2°) Alıcıdaki çeşitli dirençlerinde elektronların ısısal hareketleri

Dış alandan radyo ışınımı düşmediği zaman antende üretilen gürültünün gücü (birim zamandaki enerji)  $P_o$  olsun. Bu, antenin sıcaklığından ileri gelir ve radyo mühendisliğine göre

$$P_o = k T \Delta v$$

Burada  $k$  Boltzman sabiti,  $\Delta v$  ise alıcıdan geçebilen frekans aralığıdır. Açık olarak her türlü frekansda gürültü üretilebilir.

Ancak sinyali olumsuz etkileyen gürültü, frekansı alıcının frekans aralığına düşen gürültüdür.

Alıcının kendisinde (anten dışında) üretilen gürültü  $P_i$  olsun. Bu güç, rastgele gürültü özelliğindedir. Dolayısıyla tayfı sürekli ve istenen sinyale benzer. Bu “iç sinyal” her yükseltme evresinde üretilir ve daha sonraki evrelerde, istenen sinyalle birlikte yükseltilir.

Toplam alıcı gürültüsü  $P_o + P_i$  dir. Eğer yükseltme çarpanı  $g$  ise ( $g$ , alıcının yükseltme katsayısıdır ve KAZANÇ adını alır), çıktı aygıtı ya da kaydedici, dış sinyal olmadığı zaman,  $g(P_o + P_i)$  kadar güç alır. O halde kaydedicideki sapma bununla orantılı olacaktır.

Bu sapmayı  $S(\text{alıcı})=S_a$  ile gösterelim.

Diğer taraftan, antene düşen dış sinyalin oluşturduğu  $P$  gücünün kaydedicide meydana getirdiği  $\Delta S$  sapması da  $gP$  ile orantılı olacaktır. O halde

$$\frac{\Delta S}{S_a} = \frac{gP}{g(P_o + P_i)} = \frac{P}{P_o + P_i}$$
$$\Delta S = \frac{S_a P}{P_o + P_i}$$

Özel yöntemler ya da uzun gözlem zamanları kullanılıyorsa, sinyalin kolayca algılanabilmesi için  $\Delta S \geq \sigma_s$  olmalıdır. Yukarıda verilen  $S(\text{kaynak}) > \sigma(\text{alıcı})$  denkleminde  $\sigma_s = cS_a / (\tau\Delta\nu)^{1/2}$  olduğuna göre

$$\frac{P}{P_o + P_i} \geq \frac{c}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

*ya da*

$$P \geq \frac{c(P_o + P_i)}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

Bir radyo teleskobun anten ve iç gürültü toplamı  $P_o + P_i$ , zaman sabiti  $\tau$  ise,  $\Delta\nu$  frekans genişliğinde teleskobun algılayabileceği en küçük güç, bu  $P$  dir.

## • Gürültü çarpanı

Gürültü çarpanı denen bir kemiyet tanımlayarak yukarıdaki  $P$  ye ilişkin bağıntı başka bir şekilde yazılabilir. Bu kemiyet, (alıcının girişindeki sinyal-gürültü oranı / çıkıştaki sinyal-gürültü oranı) olarak tanımlanır. Bunu  $N$  ile gösterelim. Alıcının girişinde yalnız anten gürültüsü  $P_o$  olduğuna göre

$$N = \frac{P / P_o}{P / (P_o + P_i)} = \frac{P_o + P_i}{P_o} = 1 + \frac{P_i}{P_o}$$

$P_i$  yi çözer ve  $P_o = kT \Delta v$  kullanılırsa,

$$P_i = (N-1) P_o = (N-1) kT \Delta v$$

elde edilir. Genellikle burada  $T \sim 300 \text{ }^\circ\text{K}$  alınmaktadır. İdeal bir “gürültüsüz” alıcı için  $P_i = 0$  ve  $N = 1$  dir. Yukarıdaki ifadeden  $P_o + P_i = NP_o = N kT \Delta v$  olduğuna göre  $P$  ye ilişkin yukarıdaki bağıntı şu şekilde olur :



$$P \geq c \frac{NkT\Delta\nu}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

Eğer  $\nu$  frekansında birim frekans aralığındaki gücü  $P_\nu$  ile gösterir ve  $P = P_\nu d\nu$  konursa,

$$P_\nu \geq c \frac{NkT}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

elde edilir. Görüleceği gibi bu bağıntıdaki gürültü çarpanı  $N$  ne kadar küçükse o kadar zayıf sinyal algılanabilir. Yani alıcı çok “sessiz” ise algılama sınırını yalnız dış gürültü belirler.

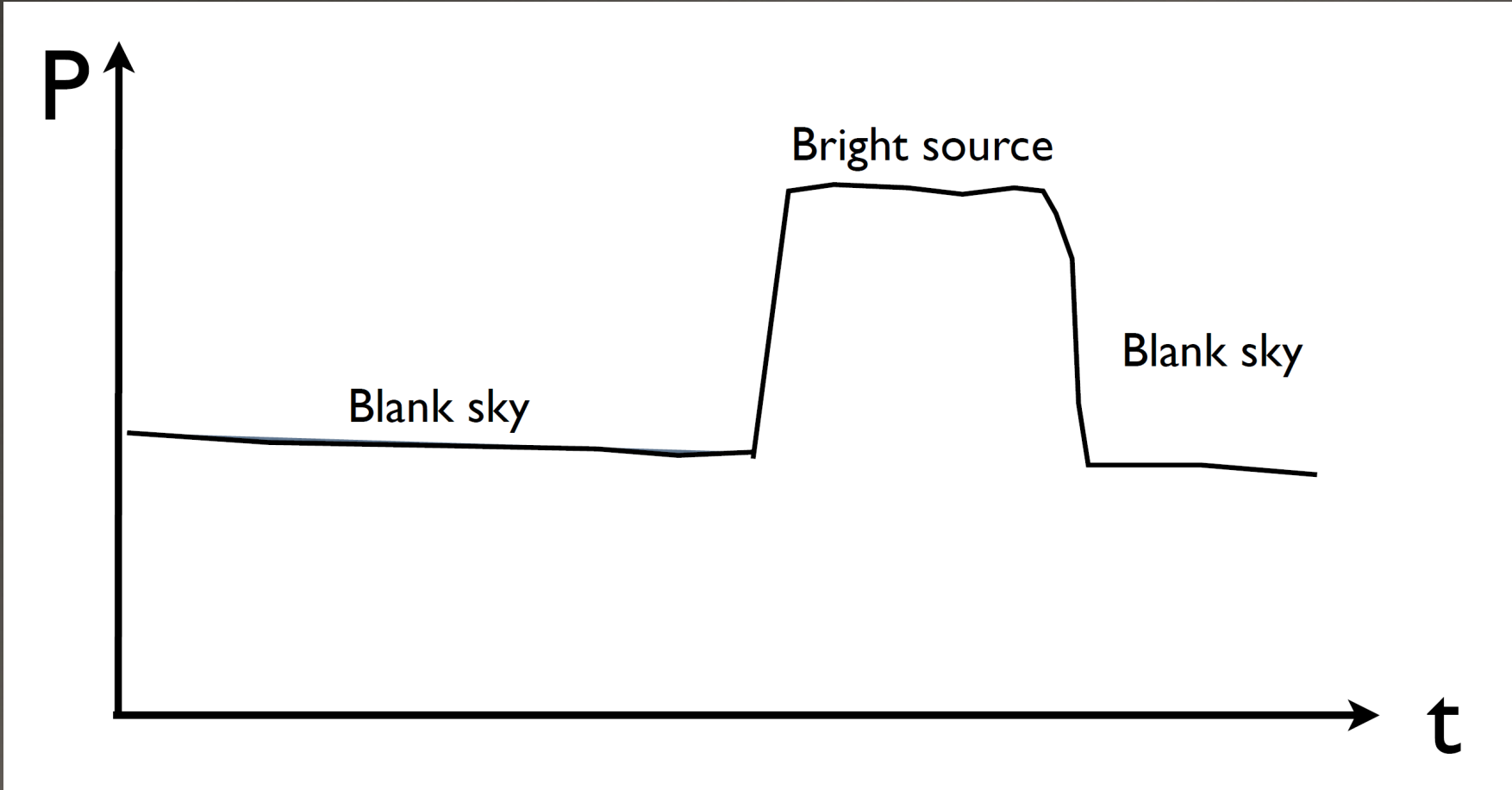
İyi alıcılarda, metre-desimetre dalgaboyları aralığında  $N$ , 3 ile 10 arasında, santimetre aralığında ise 5 ile 10 arasındadır.  $T$ , antenin çevre sıcaklığı olduğuna göre  $T \approx 300$  °K alınabilir.  $\Delta\nu = 1$  MHz,  $\tau = 100$  saniye,  $N = 5$  alır ve  $k = 1.4 \times 10^{-16}$  erg (°K)<sup>-1</sup> koyarak gözlenebilecek en küçük güç için  $P_\nu \geq 2 \times 10^{-17}$  erg değeri elde edilir.  $P = P_\nu \Delta\nu$  olduğundan gücü  $P = 2 \times 10^{-11}$  erg s<sup>-1</sup> olan sinyal böyle bir teleskopla algılanabilir.

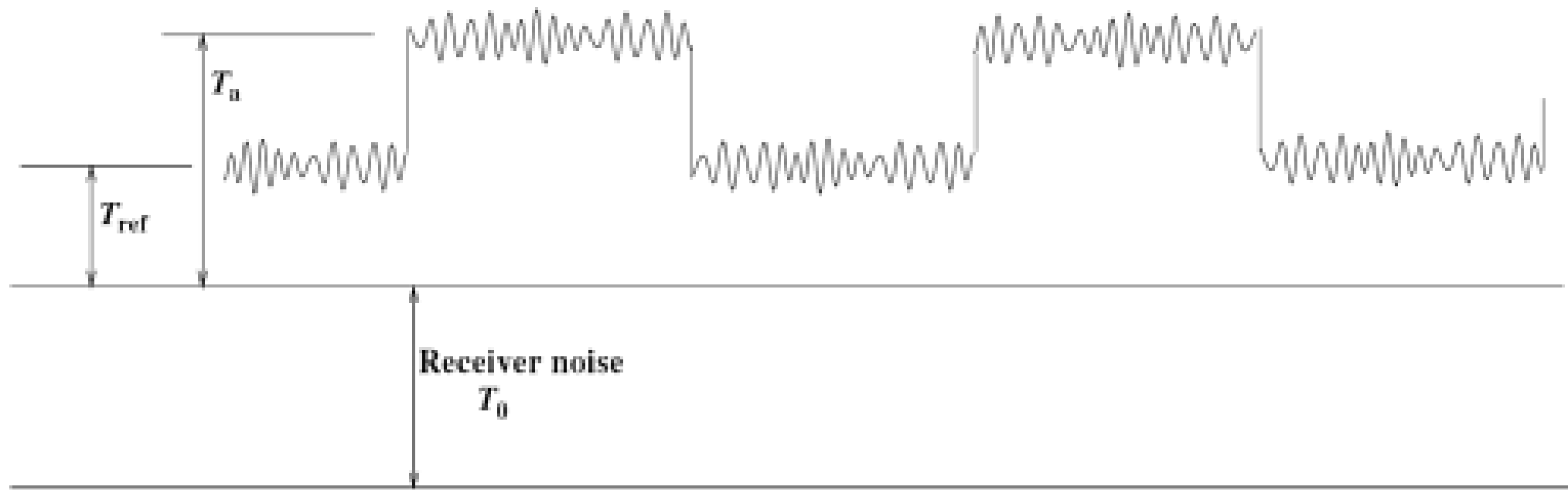
Bu, tüm paraboloid antene verilen enerjidir. **Bunu antenin alanına bölersek, antenin duyarlılığı hakkında bir fikir edinilebilir.** 30 m çapında bir paraboloid antenin “görebileceği” en küçük sinyal  $10^{-17} - 10^{-18}$  erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> olur. Optik bölgede bu, görünen parlaklık 30 kadire karşılık gelir. Bu da en büyük optik teleskopla algılanabilecek en sönük yıldızdan 7 kadir daha sönüktür.

- **Anten Sıcaklığı :** Bir radyo teleskobun duyarlılığı, algılanabilecek en küçük sıcaklık değişimi cinsinden de ifade edilebilir. Tanım olarak  $P = P_v \Delta\nu = kT_a \Delta\nu$  olduğuna göre yukarıda verilen bir önceki denklem

$$\Delta T_a \geq c \frac{NT}{\sqrt{\tau} \Delta\nu}$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\Delta T_a$ , anten sıcaklığında algılanabilecek en küçük değişimdir.  $T \approx 300$  °K,  $c \sim 1$  ve  $N = 3 - 10$  arasında olduğuna göre algılanabilecek en küçük sıcaklık değişimi,  $\Delta\nu = 1$  MHz ve  $\tau = 100$  saniye için 0.06 °K ile 0.2 °K arasındadır.







# System Temperature

= total noise power detected, a result of many contributions

$$T_{sys} = T_{ant} + T_{rcvr} + T_{atm}(1 - e^{-\tau a}) + T_{spill} + T_{CMB} + \dots$$

Thermal noise  $\Delta T$   
= minimum detectable signal

$$\Delta T = k_1 \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta \nu \cdot t_{int}}}$$

# Atmospheric opacity

- The amount of absorbed radiation depends upon the number of absorbers along the line of sight



where  $\tau$  is the optical depth and  $z$  is the angle from zenith.