مبادئ الرادار

مؤتمن ميرغني دفع الله

أكاديمية كرري للتقانة

الطبعة الأولى 2006 م

طباعة جي تاون - الخرطوم

المحتويات

6- معالجة البيانات الرادارية

7- مرسلات الرادار

تمهيد

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله وحده والصلاة والسلام على من لا نبي بعده . انطلاقاً من أهمية الرادار في المجالات الهندسية المدنية والعسكرية منها ، أُقدم كتابي هذا كأول كتـاب مـن نوعه باللغة العربية في نظرية ومبادئ أنظمة الرادار بالسـودان راجيـاً مـن الله العزيز أن يكون أحد دعامات المعرفة والتقانة الحديثة بالبلاد .

هذا وقد بدأت التفكير في كتابة الكتاب بعد أن قمـت بتـدريس بعـض المـواد المرتبطة بأنظمة الرادار خلال الثماني سنوات الماضية بكل مـن كليـة الهندسـة والكلية الفنية بأكاديمية كرري للتقانة وكلية الهندسة بجامعة السودان وإشرافي على بعض الأطروحات المقدمة من الطلاب . فقد لمست الحاجة الماسـة مـن جانـب الطلاب لوجود مرجع شامل ومبسط باللغة العربية يقود الطالب إلـى فهـم أسـس ومبادئ الرادار .

كما لمست ذلك أيضاً من خلال تعاوني مع مهندسي وفني الرادار في كـل مـن الدفاع الجوي بالقوات المسلحة والطيران المدني والتصنيع الحربي ، حيث أدركت مدى احتياج المقدِم على العمل بالرادار إلى جرعة نظرية أولية كافية قبل أن يبـدأ مزاولة عمله بالتشغيل أو الصيانة . نفس الأمر لا شك ينطبق علـى كثيـر مـن القطاعات الأخرى والتي تستخدم الرادار في مجالات الاستطلاع والملاحة والتوجيه وشتى مجالات هندسة وعلوم الطيران والبحرية . ولا يخفى على أحد الدور الكبير لتلقي العلوم باللغة العربية اللغة الأم والذي يزيد مـن معـدل التحصـيل وينمـي المقدرات ويمهـد للتطور التقني المنشود .

اعتمدت كثيراً في مادة هذا الكتاب على ملخصات المواد التي قمـت بتدريسـها وعلى الأطروحة التي قدمتها لنيل درجة الماجستير بجامعة الخرطوم إضافة إلـى عدد من المراجع المختلفة في مجال الرادار . كما حاولت استصحاب كثيـر مـن المعرفة والخبرة التي اكتسبتها بعون الله خلال فترات عملي مع الأخوة في القوات

المسلحة والطيران المدني حيث لم يبخل علي الأخوة بما لـديهم مـن معلومـات ومصطلحات فنية أفادتني في ترجمة كثير من المصطلحات المستخدمة في الرادار.

يحتوي الكتاب على تسعة أبواب تشتمل إلى جانب المادة المراد شـرحها علـى بعض الأسئلة والتمارين المفيدة . يعتبر أول باب مقدمة أو مدخل إلى الرادار يـتم فيه التطرق إلى فكرة عمل الرادار وخواصه العامة مع عرض مختصـر لـبعض أنواعه وتطبيقاته مصحوبة ببعض الصور للتعريف ببعض الأنظمة المطبـقة فـي الواقع . بينما يركز الباب الثاني على التحليل الرياضي لخواص الـرادار العامـة ممثلة في المدى الأقصى والعوامل المؤثرة به سواء المتعلقـة بنظـام الـرادار أو المحيطة به .

ينتقل الباب الثالث للتطرق لنظام الرادار من حيث التركيب العام وشرح الوحدات المكونة للنظام ووظائفها دون التعمق في تركيب الدوائر الإلكترونية . يركز البابان الرابع والخامس على طرائق معالجة الإشارة الرادارية المتبعة لتحسين أداء النظام وظيفياً من حيث رفع معدل كشف الأهداف وتقليل آثار العوامل السالبة المحيطة به في حين يركز الباب السادس على استخدام التقنيات الرقمية الحديثة فـي معالجـة بيانات الرادار .

نجد أن البابين السابع والثامن يغوصان في بعض تفاصيل الـدوائر الإلكترونيـة لنظامي الإرسال والاستقبال بالرادار والتقنيات المختلفة المستخدمة في بنائهما . أما الباب التاسع والأخير فهو يتعلق بشرح مبدأ عمـل أنظمـة التعـارف العسـكرية والرادار الثانوي المدني والتي أحسست بضرورة التطرق إليها لقلـة المعلومـات المتوفرة عنها وللتطور المطرد الذي تشهده .

أود أن أشكر بعد الله سبحانه كل من ساهم في هذا الكتاب بصـورة مباشـرة أو غير مباشرة وأخص بالشكر الزملاء بأكاديمية كرري للتقانة وبالتصـنيع الحربـي والقوات المسلحة والطيران المدني . أجزل الشكر موصول إلى كل من أسـاتذتي الأجلاء أ.د. محمد علي حمد عباس أستاذ الاتصالات بجامعة الخرطوم ، د. الأمين

الحسين عميد كلية الهندسة بأكاديمية كرري للتقانة ، د. عبد الرحيم محمـد حمـد ساتي رئيس قسم الهندسة الكهربائية والحاسوب بكلية الهندسة بأكاديميـة كـرري للتقانة وذلك لاهتمامهم البالغ بهذا الكتاب حتى يرى النور . شكري العميق لزميلي العزيز أحمد عوض أحمد بابكر أستاذ الرادار بكلية الهندسة بأكاديمية كرري للتقانة للجهد الكبير الذي قام به في مراجعة هذا الكتاب وعلى تعليقاته النيرة . كما أشـكر تلميذي النجيب محمد بابكر الجيلي الذي قام بمراجعة شاملة للكتاب .

كذلك لا يفوتني شكر أفراد أسرتي الصغيرة لما وفّروا لي مـن وقـت وعنايـة لإنجاز هذا العمل الذي نسأل الله أن ينفع به البلاد والعباد . وأخيراً أرجو من كـل من قرأ هذا الكتاب أن يدعو لنا الله أن يظـلّنا بظـله يوم لا ظـل إلا ظـله .

مؤتمن ميرغني

الاختصارات

ACP	Azimuth Clock Pulse
ADC	Analog-to-Digital Converter
ADT	Automatic Detection and Tracking
AFC	Automatic Frequency Control
AGC	Automatic Gain Control
AM	Amplitude Modulation
ATC	Air Traffic Control
ATR	Anti Transmit-Receive
BPF	Band Pass Filter
B/W	Black and White
CA	Civil Aviation
CFA	Crossed Field Amplifier
CFAR	Constant False Alarm Rate
CFD	Crossed Field Device
COHO	Coherent Oscillator
CRO	Cathode Ray Oscilloscope
CRT	Cathode Ray Tube
CW	Continuous Wave
DAC	Digital-to-Analog Converter
DSP	Digital Signal Processing
FAR	False Alarm Rate
FET	Field Effect Transistor
FPF	False Plot Filter
FTC	Fast Time Constant
GEN	Generator
GTC	Gain Time Control
HPF	High Pass Filter
IAGC	Instantaneous AGC
ICAO	International Civil Aviation Org
ICBM	Intercontinental Ballistic Missile
IFA	Intermediate Frequency Amplifier
IFF	Identification Friend or Foe
ISLS	Interrogator Side-lobe Suppression
LAN	Local Area Network
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LPF	Low Pass Filter
LSB	Least Significant Bit or Byte
LTA	Local Track Averaging
LVA	Large Vertical Aperture
MDS	Minimum Detectable Signal
MIX	Mixer
MF	Matched Filter
MOD	Modulator
MSB	Most Significant Bit or Byte
MTD	Moving Target Detection
MTI	Moving Target Indication
MTBF	Mean Time Between Failures

MTTR Mean Time To Repair
OTH Over-the-horizon
OOP Object-Oriented Programming
Pfa Probability of False Alarms
PFN Pulse Forming Network
PLL Phase Locked Loop
PPI Plan Position Indicator
PRF Pulse Repetition Frequency
PRI Pulse Repetition Interval
PSD Phase Sensitive Detector
PSR Primary Surveillance Radar
RAM Random Access Memory
RCM Remote Control & Monitoring
RCP Range Clock Pulse
RCS Radar Cross Section
RDE Radar Data Extractor
RDP Radar Data Processor
RFA Radio Frequency Amplifier
ROM Read Only Memory
RPM Revolution Per Minute
RSL Reduced Side Lobe
RSP Radar Signal Processor
RSR Reverse-switching Rectifier
RX Receiver
SAM Surface-to-Air Missile
SAR Synthetic Aperture Radar
SAW Surface Acoustic Wave
SCR Silicon-Controlled Rectifier
SIF Selective Identification Feature
STALO Stable Local Oscillator
STC Short Time Constant
SSR Secondary Surveillance Radar
TR Transmit-receive
TX Transmitter
TWS Track-while-scan
TWT Traveling Wave Tube
VAMP Video Amplifier
VCO Voltage-Controlled Oscillator

الرمـوز

A_p	Antenna Aperture	N_o	Noise Density
A_v	Amplifier Voltage Gain	nm	Nautical Mile
B	Bandwidth	P_{av}	Average Power
c	Speed of Light	P_{den}	Power Density
DC	Direct Current	P_{peak}	Peak Power
D.C.	Duty Cycle	pps	Pulse Per Second
dB	Decibel	P_d	Probability of Detection
dBm	Decibel to a Milli-Watt	P_{fa}	Probability of False Alarm
dBW	Decibel to a Watt	P_r	Received Power
E_d	Magnetron Hartree Voltage	P_t	Transmitted Power
E_t	Transmitted Energy	P_{tx}	Transmitter Power
f	Frequency	R	Slant Range
f_d	Doppler Frequency Shift	$R(\tau)$	Autocorrelation Function
G	Antenna Gain	S_{min}	Minimum Detectable Signal
G_m	Tube Trans-conductance	SCR	Signal-to-clutter Ratio
$H(f)$	Transfer Function	SNR	Signal-to-noise Ratio
h(t)	Impulse Response	T	Pulse Repetition Interval
k	Boltzman's Constant	T_d	Time Delay Elapsed
K	Klystron Factor	T_o	Absolute Temperature
knot	Nautical Mile per Hour	T_s	Sampling Period
n	Positive Integer Number	v	Velocity
ñ	Number of Pulses	V_a	Anode Voltage
N	Noise Average Power	V_A	Anode Supply Voltage
N_F	Noise Figure	v_B	Blind Speed

V_g	Grid Voltage	θ_B	Antenna Beamwidth
v_r	Relative Velocity	λ	Wavelength
XOR	Exclusive OR	μ	Permeability
α	Alpha Constant	π	pi Constant
β	Beta Constant	σ	Radar Cross-Section
β	Phase Constant	τ	Pulse Duration
δ_r	Range Resolution	ω	Angular Frequency
ε	Permittivity	Φ	Phase Angle
η	Efficiency	Ω	Antenna Angular Speed

الباب الأول

مقـدمة

1-1 فكرة عمل الرادار

يصنف الرادار كواحد من أهم المجسات Sensors المستخدمة للكشف عن الأجسام التي غالباً ما تصعب رؤيتها بالعين المجردة أو بمجسات الرؤية البصرية العادية إمـا بسبب بعدها الشـديد أو لتواريها خلف الموانع الطبيعية والصناعية أو بسبب الظلام أو الغمام .

يعمـل الرادار على إرسال إشارات موجات كهرمغنطيسية عبر الهواء واستقبال الإشارات المنعكسة من الأجسام المادية الموجودة داخل مجال عمله . تعتمد قوة الإشارة المنعكسة على حجم الجسم المادي العاكس وطبيعة المادة المكونة له وبعده من الرادار . تسمى الأجسام التي تم تصميم نظام الرادار لرصدها بالأهداف ، والتي قد تكون أجساماً طائرة كالطائرات والصواريخ أو على سطح الأرض كالسفن والمركبات الأرضية أو تحت سطح الأرض كالألغام المدفونة بباطنها .

إلى جانب استخدامه للكشف عن الأهداف المطلوبة فإن الرادار يستخدم لقياس مدى أو بعد الهدف المرصود . لذلك فإن الاسم المتداول للرادار Radar قد جاء من الكشف وقياس المدى بالرادي ***RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging* . هذا وقد تم ابتكار الرادار أثناء الحرب العالمية الثانية في ثلاث دول هي بريطانيا ، الولايات المتحدة وألمانيا بتقنيات ومسميات مختلفة .

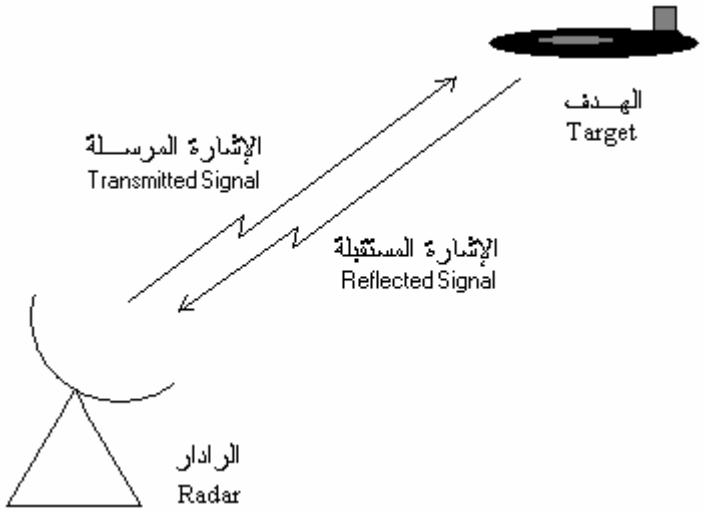
تعتمد فكرة قياس المـدى بالرادار على مبدأ ثبات سرعة الموجات الكهرمغنطيسية عبر أي وسط معين والتي تعتمد فقط على الخواص الكهربائية والمغنطيسية لذلك الوسط وتعادل

$$c = 1 / \sqrt{\mu \varepsilon} \qquad 1\text{-}1$$

حيث μ السماحية المغنطيسية للوسط Permeability ، ε النفاذية الكهربية للوسط Permittivity ومقدار تلك السرعة في الهواء حوالي 3×10^8 m/s . يقوم الرادار بحساب زمن ذهاب الموجة المرسلة منه وإياب الموجة المستقبلة إليه بعد انعكاسها من سطح الهدف ومن ثم يتم إيجاد مـدى الهدف تبعـاً للعلاقـة الرياضية

$$R = c\, T_d / 2 \qquad 1\text{-}2$$

حيث T_d الزمن الكلي الذي قطعته الموجة من الرادار إلى الهدف ثم إلى الرادار . جاءت القسمة على اثنين بالمعادلة بغرض حساب المدى في اتجاه واحد لرحلة الموجة .



الشكل 1-1 إشارات الرادار

نجد أن فكرة قياس المدى بواسطة الرادار هي نفسها التي يستخدمها الوطواط لقياس المـدى وبدقة عـالية ولمسافات قصيرة تحتاج لسرعة ودقة عاليتين في الحساب . كما أن هنالك عدد من الأنظمة الإلكترونية المشابهة للرادار تستخدم نفس مبدأ العمل مثل نظام السونار Sonar ، من الملاحة وقياس المدى بالصوت ***SO****und* ***N****avigation* ***A****nd* ***R****anging* ، والذي تستخدمه السفن والغواصات لقياس عمق البحر ومدى الأجسام تحت سطحه . يستخدم السونار الموجات الصوتية بدلاً من الموجات الكهرمغنطيسية وذلك لصعوبة انتشارها عبر الماء لمسافات بعيدة بسبب التوهين العالي الذي تلاقيه ، لا سيما في مياه المحيطات والبحار شديدة الملوحة .

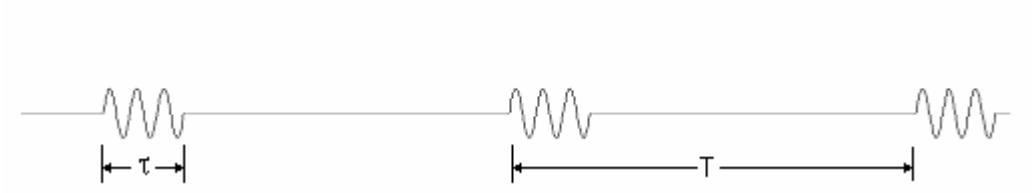
بالإضافة لاستخدام الرادار لقـياس المدى ، يمكن قياس زاوية سمت الهدف Azimuth Angle أو اتجاهه من موقع الرادار وزاوية ارتفاعه Elevation Angle من مستوى الرادار . عادة ما يستخدم الرادار هـوائياً ذا اتجاهية عالية يعمل على إشعاع الموجات المرسلة وتركيزها في نطاق ضيق يمـكن من تحديد اتجاه الشعاع بدقة وبالتالي استقبال الموجات المنعكسة من الأهداف الموجودة في ذلك الاتجاه فقط دون غيرها .

يقوم الرادار بمسح مجال عمله لرصد كل الأهداف الموجودة به وذلك بتحريك شعاع الهوائي الضيق بصورة مستمرة ويؤخذ اتجاه شعاع الرادار لحظة رصد الهدف كزاوية اتجاه أو ارتفاع لذلك الهدف . يتم تحريك شعاع المسح في الفضاء بتحريك الهوائي ميكانيكياً بواسطة محرك كهربي كبير أو إلكترونياً باستخدام هوائي من نوع مصفوفة الطور Phase Array .

2-1 الرادار النبضي

يمكن أن يقوم الرادار بإرسال الموجات الكهرمغنطيسية بصورة مستمرة ، إلاّ أن ذلك يتطلب استخدام هوائيين منفصلين أحدهما للإرسال والآخر للاستقبال . يسمى ذلك النوع من الرادار بالرادار مستمر الموجة Continuous Wave Radar وله استخدامات وتطبيقات عديدة .

أكثر أنواع الرادار شيوعاً لا سيما في نظم الاستطلاع بعيدة المدى هو الرادار النبضي Pulse Radar والذي يستخدم هوائياً واحداً لكل من الإرسال والاستقبال . يتسنى ذلك بإرسال الموجات على شكل نبضات متتالية بصورة دورية ، لكل منها فترة زمنية قصيرة جداً مقارنة بالزمن الدوري بين كل نبضة وأخرى كما بالشـكل 2-1 أدناه . لذلك فإن الرادار النبضي يكون في حالة إرسال أو حالة استقبال دون تقاطع زمني بين الحالتين ، ويصبح الهوائي غير مستخدم بعد إرسال النبضة وبالتالي يمكن استخدامه لاستقبال النبضات المنعكسة من الأهداف داخل مجال الرادار .



الشكل 1-2 نبضات الرادار

تعرف الفترة الزمنية للنبضة الواحدة بعرض النبضة Pulse Duration ، بينما تعرف الفترة الزمنية بين بداية كل نبضة وأخرى بالزمن الدوري أو بفترة تكرار النبضة Pulse Repetition Interval . كما تعرف النسبة بين كل من عرض النبضة وفترة تكرارها بدورة عمل Duty Cycle الإرسال والتي تُعطى بالعلاقـة

$$D.C. = \tau / T \qquad 1\text{-}3$$

حيث τ عرض النبضة ، T فترة تكرارها . يغلب استخدام مقلوب فترة تكرار النبضة والمعروف بتردد تكرار النبضة Pulse Repetition Frequency والذي يعطى بالعلاقـة

$$PRF = 1/ T \qquad 1\text{-}4$$

حتى يعمل الرادار النبضي بصورة صحيحة ، يجب أن تصل إلى الرادار نبضة الصدى Echo Pulse الناتجة عن نبضة مرسلة قبل إرسال نبضة جديدة حتى لا يحدث التباس في قياس المدى Range Ambiguity . بمعنى أن ورود نبضة صدى من هدف بعيد قد يؤدي إلى خطأ في تحديد مـداه إذ يتم حسابه كما لو كانت نبضة الصدى المستقبلة ناتجة من انعكاس لنبضة الإرسال التالية ، وبالتالي يظهر ذلك الهدف أقرب من موقعه الحقيقي .

يسمى مثل هذا الهدف هدفـاً ملتبساً Ambiguous Target أو مشـكوكاً في مـداه من الرادار [1]. يمكن حساب المدى الأقصى للرادار دون حدوث التباس في المدى بالعلاقـة

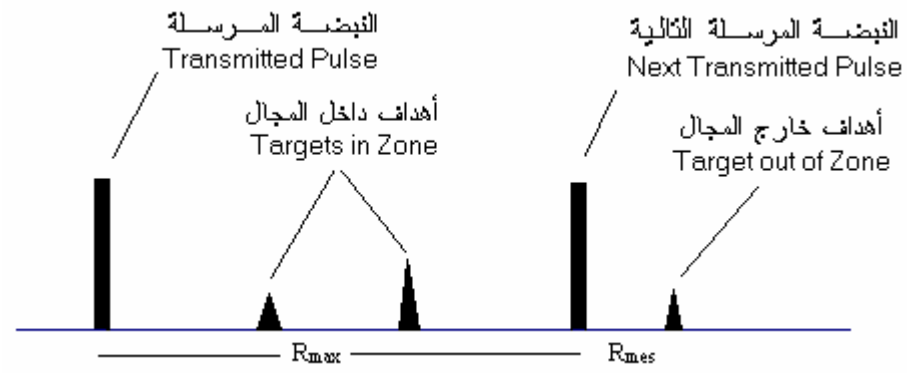
$$R_{max} = c\ T / 2 \ = c / 2\ PRF \qquad 1\text{-}5$$

نلاحظ من الشكل 1-3 أدناه أن المدى الحقيقي R للهدف الملتبس يزيد عن مـداه المقـاس بواسطة الرادار R_{mes} بما يعادل المدى الأقصى للرادار ، أو أحد مضاعفاته ، وذلك تبعاً للعلاقة التالية

$$R = R_{mes} + R_{max} \qquad 1\text{-}6$$

ترتفع دقة قياس المدى Range Accuracy للرادار بصغر الخطأ أو الفرق بين كل من القيمة الحقيقية والقيمة المقاسة لمدى الهدف . كما يعرف التمييز في المدى Range Resolution بمقدرة الرادار على التمييز بين هدفين متجاورين في المدى كهدفين منفصلين وليس كهدف واحد . تعتمد كل من الدقة والتمييز في المدى بصورة مباشرة على عرض النبضة الرادارية τ المستخدمة حيث يعطى التمييز في المدى بالعلاقـة التالية

$$\delta_r = c\,\tau / 2 \qquad 1\text{-}7$$



الشكل 1-3 الالتباس في المدى

1-3 ترددات الرادار

تتميز الأنظمة الرادارية بأنها تستخدم نطاقـاً كبيراً من الطيف الترددي يمتد ليشمل معظم الترددات الرادية RF وبعضاً من نطاق الأشعة تحت الحمراء IR .

يختلف تردد أي رادار عن آخر طبقاً لنوع وتطبيق الرادار وحسب طبيعة الأهداف المراد رصدها . بعد ظهور الرادار في أواسط القرن العشرين ، تم تقسيم

الطيف الترددي لمجموعات أو حزم ترددية Frequency Bands حتى يسهل تحديد تردد الرادار المعني . نجد أن هذه الحزم الترددية الموضحة في القائمة 1-1 قد امـتد استخدامها في مجالات أخرى غير الرادار لا سيما في مجال الأقمار الصناعية . ينحصر نطاق عمل غالبية نظم الرادار الموجودة بين الترددات العالية ونطاق الموجات الدقيقة أو المكروية Microwaves والتي تشكل الحزمة الترددية L الحزمة الدنيا منها .

Freq. Range مدى الترددات	**Frequency Band** الحزمة الترددية
30 – 300 kHz	الترددات المنخفضة Low Frequency LF
300 – 3000 kHz	الترددات المتوسطة Medium Frequency MF
3 – 30 MHz	الترددات العالية High Frequency HF
30 – 300 MHz	الترددات العالية جداً Very High Frequency VHF
300 – 1000 MHz	الترددات فوق العالية Ultra High Frequency UHF
1 – 2 GHz	الحزمة L Band
2 – 4 GHz	الحزمة S Band
4 – 6 GHz	الحزمة C Band
8 – 12.4 GHz	الحزمة X Band
12.4 – 18 GHz	الحزمة Ku Band
18 – 26.5 GHz	الحزمة K Band
26.5 – 40 GHz	الحزمة Ka Band

القائمة 1-1 الحزم الترددية

إلاّ أننا نجد أن الطيف الترددي قد تم تقسيمه لاحقاً في صورة حـزم أو مجموعات مـوجية وترددية قياسية اعتماداً على الأطوال الموجية وبحيث تبدأ كل حزمة بطول موجي محدد وتنتهي بعشر أمثاله كما بالقائمة 1-2 . بالنسبة لكل أشكال الموجات المختلفة ، نجد أن كلاً من الطول الموجي λ بالأمتار وتردد الموجة f بالهيرتز ، يرتبطان مع سرعة الموجة في ذلك الوسط c بالعلاقة التالية

$$c = \lambda f \qquad 1\text{-}8$$

الحزمة الترددية **Frequency Band**	مدى الترددات **Freq. Range**	الطول الموجي **Wavelength**	الحزمة الموجية **Wave Band**
الترددات العالية High Frequency HF	3 – 30 MHz	10 – 100	الموجات الديكامترية Decametric Waves
الترددات العالية جداً Very High Frequency VHF	30 – 300 MHz	1 – 10	الموجات المترية Metric Waves
الترددات فوق العالية Ultra High Frequency UHF	300 – 3000MHz	0.1 – 1	الموجات الدسيمترية Decimetric Waves
الترددات فائقة العلو Super High Freq SHF	3 – 30 GHz	0.01 – 0.1	الموجات السنتيمترية Centimetric Waves
الترددات بالغة العلو Extremely Hi Freq EHF	30 – 300 GHz	0.001 – 0.01	الموجات المليمترية Millimetric Waves

القائمة 1-2 الحزم الموجية والترددية القياسية

1-4 تطبيقات وأنواع الرادار

تتنوع تطبيقات الرادار في المجالين المدني والعسكري بحيث يصعب حصرها وتحديد أنواع كل الأنظمة المستخدمة لكل تطبيق منها والتي تشمل الاستطلاع والمراقبة والملاحة والتوجيه والقياسات والأغراض العلمية والاستكشافية المختلفة .

من حيث موضع الرادار يمكن تقسيم أنواعه إلى رادار أرضي يعمل على رصد الأهداف الجوية أو الأرضية ، أو رادار بحري Marine Radar تحمله السفن لرصد

الطائرات والسفن ، أو رادار محمول جواً Airborne Radar على طائرة أو قمر صناعي لأغراض الاستطلاع الجوي أو التصوير الراداري للأرض .

كذلك يمكن تحديد نوع الرادار بعدد الإحداثيات التي يمكنه قياسها كرادار ثنائي البعد Two-Dimensional 2D يقيس فقط مدى واتجاه الهدف وآخر ثلاثي الأبعاد Three-Dimensional 3D يمكنه قياس ارتفاع الهدف إضافة للمدى والاتجاه . كما يمكن تقسيم أنواع أنظمة الرادار من حيث عدد مواقع الهوائيات المستخدمة إذ نجد أن أغلب الأنواع أحادية الموقع Monostatic ، إلاّ أن هنالك بعض الأنظمة ثنائية الموقع Bistatic يوجد هوائي الاستقبال الخاص بها في موقع آخر قد يبعد عشرات الأميال من موقع هوائي الإرسال .

عادة يرسل الرادار موجته الخاصة لإضاءة الهدف ولا يحتاج إلى مصدر خارجي لذلك ويعرف في هذه الحالة برادار فعـّال Active Radar . إلاّ أننا نجد أن هنالك بعض أنواع الرادار التي تستفيد من إضاءة الهدف بواسطة مصدر آخر مستقل وبالاستفادة من الإشارات المنتشرة حول موقع الهدف من الهدف نفسه أو من المعدات القريبة منه . يسمى هذا النوع بالرادار التأثري Passive Radar ومن أمثلته الباحث الحراري المحمول على الصواريخ المضادة للطائرات والتي تعتمد في توجيهها على الحرارة المنبعثة من المحركات .

رغم كثرة تطبيقات وأنواع النظم الرادارية المستخدمة ، نعرض بعضاً من الأمثلة للنظم الأكثر انتشاراً والمستخدمة في عدد من التطبيقات المدنية والعسكرية ، بعضها ذو طبيعة عملية وبعضها الآخر ذو طبيعة بحثية أو استكشافية . أبرز تلك النظم :

- رادار الإنذار المبـكر Early Warning Radar
- رادار الاستطـلاع Surveillance Radar
- الرادار الثانوي Secondary Radar
- الرادار معـين الارتفاع Height Finder

- رادار التتـبع Tracking Radar
- رادار التوجيه Guidance Radar
- الرادار الدوبلري Doppler Radar
- رادار قياس الارتفاع Radio Altimeter
- رادار الإرصاد الجوي Meteorological Radar
- رادار الرصد الفلـكي Astronomical Radar
- الرادار اللـيزري Laser Radar
- رادار المنفذ المركب Synthetic Aperture Radar
- رادار فوق الأفـق Over-the-horizon Radar

5-1 أمثلة لأنظمة راداريّـة

في نهاية هذا الباب نستعرض بالصور أمثلة لبعض الأنظمة الرادارية المستخدمة في عدة أنحاء من العالم في مختلف المجالات المدنية والعسكرية ولتطبيقات وترددات متنوعة مع ذكر بعض المواصفات العامة لكل نظام وذلك حتى يتيسر للقارئ الربط بين كل من الدراسة النظرية والواقـع .

الشكل 1-4 رادار الإنذار المبكر Cobra Dane

الشكل 1-4 أعلاه يوضح صورة لرادار الإنذار المبكـر طويل المدى المسمى Cobra Dane ، والذي يستخدم للكشف والتتـبع الدقيق للصواريخ الباليستية عابرة القارات ICBM . يلاحظ من الصورة الحجم الضخم للهوائي من نوع مصفوفة الطور والمثبت على مبنى وباتجاه معين .

الشكل 1-5 أدناه يعرض صورة لرادار الاستطـلاع العسكري 1L117 والذي يعمل في النطاق الدسيمتري . وهو رادار ثلاثي الأبعـاد يستخدم هوائيـين على شكل الحرف V لتشكيل الشعاع المطلوب لحساب ارتفاع الهدف ويدوران باستمرار لمسـح المنطقة المحيطة بالرادار . تتميز مثل هذه الأنظمة بمقدرتها على العمل المتواصل واستخدامها لعـدة ترددات تمكنها من مكافحة التشويش .

الشكل 1-5 رادار الاستطلاع 1L117

يبين لنا الشكل 1-6 صورة لرادار الاستطـلاع المدني Utes-T الذي يستخدم للتحكم بالحركة الجوية Air Traffic Control لرصد الطيران العابر وتوجيهه في المسارات الجوية الصحيحة ومساعدة الطائرات في الإقلاع والهبوط بالمطارات . الصورة بالشكل 1-7 توضح رادار توجيه الصاروخ المضاد للصواريخ باتريوت Patriot (SAM-D [3] سابقاً) ، وهو رادار قابل للحركة تم تصميمه لكشف وتتبـع الصواريخ الباليستية التكتيكية متوسطة المدى مثل الصاروخ سـكود Scud .

الشكل 1-6 رادار الاستطلاع Utes-T

الشكل 1-7 رادار توجيه الصاروخ باتريوت Patriot

يبين الشكل 1-8 أدناه رادار يعمل على تحديد مواقع المدافع الأرضية لا سـيما مدافع الهاون Mortar وذلك برصد القذيفة المنطلقة مـن المـدفع أثنـاء طيرانهـا وحساب مسارها لإيجاد موقع المدفع أو لتصحيح الخطأ في التصويب.

الشكل 1-8 رادار تحديد مواقع المدافع

الشكل 1-9 أدناه يعرض صورة لنظام الإنذار المبكر والتحكم المحمول أواكـ س AWACS . من المعتاد أن يحمل هذا النظام على طائرة من طراز Boeing 707 مخصصة للأغراض العسكرية . نسبة للارتفاع الكبير لمثل هذه المنظومة فهي تغطي مجالاً جوياً وأرضياً عريضاً مقارنة بالرادار الأرضي .

الشكل 1-9 نظام أواكس AWACS

يبين الشكل 1-10 أدناه صورة لسـفينة حربية تحمل أكثر من رادار بحري مثل رادار الاستطلاع لرصد كل من الطائرات والصواريخ والسفن ورادار التوجيه لإرشاد الصواريخ المضادة للطائرات .

الشكل 1-10 رادار بحري

أسـئلة وتمارين

1- قارن بين كل من الرادار النبضي والرادار مستمر الموجة مع توضيح شكل إشارات كل منهما وذكر مزايا كل منهما على الآخر .

2- رادار نبضي عرض نبضته المرسلة 1.6μs وتردد تكرارها 300 pps ، أوجد دورة عمل مرسله .

3- في السؤال السابق أوجد كل من دقة قياس المدى والمدى الأقصى للرادار .

4- هدف يبعد عن رادار 600km ظهر بشاشته على بعد 150km ، أوجد تردد تكرار نبضة ذلك الرادار .

5- رادار تردد مرسله 2.7GHz ، حدد حزمته الترددية بإتباع كل من طريقتي تقسيم الحزم الترددية المتداولتين .

6- تحدث عن فائدة كل من الرادار فوق الأفق OTH ورادار المنفذ المركب SAR المستخدم في التصوير الجوي والفضائي .

الباب الثاني

معادلة الرادار

2-1 المدى الأقصى للرادار

توجد عـدة مقاييس مستخدمة في تحديد مواصفات الرادار الهندسية والوظيفية مثل التردد والكفاءة والاستمرارية ودقة القياس والمقدرة على مقاومة التشويش . ولكننا نجد أن المدى الأقصى للرادار من حيث الكشف يعتبر من أهم مواصفات الرادار الوظيفية ، لا سيما بالنسبة لأنظمة رادار الكشف والاستطلاع والإنذار المبـكر .

توجد عدة معادلات تستخدم لتحليل ودراسة أداء الرادار أهمها معادلة المدى الأقصى للرادار والتي تعرف اختصاراً بمعادلة الرادار . تساعد معادلة الرادار على تقدير مدى الرادار بصورة نظرية اعتماداً على كل من القدرة المرسلة ، حساسية الاستقبال ، كسب الهوائي والطول الموجي للرادر بالإضافة إلى خواص الهدف المرصود .

لإيجاد المعادلة من المبادئ الأولية ، نفترض أن الرادار يشع موجاته في جميع الاتجاهات بنفس المستوى . كثافة القدرة Power Density عند أي نقطة تبعد R من موقع الرادار بدلالة القدرة الكلية المرسلة P_t تعـادل

$$P_{den} = P_t / A = P_t / 4\pi R^2 \qquad 2\text{-}1$$

حيث تتوزع القدرة على سطح كرة وهمية نصف قطرها R . نلاحظ أن كثافة القدرة تنخفض إلى الربع عند مضاعفة المدى تبعاً لقانون التربيع العكسي للمسافة .

كما سبق وأشرنا في الباب الأول ، فإن هوائي الرادار عادة يكون اتجاهياً Directive يعمل على تركيز شعاع الإرسال في اتجاه محدد ليصبح ضيقاً فيتيح الحصول على دقة عالية في قياس زاوية الهدف ويزيد من كثافة القدرة في ذلك

الاتجاه . إذا كان معامل كسب الهوائي الاتجاهي Directive Gain والذي يزيد بصغر زاوية الشعاع يعادل G ، فإن كثافة القدرة عند النقطة أعلاه تصبح

$$P_{den} = G P_t / 4\pi R^2 \qquad 2\text{-}2$$

إذا كان هنالك هدف عند تلك النقطة ، فإن القدرة الكلية الساقطة على سطح ذلك الهدف تعتمد على مساحة سطحه المؤثرة في اتجاه الموجة σ وتعادل

$$P_i = \sigma P_{den} = G P_t \sigma / 4\pi R^2 \qquad 2\text{-}3$$

وإذا ما تمكنت كل القدرة الساقطة على الهدف من الانعكاس من سطحه في كل الاتجاهات بالتساوي ، فإن كثافة القدرة المنعكسة تعادل عند موقع الرادار

$$P_{r\,(den)} = P_i / 4\pi R^2 = GP_t\sigma/(4\pi)^2R^4 \qquad 2\text{-}4$$

وبما أن القدرة الكلية الساقطة على الهوائي تتناسب طردياً مع مقدار مساحة منفذ الهوائي Antenna Aperture ، لذا فإن القدرة المستقبلة بواسطة هوائي الرادار P_r تعادل

$$P_r = P_{r\,(den)} A_p = GP_tA_p\sigma/(4\pi)^2R^4 \qquad 2\text{-}5$$

حيث A_p مساحة منفذ الهوائي والتي ترتبط بمعامل كسبه وطول الموجة المستخدمة بالعلاقة التالية والمأخوذة من نظرية الهوائيات

$$G = 4\pi A_p / \lambda^2 \qquad 2\text{-}6$$

بالتعويض في المعادلة 2-5 تصبح القدرة المستقبلة من الهدف تعطى بالعلاقة

$$P_r = P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 R^4 \qquad 2\text{-}7$$

المدى الأقصى للرادار هو ذاك المدى الذي لا يمكن للرادار رصد أي هدف أبعد منه . يعتمد ذلك المدى على القدرة المستقبلة من الهدف والتي قد تكون صغيرة جداً بالنسبة للأهداف البعيدة عن الرادار والأهداف صغيرة الحجم ، وبالتالي يعتمد المدى على مقدرة الرادار على الإحساس بتلك القدرات المنخفضة وكشفها . يمكن التعبير عن حساسـية الرادارSensitivity بأقـل قـدرة مستقبلة يمكن للرادار

كشـفها S_{min} ، وبتعويضها في المعادلة 2-7 يصبح أقصى مدى للرادار يعطى بالمعادلة

$$R_{max} = \sqrt[4]{(P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 S_{min})} \qquad 2\text{-}8$$

2-2 مدلولات معادلة الرادار

تُعطي معادلة الرادار 2-8 تقديراً رياضياً للمدى الأقصى للرادار والذي يزيد بزيادة كل من القدرة المرسلة ، معامل كسب الهوائي ، طول الموجة ، مساحة الهدف وحساسية مستقبل الرادار . في حين يتضاءف المدى بزيادة معامل كسب الهوائي أو الطول الموجي إلى أربعة أمثالها ، فهو يحتاج إلى الزيادة بستة عشر مثل من القدرة المرسلة أو الحساسية .

إلاّ أنّنا نجد أن معادلة الرادار 2-8 قد أهملت عدداً من العوامل الطبيعية والهندسية والتي تؤثر بصورة مباشرة في تحديد مدى الرادار . لذا تعتبر تلك المعادلة إحدى الصور المبسطة لمعادلة الرادار الشاملة وتشكل أساساً لها يمكن تكملته بإضافة العوامل المؤثرة الغائبة .

أول عامل طبيعي لم يرد ذكره في المعادلة هو التوهين Attenuation الذي تعانيه الموجات الكهرمغنطيسية في طريقها من وإلى الرادار . ينشأ التوهين نتيجة لامتصاص جزيئات الغلاف الجوي للطاقة من الموجة أثناء انتشارها فيه ويزيد بزيادة التردد وزيادة كثافة كل من بخار الماء والسحب والغبار . نلاحظ الأثر المتزايد لزيادة الطول الموجي في زيادة مدى الرادار لتناسبه العكسي مع التردد بالإضافة لتأثيره الماثل من المعادلة 2-8 أعلاه . لذلك نجد أن الأنظمة الرادارية بعيدة المدى تميل لاستخدام ترددات منخفضة نسبياً .

من العوامل المؤثرة في مدى الرادار كذلك الضوضاء بأشكالها المختلفة الطبيعية والصناعية والتي عادة ما تصاحب الإشارة المستقبلة من الهدف ويصعب التخلص منها بصورة كاملة . تؤثر الضوضاء في حساسية الرادار وبالتالي تحد من مداه حيث أن زيادة الحساسية في ظل جود الضوضاء قد يؤدي إلى ظهور ما تعرف

بالإنذارات الكاذبة ما لم تتوفر معالجة جيدة للإشارات المستقبلة . كما أن ازدياد متوسط قدرة الضوضاء عن القدرة المستقبلة من الهدف يصعب من كشفه ناهيك عن تحديد إحداثياته.

عامل ثالث مهمل في معادلة الرادار أعلاه وهو عدم استقرار نظام استقبال الرادار نفسه نتيجة لعدم استقرار مكونات الدوائر الإلكترونية بصورة كاملة مما ينشأ عنه عدم استقرار قيمة أقل إشارة مكتشفة لتغير معاملات التكبير ودوائر ضبط الترددات المختلفة .

العامل المؤثر الأخير المهمل بالمعادلة هو عدم ثبات المساحة الفعالة للهدف والتي تتغير بتغير محاور واتجاه الهدف بصورة مستمرة مما يؤثر في استقرارية القدرة المستقبلة منه . لأهمية العامل الأخير وأثره في تحديد مدى الرادار يتوالى الحديث عنه فيما يلي بالتفصيل بعون الله .

3-2 المقطع الراداري للهدف

تعرف المساحة الفعالة للهدف الواردة بمعادلة الرادار أعلاه اصطلاحاً بالمقطع الراداري Radar Cross Section ، وتختصر بالأحرف RCS . يعتمد المقطع الراداري بصورة عامة على مادة الهدف وعلى شكله الهندسي .

عند سقوط أشعة كهرمغنطيسية على أي جسم ، فإن جزءاً من الطاقة الساقطة ينعكس عند سطح الجسم (أو يعاد إشعاعه) وينفذ جزء منها عبر الجسم بينما يتم امتصاص الجزء المتبقي بواسطة جزئيات مادته ليتحول إلى طاقة حرارية مبددة . يلاحظ ذلك في حالة سقوط ضوء الشمس على الزجاج حيث ينعكس جزء من الضوء يمكّننا من رؤية الزجاج من الخارج وينفذ جزء خلاله بينما يمتص الجزء المتبقي من الطاقة والذي يرفع درجة حرارة الزجاج . تختلف حصص الطاقة لكل جزء حسب خواص مادة الجسم والتي يمكننا تسميتها اصطلاحاً بالانعكاسية ، الشفافية والامتصاصية Reflectivity, transparency and absorbability .

من قوانين الانعكاس نعلم أن زاوية الانعكاس تساوي زاوية السقوط عند أي نقطة على السطح العاكس . ترتد في اتجاه الرادار تلك الأشعة التي تسقط عمودية على سطح الهدف بينما يشتت الهدف الأشعة غير العمودية على سطحه في اتجاهات أخرى ولا تصل إلى الرادار . وبما أن الأهداف الحقيقية ليست ألواحاً مسطحة ، نجد أن أجزاء من الهدف تعكس جزءاً من الطاقة في اتجاه الرادار بينما تشتت الأجزاء الأخرى منه القسم الأكبر من الطاقة ولا يصل إلى الرادار إلاّ إذا ما تم عكسه مرة أخرى بواسطة جسم آخر .

تمت الاستفادة من أثر الشكل الهندسي للهدف في إخفاء الأهداف عن الرادار وذلك بتصميم طائرات وصواريخ ذات أشكال هندسية غير منتظمة الأسطح تعمل على تشتيت الأشعة الساقطة عليها . كما تم ابتكار مواد ذات امتصاصية عالية للأشعة الرادارية وتعرف بمواد التَسـلُل Stealth Materials تستخدم لطلاء جسـم الطائرة أو الصاروخ فينقص مقطعه الراداري ويصعب كشفه . مثال لذلك الطائرة F117 المعروضة بالشكل 2-1 والتي تعرف أيضاً باسم Stealth أو الشـبح ، والقـاذفة B2 والصاروخ الطواف من نوع توماهـوك Tomahawk .

الشكل 2-1 الطائرة F117

كذلك نجد أن المقطع الراداري للهدف يعتمد على كل من استقطاب الموجة Polarization الساقطة (أي اتجاه المجال الكهربي بها) وزاوية ميلان محور

الهدف العمودي على اتجاه انتشار الموجة . يتناقص المقطع الراداري في حال عدم توازي محور الهدف مع استقطاب الموجة إلى أن يتلاشى عند تعامدهما على بعضهما . نجد أن الاستقطاب الأفقي هو الأكثر شيوعاً في الرادار لأن جناحي الطائرات تكون أفقية في معظم الوقت حتى لا تفقد قوة رفعها . مما يجدر ذكره وجود كثير من الأنظمة تستخدم أكثر من استقطاب لزيادة المقدرة على كشف عدد أكبر من الأهداف بما يعرف بالتنوع في الاستقطاب Polarization Diversity .

نسبة للتغير المستمر في اتجاهات محاور الهدف ولعدم انتظام سطحه ، يمكن تمثيل الهدف بكرة معدنية يقع مركزها عند موقعه وتعكس قدرة تعادل القدرة المنعكسة منه . ويتضح سبب اختيار الكرة دون الأشكال الهندسية الأخرى لتساوي إسقاطها الهندسي دائري الشكل من كل الاتجاهات والذي يمثل المقطع الراداري للكرة المعدنية . يستفاد من هذا التمثيل في قياس مدى الرادار بصورة فعلية وذلك بتعليق كرة معدنية ببالون طائر ورصدها بواسطة الرادار .

تنقسم الأهداف من حيث المقطع الراداري إلى قسمين هما أهداف نقطـية Point Targets يمكن تحديد مواقعها بصورة واضحة لصغر أحجامها كالطائرات التي تطير منفردة ، وأهداف مـوزعة Distributed Targets لا يمكن تحديد مواقعها وتؤخذ مراكزها الهندسية كتقدير لموقع هدف واحد يمثل أي منها ، وهي مثل سلاسل الجبال وأسراب الطائرات المتقاربة .

2-4 طيف الإشارة الرادارية

يتضح من شكل الإشارة الرادارية المبينة بالشكل 1-2 أنها إشارة دورية لها زمن دوري ثابت يعادل فترة تكرار النبضة T . إذاً يمكن إيجاد متسلسلة فورير للتعبير عن طيف الإشارة في النطاق الترددي كمجموع إشارات جيبية Sinusoids وحيدة التردد والتي يعبر عنها رياضياً بالمتسلسلة

$$v(t) = a_o/2 + \Sigma\, a_n \cos(2\pi nt/T) + \Sigma\, b_n \sin(2\pi nt/T) \qquad 2\text{-}9$$

حيث $n = 1,2,\ldots\infty$ والعوامل a_n ، b_n يمكن إيجادها من العلاقات

$$a_n = 2/T \int v\,(t) \cos(2\pi nt/T)\, dt \qquad 2\text{-}10$$

$$b_n = 2/T \int v\,(t) \sin(2\pi nt/T)\, dt \qquad 2\text{-}11$$

لكل قيم $-T/2 \le t \le T/2$. يمكن التعبير عن إشارة النبضة الرادارية التي عرضها τ ومطالها A في النطاق الزمني بالدالة

$$v(t) = A \cos(2\pi f_c t) \qquad -\tau/2 \le t \le \tau/2 \qquad 2\text{-}12$$

$$= 0 \qquad \text{elsewhere}$$

حيث f_c تردد الموجة الجيبية الذي يعادل تردد الرادار للنبضة المرسلة أو التردد المتوسط في المستقبل . بإجراء التكاملات أعلاه للقيم $-\tau/2 \le t \le \tau/2$ نحصل على

$$a_n = A\tau/T\{\text{sinc}(\tau(f_c - n/T)) + \text{sinc}(\tau(f_c + n/T))\} \qquad 2\text{-}13$$

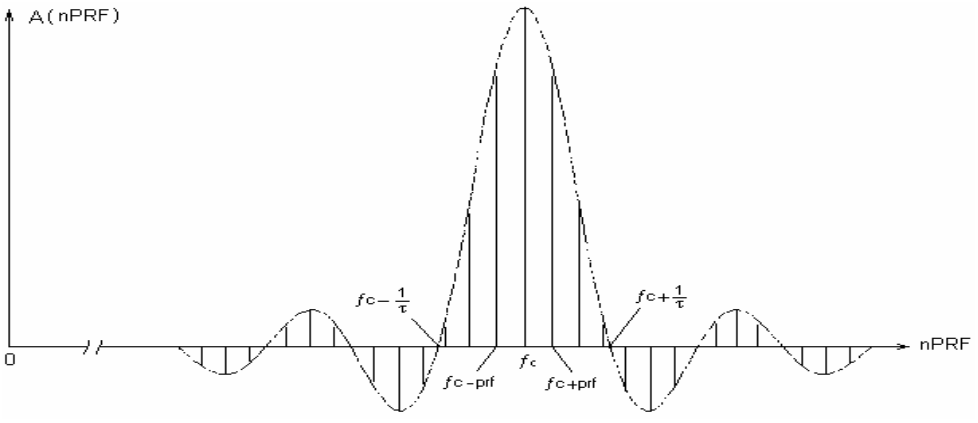
$$b_n = 0 \qquad 2\text{-}14$$

حيث $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$. يمكننا كتابة مقدار طيف مطال الإشارة بدلالة تردد تكرار النبضة PRF كما يلي

$$A(nPRF) = A\tau PRF\ \text{sinc}(\tau\,(f_c - nPRF)) \qquad 2\text{-}15$$

$$A\tau PRF\ \text{sinc}(\tau\,(f_c + nPRF)) \approx 0 \qquad 2\text{-}16$$

حيث قمنا بتجاهل الحـد الثاني لضآلة أثره مع كبر التردد . الشكل 2-2 أدناه يوضح شكل طيف مطال إشارة الرادار Amplitude Spectrum والمأخوذ من تحليل متسلسلة فورير للإشارة .



الشكل 2-2 طيف الإشارة الرادارية

5-2 أقل إشارة مكتشفة

تعرف أقـل إشارة مكتشفة بواسطة الرادار Minimum Detectable Signal وتختصر بالأحرف MDS بأنها تلك الإشارة التي تساوي قدرتها القدرة المتوسطة للضوضاء المصاحبة لها . ويأتي هذا التعريف لصعوبة تمييز إشارة الهدف وسط الضوضاء ما لم تساوي أو تزيد قدرتها عن القدرة المتوسطة للضوضاء ، إلا بإيجاد وسائل متقدمة لمعالجة الإشارة وتحسينها .

الضوضاء هي إشارات عشوائية تنتج من ظواهر طبيعية كالصواعق والبرق ومن أجرام سماوية كالشمس والنجوم الأخرى بما يعرف بالضوضاء الكونية Cosmic Noise . كما يمكن أن تنتج الضوضاء من مصادر صناعية كالمعدات الكهربية والإلكترونية المختلفة . يمكن إضافة التداخل الناتج من أنظمة الاتصالات والرادار المجاورة كنوع من الضوضاء الصناعية غير المقصودة مقارنة مع التداخل المقصود بغرض تشويش الرادار من جهات معادية بغرض تقليل مقدرة كشفه أو لتضليله وتقليل دقة قياسه .

أهم أنواع الضوضاء هي الضوضاء الحرارية Thermal Noise ، وتنتج في كل الموصلات الكهربائية والقطع الإلكترونية نسبة للحركة العشوائية للإلكترونات الناشئة عن اكتساب الطاقة الحرارية . وتمتاز الضوضاء الحرارية بطيف ترددي لا متناهي تنتشر عليه بقدرة متوسطة لها نفس الكثافة عند كل الترددات ، وتعادل

$$N = k T_o B \qquad 2\text{-}17$$

حيث k ثابت بولتزمان ويعادل 1.38×10^{-23} J/K ، T_o درجة الحرارة المطلقة ، B السعة الترددية لقناة الاستقبال والتي لا يقصد بها سعة نصف القدرة (أو سعة 3dB) المعتاد استخدامها بل تعطى بالعلاقة

$$B = \int |H(f)|^2 df \; / \; |H(f_o)|^2 \qquad 2\text{-}18$$

أي تكامل مربع مقـدار Magnitude دالة نقل القناة مقسوماً على مربع المقـدار عـند التردد الأوسط للقناة [1]. ويتضح من المعادلة 2-17 التناسب الطردي للقدرة

المتوسطة للضوضاء الحرارية مع السعة الترددية والتي يصعب تقليلها بصورة كبيرة بدون تشويه إشارات الرادار ذات النبضات الضيقة والنطاق الترددي العريض الموضح بالشكل 2-2 .

تعرف نسبة الإشارة إلى الضوضاء Signal-to-noise Ratio على أنها النسبة بين قدرة الإشارة المستقبلة المطلوبة والقدرة المتوسطة للضوضاء المصاحبة لها ، أي

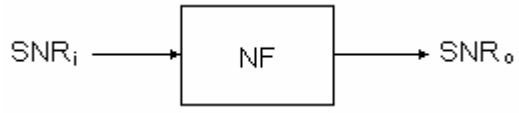
$$SNR = P_r / N \qquad 2\text{-}19$$

وتعادل بوحدة الديسيبل Decibel

$$SNR = 10 \log_{10} (P_r / N) \qquad dB \qquad 2\text{-}20$$

بالنسبة للإشارات تعبر نسبة الإشارة إلى الضوضاء عن الضوضاء المصاحبة ، أمـا بالنسبة للأنظمة فإنه يقاس مقدار ما يضيفه النظام من ضوضاء إلى الإشارة المارة به بمعامل ضوضاء النظام Noise Figure وهو النسبة بين نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند مدخله إلى تلك عند مخرجه وتعطى بالعلاقـة

$$N_F = SNR_i / SNR_o \qquad 2\text{-}21$$



الشكل 2-3 معامل الضوضاء

في حال افتراض وجود الضوضاء الحرارية فقط وباستخدام المعادلة 2-17 والمعادلة 2-19 ، فإن قدرة أقـل إشارة مكتشفة بواسطة الرادار بدلالة أقل نسبة إشارة إلى الضوضاء يمكن اكتمال الكشف بها تعادل

$$S_{min} = k T_o B SNR_{min} \qquad 2\text{-}22$$

لذلك يمكننا إعادة كتابة معادلة الرادار 2-8 بأخذ الضوضاء الحرارية في الحسبان وتجاهل المصادر الأخرى للضوضاء لتتحول إلى شكل آخر من أشكال المعادلة على النحو التالي

$$R_{max} = \sqrt[4]{(P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 k T_o B SNR_{min})} \qquad 2\text{-}23$$

6-2 القدرة المرسلة

تعرف القدرة بأنها معدل إنتاج الطاقة أو معدل استهلاكها بالنسبة للزمن . تظهر قدرة النبضة المرسلة في معادلة الرادار كعامل أساسي في تحديد أقصى مدى للرادار ، لذا عادة ما نجد أن الرادار النبضي بعيد المدى يتميز بقدرة إرسال ضخمة قد تصل إلى أكثر من ميقاواط .

من قواعد الطبيعة الأساسية عدم فناء الطاقة أو استحداثها فهي إذا ما فقدها نظام اكتسبها غيره . حتى يتمكن الرادار النبضي من إرسال قدرة كبيرة ، فإنه يقوم بتخزين الطاقة الكهربية القادمة من مصدر تغذيته خلال فترة الاستقبال الطويلة التي لا يحدث فيها إرسال . وعند الإرسال يقوم الرادار بتحويل كل الطاقة المخزونة إلى الهوائي لإشعاعها في فترة قصيرة تعادل عرض نبضة الإرسال كما يتضح من الشكل 2-4 أدناه .

الشكل 2-4 رفع القدرة القصوى

بدلالة المعادلة 1-3 ، تتميز إشارة الرادار النبضي بقصر نبضاتها وبالتالي بدورة عمل صغيرة جداً تصل لأقل من 0.001 أو 0.1% مما يتيح الحصول على قدرة قصوى Peak Power كبيرة خلال زمن النبضة . ونجد أن القدرة القصوى المرسلة P_t تتناسب مع القدرة المتوسطة Average Power خلال كل فترة تكرار النبضة P_{av} بالعلاقة التالية

$$P_t = P_{av} / D.C. \qquad 2\text{-}24$$

حيث D.C. دورة العمل . القدرة المتوسطة هي القدرة اللازمة من وحدات التغذية ومصادر القدرة وعادة ما تكون في حدود عشرات الكيلو واط لرادار الاستطلاع .

ومما يجب مراعاته لدى مصمم الرادار عدم زيادة القدرة القصوى بأكثر مما يستلزمه المدى المستهدف للرادار وإلاّ فإن احتمالية حدوث التباس في المدى بالتقاط أهداف خارج نطاق الرادار تصبح كبيرة .

من تعريف القدرة فإن الطاقة المرسلة خلال النبضة الكهرمغنطيسية الواحدة ترتبط مع القدرة القصوى وعرض النبضة بالعـلاقة

$$E_t = P_t \tau \qquad 2\text{-}25$$

وبالتعويض في معادلة الرادار 2-23 بدلالة الطاقة المرسلة بدلاً من القدرة ، يصبح شكل المعادلة هو

$$R_{max} = \sqrt[4]{(E_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 k T_o B \tau \, SNR_{min})} \qquad 2\text{-}26$$

من الشكل 2-2 نلاحظ أن معظم طيف النبضة الرادارية محصور في نطاق ترددي محدد بأول قيمة صفرية لغلاف مطال الإشارة عند مقلوب عرض النبضة ، لذا فلتقليل الضوضاء والتي تزيد بزيادة السعة الترددية للرادار تُحدد سعة قناة الاستقبال في كثير من الأنظمة بالقيمة

$$B = 1 / \tau \qquad 2\text{-}27$$

كما يرد في الباب الرابع ، لتصبح معادلة الرادار بدلالة الطاقة المرسلة للنبضة كما يلي

$$R_{max} = \sqrt[4]{(E_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 \, k T_o \, SNR_{min})} \qquad 2\text{-}28$$

من معادلة الرادار 2-28 نلاحظ اعتماد المدى على الطاقة المرسلة وليس على القدرة فقط كما قد يبدو بل يزيد بزيادة عرض النبضة . هذه العلاقة متوقعة لأن الحصول على معلومات أكبر عن الهدف يحتاج إلى زمن أطول لاستخلاصها من نبضة الصدى . يمكن أن نضرب مثالاً لذلك بشخص داخل غرفة مظلمة ويحمل مصباحاً يرسل الضوء على شكل نبضات متقطعة فإنه يحتاج إلى فترات إضاءة كافية ليتبين الأشياء داخل الغرفة المظلمة . كذلك يتأثر المدى بالفقد في طـاقة الإشارة أثناء مرورها بالغلاف الجوي الأمر الذي يتطلب زيادة الطاقة المرسلة .

استخدام إشارات ذات نبضات عريضة يمكن من تقليل القدرة القصوى المرسلة اللازمة لتغطية مدى كبير ، وبالتالي توظيف مرسلات ذات قدرات منخفضة مثل أدوات الحالة الجامدة . إلاّ أن زيادة عرض النبضة الرادارية يقلل من دقة القياس والتمييز في المدى كما يتضح من المعادلة 7-1 ، كما أنه يرفع من دورة عمل وحدات الإرسال ذات القدرات العالية مما يزيد الحمل عليها ويزيد احتمالية تلفها .

لزيادة عرض النبضة المرسلة وبالتالي المدى دون التقليل من دقة القياس والتمييز في المدى تستخدم تقنية ضغط النبضة Pulse Compression . يتم تعديل طور أو تردد الإشارة المرسلة بشكل معين ثم ترسل الإشارة على شكل نبضات عريضة إلى الهوائي . بعد انعكاسها من الهدف ، يتم ضغط النبضات المستقبلة بواسطة مرشحات خاصة للحصول على دقة عالية جداً في تحديد المدى .

القدرة أو الطاقة المرسلة الواردة في معادلة الرادار هي قدرة أو طاقة النبضة الكهرمغنطيسية بعد إشعاعها من الهوائي وليست كل القدرة أو الطاقة الكهربائية المنتجة بواسطة الرادار وذلك للفقد الذي يحدث ببعض وحدات النظام نفسه والتي أبرزها الهوائي ، دوائر الربط وخطوط النقل . يعمل الهوائي على تحويل معظم الطاقة الكهربائية المنتجة وليس كلها إلى موجات كهرمغنطيسية ، وذلك بسبب الفقد Loss الذي يصاحب عملية تحويل الطاقة Energy Conversion .

يمكن حساب الفقد في القدرة بمعرفة كفاءة الهوائي وهي النسبة بين قدرة خرجه المرسلة وقدرة دخله كما توضح العلاقة التالية

$$\eta = P_t / P_i \qquad 2\text{-}29$$

يمكن قياس القدرة الكلية المنتجة بواسطة مرسل الرادار بتمريرها إلى حمل متوافق مع المرسل عبر جهاز قياس القدرة أو الواطمِتر الرادي RF Wattmeter . لحساب المدى ، يجب طرح الفقد الكلي L الناتج في الهوائي ودوائر الربط وخطوط النقل من القدرة الكلية المنتجة بواسطة المرسل P_{tx} حسب العلاقـة التالية

$$P_t = P_{tx} - L \quad dB \qquad 2\text{-}30$$

أسئلة وتمارين

1- اشرح المقصود من المقطع الراداري للهدف والعوامل المؤثرة به .

2- رادار درجة حرارة وسطه $27^{\circ}C$ والسعة الترددية لمستقبله 1.2MHz ، أوجد قيمة أقل إشارة مكتشفة بواسطة ذلك الرادار منسوبة لملي واط

3- أوجد قدرة الإشارة المكتشفة لهدف مقطعه الراداري $5m^2$ ويبعد عن الـرادار 400km إذا كانت القدرة المتوسطة المرسلة 10kW ، تردد الرادار 3GHz ، دورة عمله 1% ، معامل كسب الهوائي 1000 وفـقد الخط الناقل والهوائي 2dB .

4- مـرسل رادار نبضي تردده 3GHz يعـمل بدورة عـمل 1% وقـدرة متوسطة 10kW ، احسب القدرة القصوى المرسلة في اتجاه الهوائي إذا كانت مساحته $0.8m^2$ وكفاءته 90% .

5- استنبط معادلة المدى للرادار النبضي بدلالة الطاقة المرسلة .

6- أوجد نسبة الإشارة للضوضاء في مدخل ومخرج مستقبل معامل ضوضـائه 4dB لهدف مقطعه الراداري $0.5m^2$ ويبعد عن الرادار 100km إذا كانت طاقـة النبضة المرسلة 1J ، تردد الرادار 300MHz ، معامل كسـب الهـوائي 30dB ، درجة الحرارة $27°C$. ثابت بولتزمان يعادل $1.38x10^{-23}$ J/K .

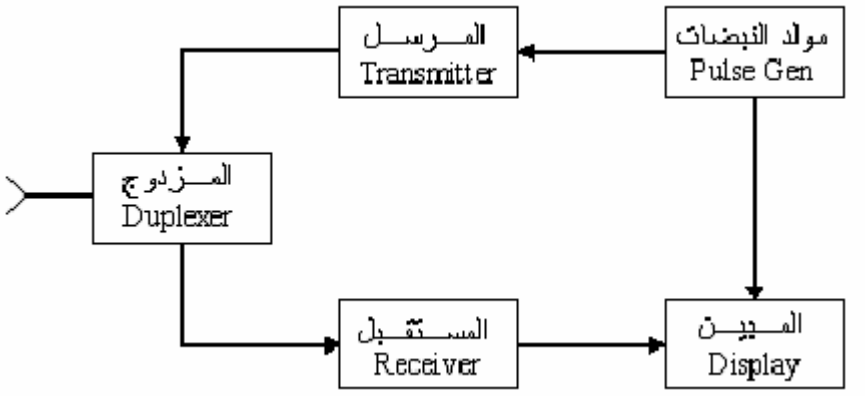
الباب الثالث

تركيب الرادار

3-1 المخطط الصندوقي

يتألف نظام الرادار من عدة وحدات تعمل مجتمعة لتحقيق المهام التي صمم من أجلها النظام مثل الكشف عن الأهداف وقياس إحداثياتها ومن ثم عرض تلك المعلومات بصورة تمكن الإنسان من الاستفادة منها بصورة سهلة وسريعة في نفس الوقت .

الشكل 3-1 يوضح المخطط الصندوقي العام لرادار نبضي فعال أحادي الهوائي يتألف من عـدة وحدات مستقلة . المخطط لا يشمل بعض الوحدات بالرادار مثل وحدات التغذية بالقدرة ووحدات التحكم بحركة الهوائي ووحدات التهوية والتبريد .



الشكل 3-1 المخطط الصندوقي للرادار

يعمل الهوائي Antenna عند الإرسال على تحويل التيارات الكهربية عالية التردد والقدرة والمنتجة بواسطة قناة الإرسال إلى موجات كهرمغنطيسية بنفس التردد وتركيزها بإشعاعها في اتجاه محدد . كما يعمل أثناء الاستقبال على تحويل الإشارات الكهرمغنطيسية المنعكسة من الأهداف إلى جهود كهربية ضعيفة لها نفس تردد الإرسال .

يعتمد نوع الهوائي المستخدم على وظيفة الرادار وتردده واستقطاب موجته وشكل الشعاع المطلوب . في بعض الحالات تصل الطاقة المنتجة إلى الهوائي على شكل موجات كهرمغنطيسية عبر دليل موجة Waveguide أجوف وليس على شكل تيارات كهربية عبر الكوابل فيقوم الهوائي بتوجيهها حسب شكل الشعاع دون الحاجة إلى تحويل شكل الطاقة .

المزدوج Duplexer أو مفتاح الهوائي وحدة مزدوجة الدخل لازمة لأي رادار أو نظام اتصال يستخدم هوائياً واحداً لكل من الإرسال والاستقبال . يعمل المزدوج على تمرير إشارة الإرسال عالية القدرة إلى الهوائي وحجبها عن دوائر الاستقبال لحمايتها من التلف ، بينما يقوم بتمرير إشارة الصدى المستقبلة من الهوائي إلى المستقبل وحجبها عن دوائر الإرسال ذات الممانعة المنخفضة حتى لا يحدث بها فقد يؤدي إلى تقليل حساسية الرادار .

يقـوم المرسـل Transmitter بإنتـاج نبضات جيـبية عـالية التردد والقـدرة وباستقرارية كبيرة في كل منهما وذلك لضمان استقرار إشارات الصدى المرتدة من الأهداف . يحدث عدم استقرار الإشارة تشوهاً في المعلومات عن خواص الهدف المصاحبة للإشارة ويقلل من دقة هذه المعلومات . نسبة لكبر قدرته ، عادة ما يستخدم المرسل جهوداً كبيرة تعقّـد تصميمه وتستلزم الوقاية منها ومما قد يصاحبها من إشعاعات ضارة بالإنسان .

دور المستقبل Receiver هو تكبير إشارات الصدى الضعيفة القادمة من الهوائي عبر المزدوج ومعالجتها لتحسينها ولتقليل أثر الضوضاء المصاحبة لها وتحجيم الإشارات القادمة من أهداف غير مرغوب فيها . كما يقوم المستقبل باستخلاص إشارة الهدف وكشفها لعرضها بصورة مرئية حيث تعرف إشارة خرج المستقبل بإشارة الفـيديو (الصورة) Video Signal .

يعرض المبين Display على شاشته الأهداف المرصودة بواسطة الرادار من إشارة الفـيديو بصورة مرئية مريحة للعين ويمكن للشخص الجالس أمام الشاشة

تحديد إحداثيات الهدف من موقع الرادار بطريقة بيانية أو رقمية سهلة وسريعة . كما يمكنه أيضاً التحكم بشدة الإضاءة أو التباين أو تركيز الصورة وكذلك التقريب والتبعيد Zooming وإظهار العلامات المساعدة وما شابه ذلك حسب رغبته .

يعتبر مولّـد النبضات Pulse Generator الحاكم الأساسي للتزامن بالرادار ، حيث يقوم بالتحكم في لحظة إرسال النبضة من المرسل وتحديد تردد تكرار النبضة PRF وبذلك يكون المنوط به تحديد المدى الأقصى للرادار دون حدوث التباس وفقاً للمعادلة 5-1 . كذلك يرسل المولد نبضات التزامن إلى المبين لضمان عرض الهدف على شاشته بمـداه الصحيح .

3-2 هوائي الرادار

يمكن النظر إلى الهوائي على أنه محـول للطاقة Transducer من طاقة كهربية إلى طاقة كهرمغنطيسية في حالة الإرسال ومن طاقة كهرمغنطيسية إلى كهربية في حالة الاستقبال .

يتكون الهوائي من عدة عناصر أهمها عنصر الإشعاع أو المشع Radiator والذي يتكون في أبسط صوره من سلك معدني يمر به تيار كهربي عالي التردد قادم عبر المغذي Feeder مسبباً مجالاً كهرمغنطيسياً حول السلك له نفس تردد التيار . ينتشر المجال من المشع مباشرة ليقوم بتغذية بقية أجزاء الهوائي بالطاقة الكهرمغنطيسية والتي تعمل بدورها على تشكيل شعاع الانتشار وتحديد اتجاهه .

في بعض الهوائيات البسيطة المستخدمة في عدد من أنواع الاتصالات اللاسلكية نجد الهوائي عبارة عن مشع لا أكثر دون الحاجة لأجزاء أخرى حيث تعتمد الاتجاهية Directivity على نوع المشع كالهوائي ثنائي القطب Dipole أو هوائي الحلقة . كما نجد في كثير من أنظمة الرادار التي تستخدم الموجات المكروية أن المشع يستقبل الطاقة بصورتها الكهرمغنطيسية عبر دليل موجة Waveguide دون الحاجة إلى تحويلها بل يكون على شكل بوق Horn يشكل نهاية دليل الموجة

ويضمن توافقه مع الفراغ . يستخدم دليل الموجة لتغذية الهوائي في نطاق الموجات المكروية ولا تستخدم الكوابل المحورية للفقد الذي يحدث بها عند تلك الترددات .

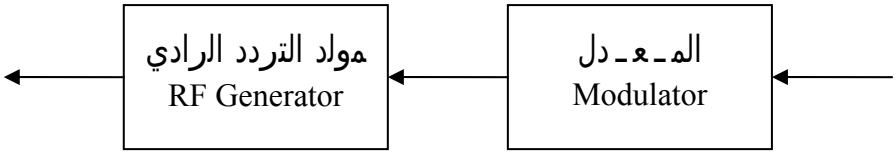
غالباً ما يشتمل هوائي الرادار على عاكس Reflector يمنع انتشار الموجات في الاتجاه المعاكس بل يعكسها إلى الأمام لزيادة كثافة القدرة المرسلة . يساعد سطح العاكس الباربولي المقعّـر في تحديد زاوية الشعاع Beamwidth المطلوبة للحصول على الدقة اللازمة لقياس زاوية الهدف . تعتمد استطالة العاكس على زاوية الهدف المراد قياسها إذ يكون مستعرضاً في حال استهداف قياس زاوية الاتجاه أو السمت Azimuth كما هو الحال في رادار الاستطلاع ثنائي الإحداثيات 2D ، ورأسياً في حال قياس زاوية الارتفاع Elevation كما في بعض معينات الارتفاع Height Finders . يكون العاكس دائري الشكل على شكل طبق Dish في حال ضرورة قياس كل من الزاويتين كما هو الحال في أنظمة رادار التتبع .

يعتبر العاكس أكبر وحدات الهوائي من حيث الحجم والكتلة مما يجعله عنصراً أساسياً في التصميم الميكانيكي والإنشائي للهوائي ، إذ تحتاج كتلته الكبيرة فيما تحتاج إلى محركات ضخمة لتحريكها . كما أن كبر حجم العاكس يزيد من تأثير الرياح على حركة الهوائي الأمر الذي يستحسن معه صنع العاكس على شكل شبكة معدنية تسمح بمرور الهواء عبرها . كما يجب المحافظة على عاكس الهوائي من الصدمات والتي قد تتسبب في انبعاج سطحه وبالتالي تؤدي إلى تغير شكل الشعاع المطلوب وربما إلى الإخلال بتوافق الهوائي مع خط النقل أو دليل الموجة .

بعض الهوائيات تحتوي على عناصر أخرى خلاف المشعات والعواكس مثل العدسات Lens المستخدمة لتركيز الشعاع والقبة اللادائنية Radome المستخدمة لحماية الهوائي . كما تستخدم بعض الهوائيات أيضاً الموجهات Directors وهي عناصر إشعاع غير مغذاة Parasitic وذلك لزيادة معامل الكسب المتجه للهوائي . كما نجد أن بعض أنواع الهوائيات مثل مصفوفات الطور تستخدم عدة مشعات دون الحاجة إلى عواكس للحصول على شكل الشعاع المنشود .

3-3 مرسل الرادار

غالباً ما يتركب مرسل الرادار النبضي من وحدتين أساسيتين هما مولد التردد الرادي RF Generator والمعدل Modulator كما بالمخطط الصندوقي بالشكل 3-2 .



الشكل 3-2 مرسل الرادار

يتم تصميم مولد التردد الرادي لينتج إشارة جيبية مستمرة ذات قدرة عالية واستقرارية كبيرة . يتحقق ذلك باستخدام أداة إلكترونية أو موجية ذاتية التذبذب Self-oscillating كصمام الماغنترون ، أو بتوليد إشارة التردد الرادي بواسطة وحدات منخفضة القدرة ثم تكبيرها باستخدام مكبر قدرة كصمام الكلايسترون .

الطريقة الأخيرة توفر استقرارية كبيرة في إشارة الخرج كما تسهل من تصميم أنظمة رادارية متطورة يستفاد فيها من طور الإشارة المستقبلة لقياس سرعة الهدف ولإجراء معالجة للإشارة تتيح إلغاء الأهداف الثابتة بما يعرف بتمييز الأهداف المتحركة والذي يرد تفصيله في الباب الخامس بعون الله .

يتم اختيار الأداة المستخدمة لإنتاج القدرة العالية بمولد التردد الرادي بمرسل الرادار تبعاً للقدرة القصوى والكفاءة المطلوبتين وحسب تردد الرادار واستقراريته وقابليته للتغيير . من حيث مبدأ عملها ، يمكن تقسيم تلك الأدوات إلى الأقسام الأربعة التالية :-

- الصمامات أو الأنابيب الفراغية Vacuum Tubes الحرارية مثل الصمام الثلاثي المستخدم كمولّد تردد رادي في بعض المحطات المترية . لا تعمل هذه الصمامات في نطاق الموجات المكروية لصغر سعاتها الترددية وقد بدأ استخدامها يقل مع مرور الزمن .

- الأدوات متُقاطعة المجال Crossed Field Devices مثل الماغنترون والمكبر متقاطع المجال CFA (أو الأمبليترون Amplitron) والتي تحتاج مجالاً مغنطيسياً في عمـلها .
- الأدوات خطية الشعـاع Linear-Beam Devices مثل الكلايسترون وصمام الموجة المتنقلة أو الراحلة Traveling Wave Tube .
- أدوات الحالة الجامدة Solid State Devices والتي عادة ما يتم استخدامها على شكل مصفوفات من الترانزستور ذي النطاق الترددي الكبير لزيادة القدرة القصوى والاستمرارية .

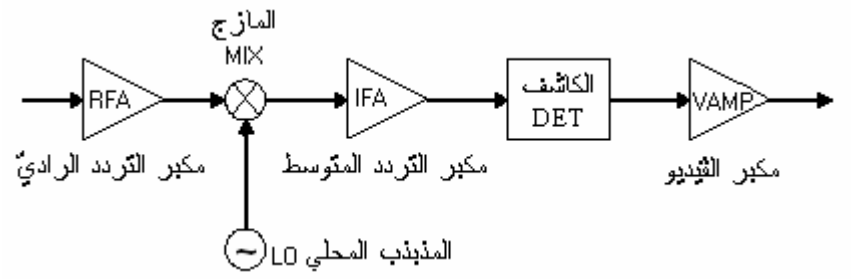
وظيفة معدل الرادار هي تشكيل إشارة التردد الرادي عالية القدرة المنتجة في مولد التردد الرادي لتخرج على شكل نبضات ضيقة ذات قدرة قصوى كبيرة . ويتم تصميم المعدل بناء على نوع مولّد التردد الرادي المستخدم وعلى عرض النبضة وشكلها Waveform . من الأدوات المستخدمة في معدل الرادار النبضي صمام الثايراترون Thyratron والصمام الرباعي ومصفوفات الترانزستور الحقلي FET ، والتي يرد ذكرها بالباب السابع من هذا الكتاب إلى جانب الأدوات المستخدمة في توليد التردد الرادي مع شرح مفصل لتركيبها وخواصها .

3-4 مستقبل الرادار

يعمل المستقبل على تكبير ومعالجة الإشارة المستقبلة والتخلص من الضوضاء المصاحبة لها لرفع نسبة الإشارة إلى الضوضاء إلى حد يمكن معه استخدام الإشارة للحصول على معلومات مفيدة وموثوقة عن الأهداف المرصودة .

توجد عدة أنواع من المستقبلات ، من أبسطها المستقبل المباشر الموالـَف أو المـنغـم Direct Tuned Receiver والذي يتعامل مع الإشارة المستقبلة عالية التردد من تكبير وترشيح وإزالة تعديل مباشرة دون الحاجة إلى تغيير ترددها ، الأمر الذي يستدعي إعادة ضبط ترددات كل وحداته في كل مرة يراد فيها تغيير تردد الإشارة المرسلة من الرادار .

كما نجد أن حساسية المستقبل المباشر منخفضة عند تردد الرادار العالي وذلك لميل معاملات التكبير لمكبرات الإشارة للانخفاض متأثرة بالاستجابة الترددية للأدوات المستخدمة . لزيادة الحساسية ، تم ابتكار مستقبلات إعادة التوليد Super Regenerative Receivers والتي تستخدم التغذية العكسية الموجبة في التكبير ، إلا أن ذلك الحل صاحبته تأثيرات سالبة في استقرارية المستقبل .



الشكل 3-3 مستقبل الرادار

تم تطوير مستقبلات يتم فيها تغيير تردد الإشارة المستقبلة إلى تردد أقل من ترددها الأصلي مثل المستقبل الهوموداين Homodyne قليل التكلفة والذي يستخدم خرج إشارة المرسل في كشف أو إزالة تعديل الإشارة المستقبلة . يستخدم مثل ذلك المستقبل في بعض مستقبلات الرادار مستمر الموجة CW قليلة الكلفة لقياس سرعة المركبات الأرضية أو ككاشف للحركة Motion Detector .

إلا أن أكثر أنواع المستقبلات شيوعاً سواء في أنظمة الرادار أو الاتصالات هو المستقبل السوبر هيتروداين Super-heterodyne مثل المبين في الشكل 3-3 . يستخدم هذا المستقبل قبل كشف الإشارة مذبذباً محلياً عالي الاستقرارية لتغيير تردد الإشارة المستقبلة إلى تردد ثابت لكل الترددات المحتملة للإشارة المرسلة ، يسمى بالتردد المتوسط Intermediate Frequency .

في أنظمة رادار الاستطلاع ذات المدى الكبير ، يقوم مكبر التردد الرادي RFA بتكبير الإشارة الرادارية الضعيفة المستقبلة حتى يسهل التعامل معها . هذا المكبر عادة ما يتركب من مرحلة واحدة أو اثنتين ، ويستوجب عند الترددات المكروية أن يكون مكبراً قليل الضوضاء LNA لا يتجاوز معامل ضوضائه 4dB .

المازج Mixer عبارة عن دائرة لا خطية تعمل على ضرب الإشارة المستقبلة بعد تكبيرها في المكبر الرادي مع إشارة المذبذب المحلي Local Oscillator . تشتمل إشارة خرج المازج على مركبتين أساسيتين ، إحداهما بتردد يعادل فرق ترددي الإشارتين وأخرى بتردد يعادل مجموعهما ، حيث

$$v_o = A_r \cos 2\pi f_r t \,.\, A_{LO} \cos 2\pi f_{LO} t \qquad 3\text{-}1$$

$$= \tfrac{1}{2} A_r A_{LO} \{\cos 2\pi (f_r - f_{LO})t + \cos 2\pi (f_r + f_{LO})t\} \qquad 3\text{-}2$$

وعند تمرير الإشارة خلال مرشح تمرير حزمة ترددات BPF ذي سعة ترددية كافية لمرور الإشارة دون تشويه وذي تردد أوسط Center Frequency مضبوط على التردد المتوسط IF الذي يعادل

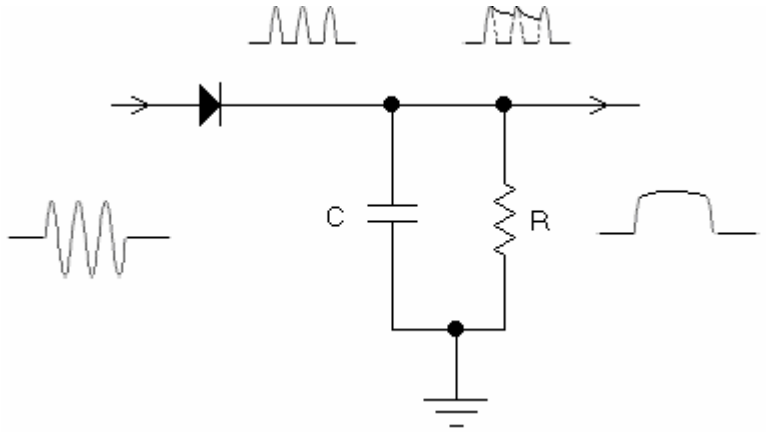
$$IF = f_r - f_{LO} \qquad 3\text{-}3$$

فإننا نتخلص من مركبة مجموع الترددين ونحصل على إشارة التردد المتوسط . يتم تكبير تلك الإشارة في مكبر التردد المتوسط IFA والذي عادة ما يتكون من عدة مراحل متتالية . تعتمد حساسية المستقبل السوبر هيتروداين وبالتالي مدى الرادار بدرجة كبيرة على معامل تكبير مراحل التردد المتوسط .

بالإضافة إلى التكبير ، تُجرى معظم عمليات الترشيح للإشارة بمراحل التردد المتوسط مما يجعلها تؤثر بدرجة كبيرة على اختيارية Selectivity المستقبل . الحساسية والاختيارية هما أهم خواص المستقبلات من بين خواص أخرى نأتي على ذكرها بالتفصيل في الباب الثامن من هذا الكتاب إن شاء الله . كذلك نجد أن هنالك عدة تقنيات لمعالجة الإشارة الرادارية Radar Signal Processing تتم أيضاً في مراحل التردد المتوسط ويرد تفصيلها في الباب الرابع .

يعمل الكاشف Detector أو مزيل التعديل على استخلاص إشارة الفيديو من إشارة التردد المتوسط . يتكون كاشف الغلاف Envelope Detector من ثنائي ومرشح تمرير ترددات دنيا LPF مشابه لما بالشكل 3-4 أدناه . نبضات الفيديو المكتشفة ذات قطبية أحادية موجبة أو سالبة حسب اتجاه الثنائي . هذه النبضات

ليست مستطيلة الشكل تماماً كما يتوقع بل شبيهة بالنبضات القـاوسية Gaussian وليس بها حواف حادة وذلك نتيجة للتشويه بسبب الترشيح قبل وبعد الكشف .



الشكل 3-4 كاشف الغلاف

يسمى كاشف الغلاف في أنظمة الموجات المكروية أحياناً بالكاشف الثاني باعتبار أن المازج البلوري المستخدم لاستخلاص التردد المتوسط هو الكاشف الأول . توجد أنواع أخرى من مزيلات التعديل المطالي AM غير كاشف الغلاف تستخدم لكشف الإشارات الرادارية ولكنها تختلف عنه في بعض الخصائص أبرزها كاشف الطور المتزامن الذي يرد التفصيل له في الباب الخامس بعون الله .

يعتبر مكبر الفيديو Video Amplifier مرحلة الخرج بالمستقبل ووظيفته تكبير الإشارة المكتشفة إلى مستوى مناسب لإرسالها إلى المبين لعرضها . تمتاز هذه المكبرات بكبر سعتها الترددية والتي تبدأ من نطاق التيار المباشر وتمتد لبضع من الميقا هيرتز وتشبه إلى حد كبير مكبرات الفيديو المستخدمة في جهاز الاستقبال التلفزيوني .

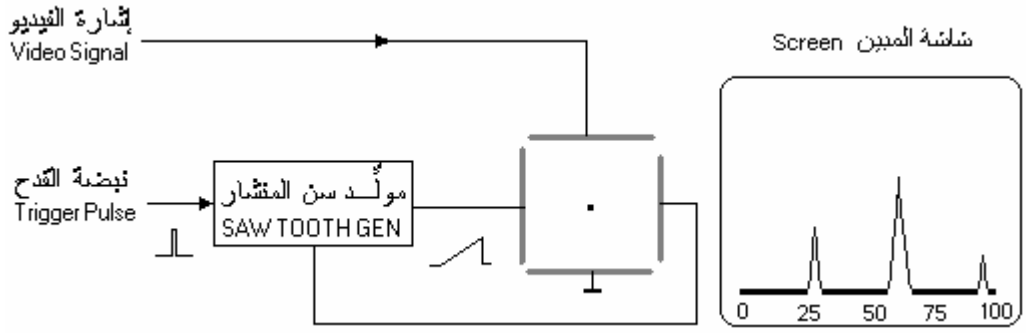
3-5 مبين الرادار

مما سبق نعلم أن المبين يستقبل كلاً من إشارة الفـيديو من المستقبل ونبضات التزامن من مولّـد النبضات ليتمكن من عرض الأهداف على شاشته وتيسير قراءة إحداثياتها . توجد بعض المبينات التي تستقبل بيانات إضافية تحسن من كيفية العرض وتظهر معلومات من مصادر أخرى مستقلة عن الرادار .

توجد عدة أنواع من مبينات الرادار تختلف حسب وظيفة الرادار والغرض من المبين . ولكننا نجد أن المبين الأساسي للرادار هو مبين المدى Range Indicator والذي يعرض نبضة الصدى من الهدف في موقع يمكن معه قراءة مدى الهدف من الرادار . إلا أن هذا المبين لا يمكن إلا من قراءة إحداثي واحد للهدف لا أكثر ، حيث لا ترد إليه أي معلومات عن الاتجاه اللحظي للهوائي .

تركيب مبين المدى شبيه إلى حد كبير بتركيب عارض الإشارات CRO والذي يستخدم أنبوب أشعة المهبط لتوليد شعاع إلكتروني ينطلق من المهبط ليسقط على سطح الشاشة المطلية بمادة فسفورية تتوهج عند نقطة السقوط فتظهر نقطة مضيئة على الشاشة .

يستخدم لوحان متوازيان رأسيان يحصران عنق الشاشة لتحريك الشعاع الإلكتروني أفقياً بتأثير المجال الكهربي الناتج من فرق الجهد بين اللوحين بما يعرف بالانحراف الأفقي Horizontal Deflection والذي يعمل على تحريك النقطة المضيئة بعرض الشاشة . بالمثل يستخدم لوحان متوازيان أفقيان لتوفير الانحراف الرأسي Vertical Deflection لتحريك النقطة المضيئة رأسياً .



الشكل 3-5 مبين المدى

عادة يتم استخدام إشارة جهد سن منشار لتوفير الانحراف الأفقي فتتحرك النقطة المضيئة عند وصول نبضة التزامن من أقصى يسار الشاشة بسرعة ثابتة وترجع لدى وصولها أقصى اليمين بسرعة كبيرة إلى اليسار مرة أخرى لتبدأ الحركة من جديد (انظر الشكل 3-5) . تسمى إشارة جهد الانحراف الأفقي هـذه بالقاعدة

الزمنية Time Base وذلك لأنها تمثل المحور الزمني لإحداثيات المنحنى الممثل للإشارة . أما إشارة جهد الانحراف الرأسي فتمثل مطال إشارة الفـيديو المراد عرضها حيث يتناسب مطال المنحنى المعروض على الشاشة مع الجهد اللحظي لإشارة الفيديو المكتشفة .

نتيجة لذلك تظهر نبضات الصدى من الأهداف بمطالات تعتمد أي منها على القدرة المستقبلة من الهدف المعني ، في حين يبعد موقع أي منها على المحور الزمني من أقصى اليسار بمسافة تتناسب مع مدى الهدف من الرادار . تبعاً للعلاقة المعروفة بين زمن وصول النبضة ومدى الهدف كما في المعادلة 2-1 ، يتم تدريج المحور الزمني بوحدات المسافة بدلاً عن الزمن كما يتضح من الشكل 3-5 .

يستفاد من مبين المدى في القراءة الدقيقة للمدى وقياس مستوى إشارة الصدى لأغراض الضبط والمعايرة . كما يستخدم أيضاً كراسم إشارات Oscilloscope داخل نظام الرادار يساعد في إجراء القياسات للإشارات المختلفة المارة عبر وحداته وضبط نبضات التزامن والعلامات Marks الضوئية المستخدمة في المبينات الأخرى .

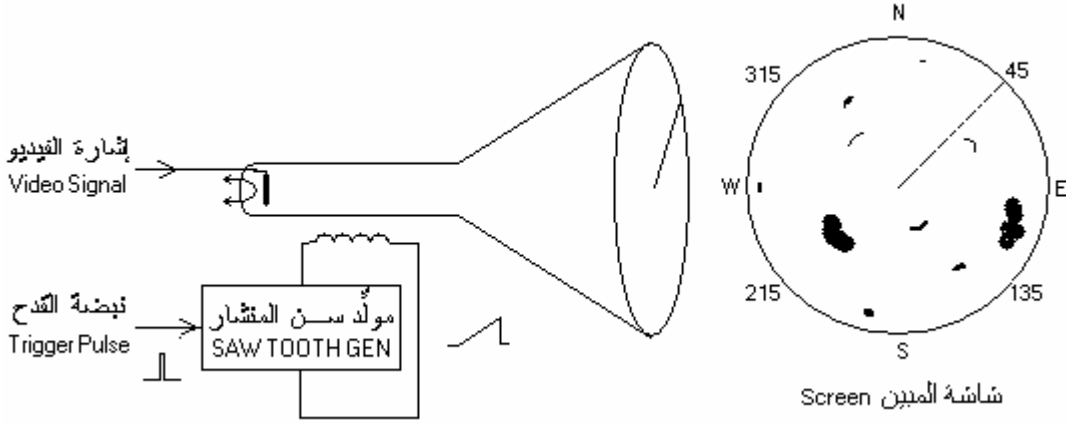
من المبينات شائعة الاستخدام لا سيما في أنظمة الاستطلاع الراداري ، مبين المدى والسمت Plan Position Indicator ويختصر بالأحرف PPI . وهو مبين يمكن معه قراءة إحداثيين للهدف هما المدى والسمت Azimuth أو زاوية الاتجاه Bearing . شاشة المبين دائرية الشكل ويظهر عليها خط نصف قطري مضئ يبدأ من مركز الشاشة وينتهي عند حافتها يسمى خط المسح Scan Line يدور متزامناً مع الاتجاه اللحظي لحركة دوران هوائي الرادار .

يتركب المبين من أنبوب أشعة المهبط CRT ذي شاشة دائرية ويستخدم ملفاً كهربياً واحداً للانحراف مغنطيسياً بدلاً من ألواح الانحراف الأربعة المستخدمة في مبين المـدى . تعمل إشارة تيار سن المنشار والمتزامنة مع نبضات تزامن الرادار كقاعدة زمنية لتحريك النقـطة المضيئة من مركز الشاشة إلى حافتها لتشكيل خط

المسح . في الطرائق التقليدية يستخدم محرك كهربي صغير متزامناً مع محرك الهوائي لتحريك ملف الانحراف بصورة دائرية يتحرك تبعاً لها خط المسح ، إلاّ أنه توجد طرائق إلكترونية بحتة تحقق نفس الغرض وبصورة أفضل .

تعمل إشارة الفيديو على تغيير جهد المهبط مما يؤثر في شدة الشعاع الإلكتروني المنبعث من المهبط والذي يشتد بزيادة فرق الجهد بين كل من المهبط والمصعد . نتيجة لذلك تتغير شدة إضاءة النقطة المتحركة على الشاشة حسب مستوى جهد إشارة الفيديو وبالتالي القدرة المنعكسة من الهدف . تسمى عملية التحكم بشدة إضاءة النقطة المضيئة عن طريق التحكم بجهد المهبط بتعديل شدة الإضاءة Intensity Modulation .

على إثر ذلك تظهر الأهداف المكتشفة على طول خط المسح على شكل بقع مضيئة Plots لحظة مرور الهوائي تجاهها ، أي عند تساوي سمت أو زاوية اتجاه أي منها مع زاوية اتجاه الهوائي في تلك اللحظة (انظر الشكل 3-6) .



الشكل 3-6 مبين المدى والسمت

يتم طلاء شاشة المبين بمادة لها المقدرة على الاحتفاظ بالتوهج Persistence لفترة أطول بعد ابتعاد شعاع المسح وبدرجة تتناسب وقوة التوهج وبالتالي وشدة التيار الإلكتروني . لذلك فإن آثار الأهداف تبقى ظاهرة على الشاشة لفترة زمنية تمكن من رؤية عدد كبير من بقع الأهداف بزوايا مختلفة في آن واحد . إلاّ أن الأنواع التقليدية من هذا المبين تحتاج إلى إظلام الغرفة للرؤية الواضحة مما يتعب العين مع طول وقت الرصد والمتابعة على الشاشة .

يقاس مدى الهدف من مركز الشاشة بصورة بيانية باستخدام تدريج على الشاشة ويتم تسهيل ذلك باستخدام دوائر متمركزة تسمى دوائر المدى بحيث أن وقوع الهدف على محيط إحداها يعني مساواة مداه لنصف قطرها . تستخدم خطوط مارة بمركز الشاشة لتسهيل قياس سمت الأهداف من تدريج موضوع على محيط الشاشة يبدأ عادة من اتجاه الشمال الجغرافي الذي يمثل بالزاوية صفر . يزيد تدريج السمت مع اتجاه عقارب الساعة (اتجاه دوران الهوائي) حيث يتم تمثيل الشرق بالزاوية 90° في حين يمثل الجنوب بالزاوية 180° كما يظهر بالشكل 3-6 .

بدلاً من استخدام محرك كهربي لتحريك ملف الانحراف دائرياً ، يستخدم ملـفا انحراف متعامدان أفقي ورأسي لتحريك شعاع المسح [5] . يتم ربط مجزئ جهد Potentiometer ذو فرشاتان متعامدتان مع بعضهما إلى عمود دوران الهوائي لجس زاوية اتجاهه . تعطي إحدى الفرشاتين إشارة جهد تتناسب مع جيب زاوية العمود في حين يتناسب جهد الأخرى مع جيب تمام الزاوية . يتم تحويل إشارتي الجهد إلى إشارتي تيار ويمرران بملفَي الانحراف المتعامدين فيدور شعاع المسح مع الهوائي .

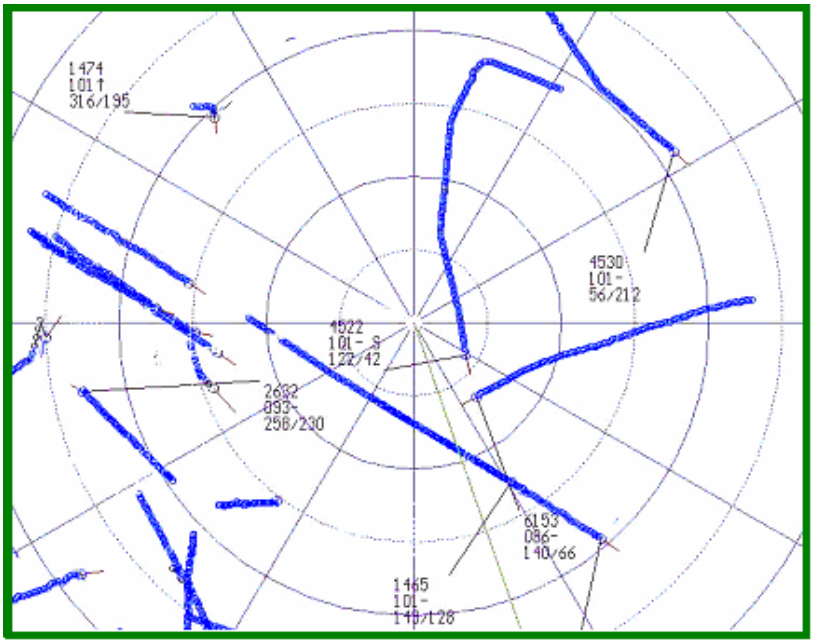
في بعض الأنظمة يستخدم مجس إندكتوسين Inductocyne بدلاً من مجزئ الجهد المذكور أعلاه ، وهو مولد كهربي ذو وجهين 2-phase به ملفين متعامدين تتولد بهما قوتين دافعتين الفرق في الطور بينهما л/2 . في الباب السادس من هذا الكتاب نتعرض لنوع آخر من المجسات المستخدمة لجس الزاوية ويسمى المضمن الضوئي .

تبعاً للتطور في برمجيات الحاسوب وطرائق معالجة البيانات الرادارية ، فقد استبدل مبين المدى والسمت التقليدي بالمبين المركب Synthetic Display في معظم أنظمة الاستطلاع الحديثة . هذا المبين لا يتعامل مع إشارات الفيديو مباشرة مثل المبينات التقليدية آنفة الذكر ، بل هو عبارة عن جهاز حاسوب سريع له ذاكرة كبيرة وشاشة عرض ملونّة ويشغـل برامج خاصة تعمل على البيانات الرادارية

المستنبطة من الأهداف . يتم استخلاص الأهداف بواسطة معالجات رقمية خاصة يأتي الحديث عنها في الباب السادس من هذا الكتاب .

تُعرض الأهداف في المبين المركب بصورة مشابهة لنظيراتها في مبين المدى والسمت التقليدي باعتماد الإحداثيات القطبية للأهداف ولكن بمواصفات أفضل منها بكثير . لا تعرض الأهداف على شكل بقع مضيئة بل تعرض على شكل رموز مصطنعة كالمربع أو النجمة في نفس موقع الهدف مع كتابة معلومات نصية إضافية جوار رمز الهدف للتوضيح .

كما يمكن استخدام خريطة كخلفية للشاشة توضح عليها المعالم الطبيعية البارزة كالأنهار والجبال ، إلى جانب توضيح الممرات الجوية Corridors المسموح بمرور الطيران عبرها والمناطق العسكرية والصناعية الهامة التي يحظر الطيران فوقها كالسدود والجسور ومحطات توليد الكهرباء . وبما أن هذا المبين يستخدم شاشة الحاسوب الرقمية المعتادة ، لا يحتاج عامل الرصد إلى إظلام الغرفة كما في حالة المبين التقليدي .



الشكل 3-7 المبين المركب

أسئلة وتمارين

1- بالرسم وضح المخطط الصندوقي العام لرادار نبضي مع شرح وظيفـة كـل وحدة به .

2- رادار تردد تكرار نبضته 300Hz رصد هدف يبعد عنه 600km . إذا كان قطر شاشة مبين المدى والسمت المستخدم 50cm ، أوجد المحل الهندسي لموقع تمثيل الهدف على شاشة المبين .

3- في المثال السابق أوجد موقع تمثيل الهدف على شاشة مبين المدى المستخدم إذا كان عرض شاشته 20cm .

4- اشرح تركيب وطريقة عمل مبين المدى والسمت .

5- رادار تردد إرساله 3GHz وتردده المتوسط 40MHz ، أوجد الترددات المحتملة للمذبذب المحلي عالي الاستقرارية بالمستقبل .

6- عـدد المكبرات المختلفة بمستقبل الرادار ووضح أي منهم له معامل التكبير الأعلى مع ذكر السبب .

7- اشرح كيفية التحكم في كل من عرض نبضة الرادار المرسلة وفي لحظة إرسالها .

8- وضح على ماذا تعتمد دقة القياس في كل من المدى والزاوية .

9- اشرح دور المزدوج في الرادار النبضي وأثره في حماية المستقبل .

الباب الرابع

معالجة الإشارات الرادارية

4-1 مقدمة

يعمل مستقبل الرادار كما سبق على تكبير الإشارة الرادارية المستقبلة ضعيفة القدرة إلى درجة تمكن من الاستفادة منها لاستخلاص أكبر قدر من المعلومات عن الهدف وبصورة موثوقة لا لبس فيها .

عادة ما تستصحب الإشارة المستقبلة معها إشارات أخرى غير مطلوبة تتسبب في ضياع المعلومات الرادارية وتقلل من مقدرة الرادار على كشف الأهداف ورصدها بما يعرف بالتداخل Interference . وكما سبق في الباب الثاني فإن التداخل بنوعيه المقصود وغير المقصود ، أي التشويش والضوضاء ، يقلل كل من حساسية الرادار ونسبة الإشارة إلى الضوضاء والتي قد تصل قيمتها لأقل من واحد مما يسبب استحالة الكشف الراداري في معظم الأنظمة . لما سبق يعمل المستقبل على رفع نسبة الإشارة إلى الضوضاء قبل الكشف وذلك بواسطة تقنيات معالجة الإشارة Signal Processing المختلفة .

إلى جانب الضوضاء نجد أن الرادار يعاني من الإشارات القادمة من أهداف غير مطلوبة بل وغير مرغوبة لغالبية الأنظمة الرادارية وهي الأهداف الثابتة والبطيئة والتي تعرف اصطلاحاً بالزخم Clutter والتي قد تكون إشاراتها قوية مقارنة بإشارات الأهداف الحقيقية والمطلوبة مما يسبب لبساً في المعلومات الرادارية المستخلصة .

يجب أن تتم معالجة الإشارة المستقبلة بصورة لا تقلل من استقرارية وخطية استجابة المستقبل لمطال الإشارة إذ يجب أن يتناسب فقط مع قدرة الإشارة الملتقطة والتي تعتمد على مدى الهدف ومقطعه الراداري . يعرف المدى الديناميكي Dynamic Range لمستقبل الرادار بالفرق بين مطال أقل إشارة مكتشفة وأعلى

مطال ممكن للإشارة لا يحـدث تشبعاً بدوائر المستقبل . يدل كبر المدى الديناميكي للمستقبل على خطيته في التعامل مع الإشارات المختلفة .

يعتبر الترشيح من أهم التقنيات المتبعة لمعالجة الإشارات في الضوضاء بالإضافة إلى تكامل الإشارات قبل وبعد الكشف وترشيح النبضات المتزامن . ومن تقنيات تمييز الأهداف وسط الزخم التكبير اللوغريتمي والتفاضل إلى جانب بعض التقنيات التي تخدم الغرضين تعرف بتقنيات تثبيت معدل الإنذارات الكاذبة . كما تستخدم تقنيات معالجة لزيادة المدى الديناميكي للمستقبل أبرزها التكبير اللوغريتمي والتحكم الزمني بمعامل التكبير . في الباب القادم إن شاء الله نتحدث عن إحدى تقنيات معالجة الإشارة الهامة وهي تقنية تمييز الأهداف المتحركة والتي تعمل على رفع نسبة الإشارة إلى الزخم Signal-to-Clutter Ratio .

2-4 ترشيح الإشارات

يعتبر الترشيح الوسيلة الأساسية التي تمكن مستقبل الرادار من تمييز الإشارات المطلوبة من بين تلك الإشارات المتداخلة معها وتقاسمها نفس النطاق الترددي . يتم الترشيح باستخدام المرشحات Filters في مختلف مراحل المستقبل ، أو بتصميم دوائر المستقبل نفسها لتكون ذات استجابة ترددية مماثلة لاستجابة المرشحات المرغوبة .

في حال وجود ضوضاء بيضاء White Noise ذات طيف عريض مثل الضوضاء الحرارية فقط دون غيرها ، يمكن استخدام مرشحات تمرير حزمة BPF بسعة ترددية كافية لتمرير الإشارة الرادارية دون تشويه مؤثر . هذا التشويه المؤثر يقصد به التشويه الذي يؤثر في نتيجة الكشف على الإشارة إلى درجة تؤدي إلى خطأ في نتيجته مما ينتج عنه عدم كشف الإشارة أو ظهور أهداف كاذبة أو انخفاض دقة القياس . يتم تصميم المرشح بحيث يساوي تردده الأوسط Center Frequency تردد الرادار بدوائر التردد الرادي ، أو ليساوي التردد المتوسط في دوائر التردد المتوسط والتي يوجد بها المرشحات الأكثر فاعلية بالمستقبل .

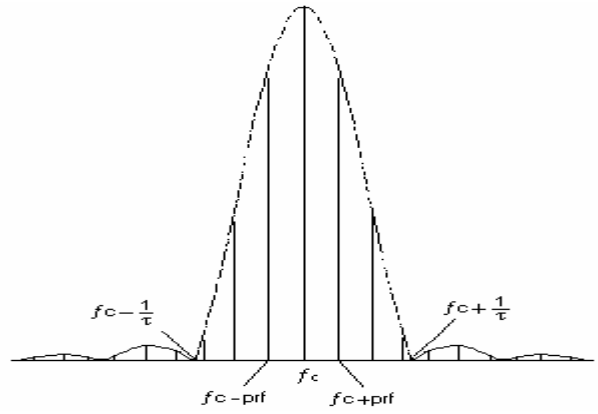
بينما تستخدم دوائر الموجات المكروية وخطوط النقل كمرشحات في مراحل التردد الرادي ، تستخدم الدوائر الكهربية الخاملة المكونة من الملفات والمكثفات لتحقيق مرشحات الإشارة في مراحل التردد المتوسط . يعتمد المرشح الأخير في عمله على الرنين Resonance الذي ينشأ من وجود سعات ومحاثات بالدائرة ويتم تحديد تردده الأوسط تبعاً لقيم كل من الملفات والمكثفات المستخدمة . السعة الترددية Bandwidth للمرشح هي الفرق بين ترددي قطع المرشح وتعتمد على معامل جودة Quality Factor دائرة الرنين والمرتبطة بمقاومة أسلاك الملفات المستخدمة في الدائرة .

يمكن استخدام بلورة الكوارتز في تركيب المرشح في مراحل التردد المتوسط لاحتواء دائرتها المكافئة على محاثة وسعة توفر الرنين وتقلل من القطع المستخدمة للحصول على نفس معامل الجودة . كما تستخدم أدوات الموجات الصوتية السطحية SAW في بعض المستقبلات كأدوات خاملة للترشيح . يمكن في مراحل التردد المتوسط دون مراحل التردد الرادي استخدام المرشحات الفعالة Active Filters المصممة بواسطة المكبرات التشغيلية المكونة من أشباه الموصلات ، والتي تمتاز بعدم الحاجة إلى استخدام الملفات في تركيبها . كذلك يزداد في تلك المراحل استخدام المرشحات الرقمية Digital Filters ، لا سيما مع التطور المطرد في مجالات معالجة الإشارة رقمياً وتوفر المحولات من تماثلي إلى رقمي ADC بالسرعات المطلوبة للعمل .

كما يتضح من شكل طيف قدرة الإشارة الرادارية المبين في الشكل 4-1 أدناه ، نجد أن معظم طاقة النبضة تتركز بالفص الأساسي Main Lobe دون الفصوص الجانبية ، وأن أقرب قيم صفرية لغلاف الإشارة والموضح بالخط المتقطع تقع عند ترددين يبعد أي منهما عن تردد الرادار أو التردد المتوسط بمقدار مقلوب عرض النبضة الرادارية . يقترح نورث North مقلوب عرض النبضة كقيمة مثلى للسعة الترددية لمرشحات الإشارة الرادارية بدون حدوث تشويه مؤثر بالإشارة مع وجود الترشيح المناسب للضوضاء .

لإيجاد نسبة الإشارة للضوضاء القصوى في خرج المرشح بافتراض وجود الضوضاء الحرارية فقط ، نستخدم المعادلة

$$SNR = P_r / k T_o B \qquad 4\text{-}1$$



الشكل 4-1 قدرة الإشارة الرادارية

وبالتعويض بالسعة الترددية المقترحة أعلاه للمرشح نحصل على

$$SNR = P_r \tau / k T_o \qquad 4\text{-}2$$

وبدلالة طاقة النبضة من المعادلة 2-25 ، تُعطى نسبة الإشارة إلى الضوضاء القصوى بعد الترشيح بالعلاقة التالية

$$SNR = E_r / k T_o = E / N_o \qquad 4\text{-}3$$

حيث N_o كثافة الضوضاء Noise Density والتي تعادل القدرة المتوسطة للضوضاء الحرارية لكل وحدة ترددات ، W / Hz . تعرف النسبة أعلاه بمعامل الاكتشافية Detectability Factor [2] وهو أقل نسبة إشارة إلى الضوضاء في خرج مرشح متوافق مع الإشارة .

3-4 الترشيح التوافقي

إذا ما كانت الإشارة المرسلة من الرادار يعبر عنها في النطاق الزمني بالدالة s(t) ، فإن متحول فورير للدالة والذي يمثل طيف الإشارة يعادل

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\, e^{-j2\pi f t}\, dt \qquad 4\text{-}4$$

وإذا ما كانت دالة نقل المستقبل أو بعض وحداته السابقة للكاشف هي $H(f)$ ، فإن كل من طيف ودالة إشارة الخرج قبل الكشف على الإشارة يعطيان بالمعادلتين

$$X(f) = H(f)\, S(f) \qquad 4\text{-}5$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)\, e^{j2\pi f t}\, df = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\, S(f)\, e^{j2\pi f t}\, df \qquad 4\text{-}6$$

يمكن التعبير عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند خرج المستقبل بدلالة القيمة العظمى لجهد الإشارة $x(t)$ والتي تقع عند $t = t_o$ ، حيث $0 < t_o < \tau$ ، والتي تتم نمذجة Sampling الإشارة عندها في المستقبل ، كما يلي

$$SNR = |\, x(t_o)\,|^2 / N \qquad 4\text{-}7$$

حيث N تمثل القدرة المتوسطة للضوضاء عند خرج المستقبل والتي تعادل

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} (\, N_o/2\,)\; |H(f)|^2\; df \qquad 4\text{-}8$$

حيث $N_o/2$ كثافة الضوضاء عند مدخل المرشح . القيمة مقسومة على اثنين نسبة لاستخدام كل من الترددات الموجبة والسالبة في تحليل الإشارات بينما كان التعريف السابق لكثافة الضوضاء يعتمد الترددات الموجبة فقط . بالتعويض في المعادلات أعلاه ، نجد أن نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الخرج تعادل

$$SNR = \left|\int_{-\infty}^{\infty} H(f)S(f)\, e^{j2\pi f\, t_o}\, df\right|^2 / N_o/2 \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}9$$

من الرياضيات نجد أن متباينة شوارتز Schwartz Inequality تفيد بأن مربع القيمة المطلقة لتكامل حاصل ضرب دالتين يقل عن أو يساوي حاصل ضرب تكاملي مربعي القيمة المطلقة لكل دالة ، أي أن

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} U(f)V(f)\, df\right|^2 \le \int_{-\infty}^{\infty} |U(f)|^2\, df \int_{-\infty}^{\infty} |V(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}10$$

حيث U ، V تمثلان أي دالتين في المتغير المستقل f . كذلك نجد من تقنيات تحليل الإشارات والنظم بأن نظرية بارسفال Parseval Theorem تعبر عن طاقة الإشارة في كل من النطاقين الزمني والترددي بالمعادلة

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)\, dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}11$$

بتعويض الدالة $U(f) = H(f)$ وتعويض الدالة $V(f) = S(f)\, e^{j2\pi f t_o}$ في متباينة شوارتز نجد أن

$$|\int_{-\infty}^{\infty} H(f)S(f)e^{j2\pi f t_o} df|^2 \le \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)e^{j2\pi f t_o}|^2 df \quad 4\text{-}12$$

فتتحول المعادلة 4-9 إلى المتباينة التالية

$$SNR \le 2/N_o \left| \int_{-\infty}^{\infty} S(f)\, e^{j2\pi f\, t_o}\, df \right|^2 \quad 4\text{-}13$$

$$SNR \le 2\, |s(t_o)|^2 / N_o \quad 4\text{-}14$$

حسب نظرية بارسفال . لذا فإن القيمة العظمى لنسبة الإشارة إلى الضوضاء في خرج المستقبل هي

$$SNR_{max} = 2\, |s(t_o)|^2 / N_o \quad 4\text{-}15$$

تتحقق القيمة العظمى أعلاه في حالة التساوي بالمتباينة 4-12 ، أي عندما توجد العلاقة التالية بين كل من دالة النقل وطيف إشارة دخل المستقبل

$$H(f) = S^*(f)\, e^{-j2\pi f\, t_o} \quad 4\text{-}16$$

أو بصورة عامة عندما

$$H(f) = K\, S^*(f)\, e^{-j2\pi f\, t_o} \quad 4\text{-}17$$

حيث t_o التأخير الذي يصبح عنده جهد إشارة الخرج عند أقصى قيمة له ، K ثابت يعادل معامل تكبير أو توهين المرشح ، $S^*(f)$ مرافق طيف إشارة الدخل $s(t)$. يعرف المرشح ذو دالة النقل المبينة في المعادلة أعلاه بمرشح متوافق Matched Filter مع الإشارة $S(f)$ ، أي مع شكل الإشارة Waveform بغض النظر عن مطالها أو قدرتها .

للحصول على أفضل نتيجة كشف للإشارة الرادارية وسط الضوضاء والتداخل ، فإنه ليس المطلوب هو محافظة الإشارة على شكلها بعد الترشيح المتوافق قبل الكشف بقدر ما المطلوب هو الحصول على أكبر نسبة إشارة إلى الضوضاء ممكنة في خرج المرشح .

4-4 الرابط كمرشح متوافق

يمكن إيجاد إشارة خرج أي مرشح في النطاق الزمني بإجراء التفاف Convolution للإشارة المستقبلة عند دخل المرشح $s_r(t)$ مع استجابة النُبيضة Impulse Response لذلك المرشح $h(t)$ باستخدام العلاقة

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(\lambda)\, h(t - \lambda)\, d\lambda \qquad 4\text{-}18$$

حيث λ متغير وهمي Dummy Variable . استجابة النُبيضة لأي مرشح هي متحول فوريير العكسي لدالة نقله $H(f)$ وتعطى بالعلاقة

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\, e^{j2\pi f t}\, df \qquad 4\text{-}19$$

من المعادلة 4-16 نجد أن دالة نقل المرشح المتوافق مع الإشارة المرسلة $s(t)$ تعادل مرافق طيف الإشارة $S^*(f)$ مع تأخير زمني t_o ، وعليه فإن استجابة ذلك المرشح للنبيضة تعادل

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S^*(f)\, e^{j2\pi f(t - t_o)}\, df = s(t_o - t) \qquad 4\text{-}20$$

حيث $s(t_o - t) = s^*(t - t_o)$. وباستخدام الالتفاف المبين في المعادلة 4-18 ، نجد أن أي إشارة خرج لذلك المرشح يمكن إيجادها كالتالي

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(\lambda)\, s(t_o - t - \lambda)\, d\lambda \qquad 4\text{-}21$$

يمكن تعريف دالة الارتباط التقاطعي Cross Correlation Function بين أي إشارتين $y(t)$ ، $z(t)$ بالعلاقة الرياضية التالية

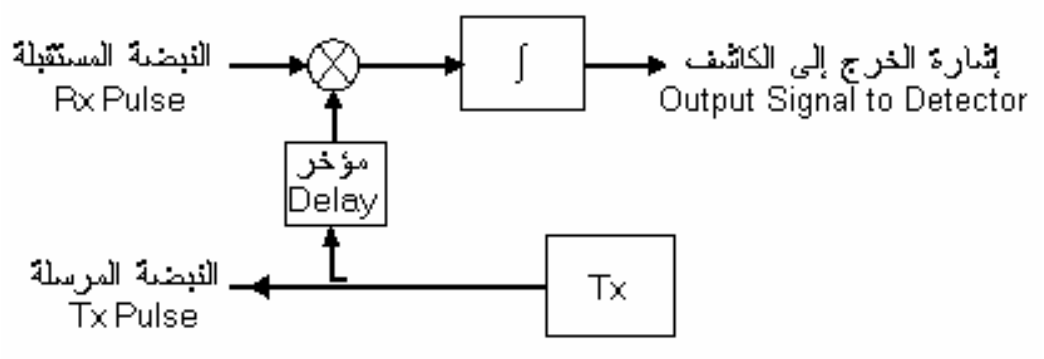
$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda)\, z(t + \lambda)\, d\lambda \qquad 4\text{-}22$$

حيث λ لها نفس الإشارة في الدالتَين . بالتالي يمكننا كتابة المعادلة 4-21 كما يلي

$$x(t) = R(t - t_o) \qquad 4\text{-}23$$

يتضح من المعادلة أعلاه أن خرج المرشح المتوافق مع الإشارة المرسلة يعادل دالة الارتباط التقاطعي للإشارة المستقبلة مع الإشارة المرسلة (أو نسخة منها) مع تأخير زمني . وعليه إذا لم تصاحب الإشارة المستقبلة ضوضاء ، فإننا نحصل

على إشارة تتناسب مع دالة الارتباط الذاتي Auto Correlation Function للإشارة المرسلة في خرج المرشح المتوافق . مما سبق يتضح أنه يمكن تصميم المرشح أو المستقبل على شكل كاشف الارتباط Correlator ليحقق نفس وظيفة المرشح المتوافق كما بالشكل 4-2 أدناه .



الشكل 4-2 كاشف الارتباط

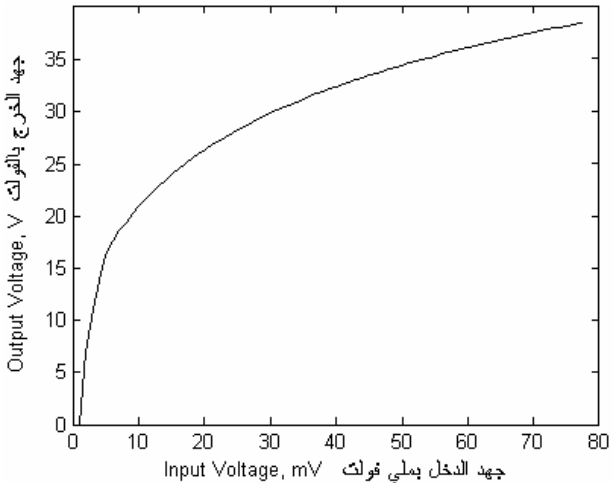
يستخدم الترشيح التوافقي وكشف الارتباط لأغـراض أخـرى غيـر مكافحـة الضوضاء وذلك للحصول على خواص أفضل للإشـارة . يتّم تصميم شكل الموجة المستخـدمة للإشارة الرادارية المرسلة بخلاف الشكل الموجي المعتاد ذي الطـور الثابت حيث يمكن تعديل ترددها أو طورها اعتماداً علـى نسـق محـدد يسـمح بمعالجتها عند استقبالها بواسطة مرشح متوافق معها لتحقيق الغرض المنشود ، كما يحدث في حالة ضغط النبضة على سبيل المثال .

4-5 التكبير اللوغريتمي والتفاضل

توجد بعض الطرائق الشائعة لمعالجة الإشارات الرادارية القادمة من أهداف وسط زخم ذي معدل تغير منخفض نسبياً مثل الذي ينشأ من الغيوم وحركة أمواج البحر وسلاسل الجبال الخالية من القمم الحـادة .

من أبرز طرائق المعالجة تلك التكـبير اللوغريتمي والتفـاضل Logarithmic Amplification and Differentiation لإشارة الفيديو بعد الكشف . المكبر اللوغريتمي مكبر لا خطّي يتناسب جهد إشارة خرجه مع لوغريتم جهد إشارة دخله

بحيث تنال الإشارات ذات الجهود المنخفضة حظـاً في التكبير أكبر مما للإشارات عالية الجهـد كما بالشكل 4-3 أدناه .



الشكل 4-3 استجابة المكبر اللوغريتمي

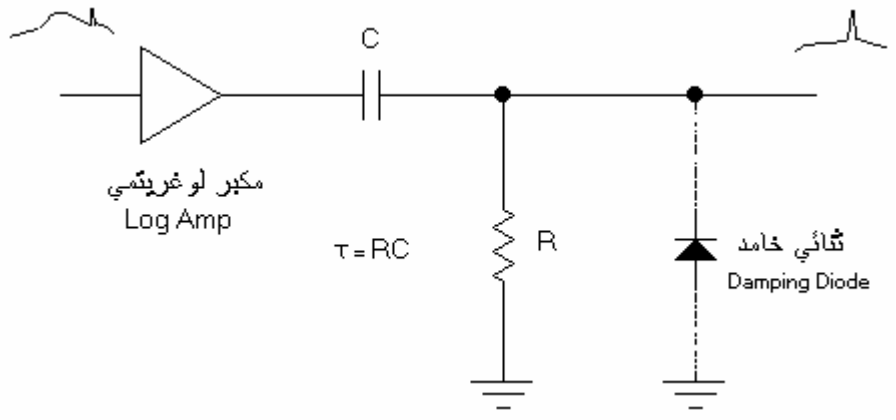
يتم تمرير إشارة الفيديو المكتشفة عبر مكبر لوغريتمي لرفع نسبة جهود إشارات الأهداف الضعيفة مقارنة بإشارات الزخم القوية ، ومن ثم تمرر إشارة الخرج عبر مفاضل مكون من دائرة ذات ثابت زمني قصير[1] Short Time Constant STC ، أو ذات ثابت زمني سريع Fast Time Constant FTC كما في بعض المراجع [4] . يمكن تحقيق هذه المعالجة بدائرة بسيطة تتركب من مقاومة ومكثف على شكل مرشح لتمرير الترددات العليا HPF كما بالشكل 4-4 أدناه . حتى تتم حماية مراحل الفيديو اللاحقة من الإشارات الخاطفة Spikes عالية الجهد والتي قد تنتج في خرج المفاضل ، عادة ما نلجأ لاستخدام ثنائي موصول على التوازي مع خرج الدائرة وذلك لإخماد جهود تلك الإشارات .

نتيجة للتكبير اللوغريتمي والمتبوع بالتفاضل ، يتم تحسين الإشارات الناتجة عن الأهداف النقطية Point Targets ذات المقاطع الرادارية الصغيرة والتي يمكن تحديد مواقعها بنقاط على شاشة الرادار ، بينما يقـل أثر الإشارات الناتجة من الأهداف الموزعة Distributed Targets والتي في معظمها زخم غير مرغوب فيه . تعتبر طريقة المعالجة هذه ذات مردود أكبر مع الأهداف المرئية من بين الزخم Super-Clutter Visible كما تظهر في الشكل 4-4 ، إلا أنها تقل فاعليتها مع الأهداف

المطموسة في الزخم أو المرئية دون الزخم Sub-Clutter Visible والتي تحتاج إلى معالجات أخرى لتحسين إشاراتها مثل تمييز الأهداف المتحركة الذي يرد تفصيله في الباب القادم إن شاء الله .

إلى جانب عملها في تحسين مستوى الإشارات الضعيفة بالنسبة إلى الإشارات القوية لإظهار الأهداف وسط الزخم ، يعتبر استخدام المكبرات اللوغريتمية في مستقبل الرادار من الوسائل الهامة في زيادة المدى الديناميكي للمستقبل والذي ورد ذكره في مقدمة هذا الباب .

في أيامنا هذه كثيراً ما تستخدم المعالجة الرقمية للإشارات DSP بدلاً من استخدام المعالجة بالوسائل التماثلية وذلك للحصول على استقرارية أكبر ومرونة في التصميم . بعد إجراء تحويل الإشارة التماثلية إلى رقمية بواسطة محول سريع وبعدد كافئ من الأرقام ، يتم تحويل مقدار الإشارة إلى القيمة اللوغريتمية المقابلة له باستخدام جدول بحث Look-up Table مخزون في ذاكرة للقراءة فقط ROM وذلك لزيادة سرعة المعالجة ، ثم يجري بعد ذلك التفاضل بطريقة رقمية .



الشكل 4-4 التكبير اللوغريتمي والتفاضل

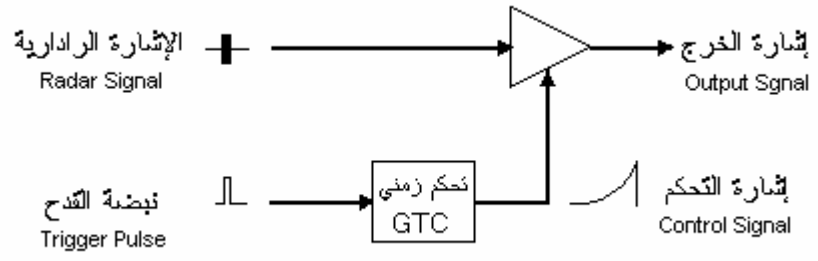
4-6 التحكم الزمني بالتكبير

تستخدم المستقبلات في أنظمة الاتصالات التماثلية ما يعرف بدوائر التحكم الآلي بالتكبير Automatic Gain Control AGC لزيادة مـدى الديناميكي . تعمل تلك

الدوائر على تقليل معامل تكبير مراحل التردد المتوسط بالمستقبل في حال ارتفاع جهد إشارة الخرج بعد إزالة التعديل أو الكشف على الإشارة ، حيث تمثل المكبرات مع دائرة التحكم الآلي بالتكبير حلقة تحكم مغلقة ذات تغذية عكسية سالبة .

نظام التحكم الآلي بالتكبير ذو استجابة ملائمة للإشارات المستمرة ذات معدل التغير المنخفض كالصوت أو الصورة ، إلاّ أننا نجدها غير مواكبة للإشارات الرادارية ذات الطابع النبضي سريع التغير . رغماً عن ذلك نجد أن هنالك بعض مستقبلات الرادار التي تستخدم ما تعرف بدوائر التحكم الآلي اللحظي بالتكبير [4] IAGC والتي تمتاز باستجابة أسرع من دوائر AGC التقليدية .

تبعاً لمعادلة الرادار في الباب الثاني ، تنعكس من الأهداف القريبة من الرادار إشارات أقوى مما تعكسه الأهداف البعيدة مع اعتبار تقارب المقاطع الرادارية للأهداف . وبما أن مدى الهدف يتناسب مع زمن تأخير النبضة المستقبلة ، يمكن التحكم في معامل تكبـير المكبرات بالمستقبل ليتم تكبير الأهداف البعيدة بمعدل أكبر من الأهداف القريبة . تسمى هذه الطريقة بالتحكم الزمني بالتكبير [8] Gain Time Control GTC ، أو التحكم الزمني بالحساسية Sensitivity Time Control كما في بعض المراجع [2،4] ، وتستخدم لزيادة المدى الديناميكي لمستقبل الرادار ولحمايته من الانعكاسات القوية من الأجسام القريبة جداً من هوائي الرادار .



الشكل 4-5 التحكم الزمني بالتكبير

الشكل 4-5 أدناه يبين كيفية التحكم الزمني بالتكبير في الرادار حيث يتم توليد إشارة التحكم متزامنةً مع نبضات التزامن الأساسية بالرادار والتي تحدد المدى

صفر للرادار ، وبحيث تتناسب مع R^n لقيم n بين اثنين وأربعة [4] لتعويض التوهين الناشئ من زيادة المدى .

7-4 تكامل نبضات الرادار

عادة ما يستقبل الرادار عدة نبضات صدى متتالية من نفس الهدف خلال تواجده داخل شعاع الهوائي بحيث تتجمع طاقتها لتشكل نبضة فيديو أقوى يزداد مطالها على مبين المدى ويزداد توهجها على مبين المدى والسمت .

يعتبر تجميع الطاقة هذا تكاملاً للإشارة المستقبلة حيث أنه تجميع طوري Phasor Sum يعتمد على كل من مطال وطور الإشارة اللحظي . بما أن النبضات القادمة من نفس الهدف مترابطة Correlated بخلاف الضوضاء التي تميل إلى العشوائية ، فإن تكامل النبضات يرفع من نسبة الإشارة إلى الضوضاء إلى درجة كبيرة .

يحتاج تكامل النبضات الرادارية المستقبلة إلى توفر وسيلة من وسائل تخزين وحفظ الطاقة . من أشكال وسائل الحفظ تلك طلاء شاشة مبين المدى والسمت بالمادة الفسفورية والتي تحتفظ بتوهج البقع المضيئة لفترة من الزمن بعد مرور شعاع المسح . كذلك من أشكالها استجابة كل من عين ودماغ عامل الرصد حيث يحتفظ الإنسان بالصورة التي لمحها لفترة من الزمن في ذاكرته .

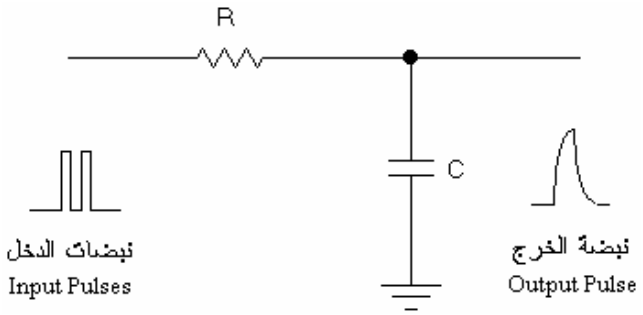
لتحسين الكشف ، يتم رفع نسبة الإشارة إلى الضوضاء قبل إجراء الكشف بما يعرف بالتكامل قبل الكشف Pre-detection Integration والذي يعتبر تكاملاً من النوع المتزامن Coherent لاعتماده على طور الإشارة . بصورة عامة يمكن اعتبار الترشيح المتوافق والترابط من أشكال التكامل المتزامن قبل الكشف .

يتم التكامل بعد الكشف Post-detection Integration في معظم المستقبلات وذلك لسهولة تحقيقه عملياً ، إلا أنّه يعتبر أقل كفاءة من التكامل قبل الكشف وذلك لكونه تكاملاً غير متزامن Non-coherent لاختفاء معلومة الطور من الإشارة بعد إجراء الكشف .

الدقيقة الواحدة Revolutions Per Minute وبدلالة زاوية الشعاع بالدرجات ، فإن عدد النبضات يعادل

$$\tilde{n} = \theta_B \, PRF / 6 \, RPM \qquad 4\text{-}28$$

تكامل النبضات بعد الكشف يزيد من عرض النبضة مما قد يؤثر في دقة قياس المدى حيث يجب أخذ التوقيت الأمثل لأخذ العينة للقياس عند القيمة العظمى $x(t_o)$ لتقليل نسبة الخطأ في تحديد مدى الهدف . الشكل 4-7 أدناه يوضح استخدام مرشح ترددات دنيا بسيط كمكامل لنبضات الرادار بعد الكشف ويوضح أثره في تقليل كل من التمييز والدقة في قياس المدى .



الشكل 4-7 تكامل النبضات بعد الكشف

4-8 ترشيح النبضات المتزامن

كما سبق في سياق الحديث عن تكامل نبضات الرادار ، فإن النبضات القادمة من نفس الهدف تكون مترابطة بحيث أنه لا يحدث تغير كبير في مطال أو طور نبضة عن سابقتها أو لاحقتها مقارنة بالضوضاء ذات التغيرات العشوائية .

يأتي ترابط نبضات الصدى القادمة من نفس الهدف بسبب انخفاض معدل تغير مدى الهدف أو سرعته النسبية مع الرادار مقارنة بتردد تكرار النبضة . ترتبط القدرة المستقبلة وبالتالي مطال النبضة مع المدى بالمعادلة 2-7 ، في حين يرتبط الطور مع المدى بالمعادلة 5-7 .

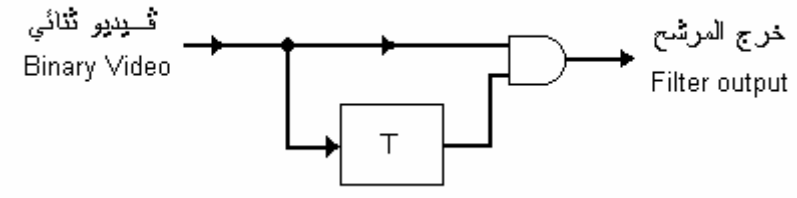
بالرغم من استخدام المرشحات ومختلف طرائق المعالجة المتبعة لتقليل أثر التداخل والضوضاء قبل الكشف ، قد تنتج في خرج الكاشف نبضات تمثل أهدافاً زائفة أو ما تعرف اصطلاحاً بالإنذارات الكاذبة False Alarms . لعدم ترابط

تلك النبضات في المـدى نجدها ذات ترددات تختلف عن تردد تكـرار النبضـة وغير متزامنة مع النبضات المرسلة من الرادار مما ينتج عنه تغييـر فـي موقـع الهدف الزائف بصورة شبه مستمرة . كذلك يمكن أن يتم استقبال نبضـات غيـر متزامنة مرسلة من رادار آخر بصورة مباشرة أو بعد انعكاسها من أهداف موجودة داخل مجالي عمل متقاطعين لراداريين متجاورين .

للتخلص من النبضات غير المتزامنة ، يستخدم نوع من الترشيح يعرف بترشيح النبضات المتزامن Synchronous Pulse Filtering الذي يتم بعـد الكشـف عـن الإشـارة . في أبسط صوره الرقمية ، يحتوي المرشح على مؤخر وبوابة المنطق AND لتأخير النبضة المكتشفة الثنائية بمقدار فترة تكرار النبضة ومقارنتهـا مـع النبضة الحالية لإعطاء قيمة ثنائية تؤكد تزامن النبضتين من عدمه كما في الشـكل 4-8 أدناه .

في حالة استخدام إشارة فيديو ذات مطال متغير يمكن اسـتخدام بوابـة تطـابق Coincidence تماثلية تسمح بمرور نبضات الفيديو المتطابقة زمنياً فقـط وتمنـع مرور غيرها . لاحظ أنّه إذا ما قمنا في الشكل 4-8 باسـتبدال البوابـة بجـامع إشارات فسوف نحصل على مكامل للنبضات وليس مرشحاً متزامناً .

كما أن استبدال البوابة أعلاه بطارح ، يوفر مرشحاً بسيطاً للأهداف الثابتة نتيجة لعدم تغير مداها بين نبضة وأخرى . هذه الطريقة في الترشيح تشبه إلى حـد مـا تمييز الأهداف المتحركة MTI المفصل في الباب القادم ، ويمكن تسميته بترشـيح MTI غير المتزامن نسبة لعدم تزامن طور الإشارة المستقبلة مع طـور الإشـارة المرسلة ، ولهذا السبب فهو غير محبذ للاستخدام .



الشكل 4-8 الترشيح المتزامن

9-4 كشف الإشارات

يستخدم مصطلح الكشف Detection في أدبيات الرادار للدلالة على عـدد مـن مراحل معالجة الإشارة والتي قد تختلف عن بعضها تماماً من حيث الغرض مـن المعالجة وطبيعة الإشارة الرادارية التي تجري عليها المعالجة .

نجد أن مازج الإشارات المستخدم لتغيير تردد الإشارة المستقبلة للتردد المتوسط يسمى أحياناً بالكاشف الأول لا سيما في الأنظمة المكروية التـي تسـتخدم مـازج بلّورة موجود داخل دليل موجة من نوع Magic-T . يقوم هذا الكاشف بالتقـاط أو كشف إشارة فرق ترددي كل من الإشارة المستقبلة وإشارة المذبذب المحلي .

كما نجد أن الكاشف غالباً ما يقصد به مزيل التعديل المستخدم لإزالة تعديل إشارة التردد المتوسط والذي يسمى أيضاً بالكاشف الثاني . يقوم هذا الكاشف باستخلاص إشارة الفيديو من إشارة التردد المتوسط اعتماداً على مطـال غلافهـا أو طورهـا والكشف عن وجود النبضات التي تدل على وجود أهداف داخل مجال الرادار .

وبما أن ليس كل نبضات الفيديو ناشئة عن أهداف حقيقية بل يمكن أن تنتج مـن أثر الضوضاء أو أثر الزخم ، فإننا نحتاج إلى وسائل لمعالجـة الإشـارة يمكنهـا اكتشاف نبضات الأهداف من غيرها بناء على قواعد وقياسات معينة . تعتمد عملية الكشف عن الأهداف وسط الضوضاء والزخم بعد المعالجة بصورة أساسية علـى تحديد مستوى للكشف Threshold of Detection والذي تعتبر مسـتويات الإشـارة الأعلى منه ناتجة عن أهداف صحيحة في حين تعتبر ما دونه ضوضاء وزخم .

تعتمد طبيعة مستوى الكشف على القاعدة المستخدمة لإجرائه وعلى طبيعة إشارة الفيديو ، إذ يمكن أن يكون جهداً كهربياً يقارن به مطال الإشارة أو مستوى قدرة أو طاقة النبضة أو أن يكون عدد النبضات القادمة من الهدف . يمكن أن يتم تحقيـق الكاشف بدوائر تماثلية أو رقمية أو باستخدام معالجات إشارة رقمية فائقة السرعة .

كما سبق نعلم أن الثنائيات Diodes تستخدم في إزالة تعديل الإشـارة الراداريـة بواسطة كاشف الغلاف لتقويم الإشارة قبل ترشيحها بواسطة مرشح LPF . للثنائي

خواص تربط كل من جهدي إشارة خرجه وإشارة دخله تعرف بقـانون الكاشـف[1] Detector Law والذي يعطي تقديراً لخواص الكاشف مثل الكاشف الخطي والـذي يتناسب فيه جهدا الإشارتين ، وقانون التربيع Square Law والذي يتناسب فيه جهد الخرج مع مربع جهد الدخل الصغير نسبياً .

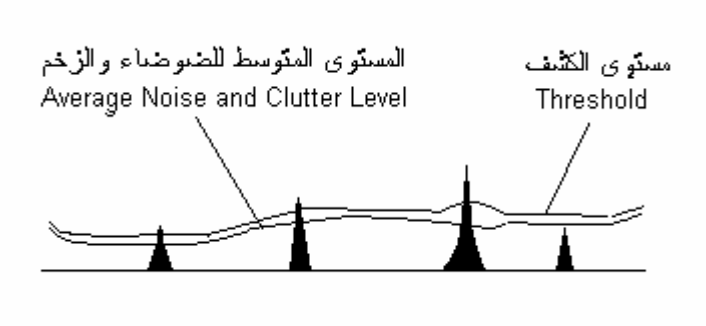
10-4 تثبيت معدل الإنذارات الكاذبة

لزيادة حساسية المستقبل وبالتالي رفع معدل كشف الأهداف ، عادة ما يتم اختيار مستوى الكشف بحيث يزيد قليلاً عن المستوى المتوسط للضوضاء باعتبار أن نسبة الإشارة إلى الضوضاء كبيرة لا سيما المحسوبة للضوضاء المنتجة داخـل النظـام نفسه System Noise .

إلا أن الرادار قد يستقبل من الخارج إشارات متداخلة تتعدى مسـتوى الكشـف وتصل إلى المبين كإنذارات كاذبة يمكن أن يزيد عددها ليغطي جزءاً كبيـراً مـن شاشة المبين ويشبع الذاكرة بالدوائر الرقمية المستخدمة ويقلل بالتالي مـن معـدل تدفق المعلومات عبر قنوات الاتصال .

إذا كان التغير في معـدل الإنذارات الكاذبـة False Alarm Rate FAR بطيئـاً ومتدرجاً ، فإن عامل الرصد الجالس أمام المبين يمكنه ضبط حساسية كـل مـن المستقبل والمبين بصورة يدوية عن طريق أدوات تحكم بلوحـة المفـاتيح . إلا أن التحكم اليدوي بطئ جداً خاصة في حال التشويش المتعمد والزخم غيـر المسـتقر إضافة لقلة الدقة في تحديد مستوى الكشف الأمثل .

تعمل بعض طرائق معالجة الإشارة علـى تثبيـت معـدل الإنـذارات الكاذبـة Constant FAR CFAR بصورة آلية دون التقليل من حساسية الرادار تجاه إشارات الأهداف الضعيفة كما يتضح من الشكل 4-10 أدناه . تعرف بعض طرائق معالجة CFAR في بعض المراجـع بتقنيـة مسـتوى الكشـف المتكيـف Adaptive [4،5] Thresholding .



الشكل 4-10 مستوى الكشف المتكيف

من الشائع في معالجة الإشارات الرادارية أن يتم تقسيم المدى الأقصى للـرادار إلى خلايا صغيرة امتداد الخلية الواحدة منها يعادل التمييز في المدى وتعرف بخلايا المدى Range Cell . يتم جمع المعلومات عن خلفية كل من الضوضاء والزخم في المنطقة المحيطة بكل هدف ومن ثم يجري ضبط مستوى الكشف لتلك المنطقة بناء على تلك الخلفية . استبدلت التقنيات التماثلية لتحقيـق CFAR بتقنيـات المعالجـة الرقمية للإشارات DSP ذات المرونة العالية في التصميم والدقة الكبيرة في الأداء . أبرز الطرائق المستخدمة لتحديد مستوى الكشف باستخدام المعالجة الرقمية طريقة تمييز المطال ، تمييز الطور وخريطة الزخم .

تعتبر طريقة تمييز المطال Amplitude Discrimination البديل الرقمي لمعالجـة الإشارة بواسطة التكبير اللوغريتمي والتفاضل السابق ذكرها فـي هـذا البـاب ، وتعرف أيضاً بطريقة إيجاد متوسط المدى أو متوسط الخلية Cell Averaging . يتم تقدير متوسط مطالات الإشارات في خلايا المدى المجاورة لكل خلية علـى حـدة ومن ثم يتم حساب نسبة الإشارة إلى التداخل . نسبة لأن التقدير يتم بناء على عدد محدود من العينات فإنه يتأرجح حول القيمة الحقيقية زيادة ونقصاناً وتعرف الزيادة اللازمة في نسبة الإشارة إلى الضوضاء للحصول على معدل الكشف المطلوب بفقد CFAR . تعتبر هذه الطريقة فعالة مع الزخم الناتج عن المطر وأمواج البحر ، إلا أنها أقل فاعلية مع الأهداف الأرضية ذات معدل التغير الكبير مع المدى .

في طريقة تمييز الطور Phase Discrimination يتم الاستغناء عـن المعلومـات المطالية في إشارات الصدى بتحديد Limiting مطالات الإشارات إلى مستوى أقل

من مستوى الضوضاء الطبيعي . يجري تمييز الإشارات وسط التـداخل اعتمـاداً على التغيير في زوايا الطور بعد التحديد لذا لا تعاني هذه الطريقة مـن معـدلات التغير الكبيرة حيث يتم فقط قياس مدى توافق إشارة الصدى مع العينات الطوريـة المحسوبة سلفاً .

تستخدم طريقة خريطة الزخـم Clutter Map لتوفير معدل كشف جيد للطائرات التي تطير بقرب مناطق الزخم . بخلاف الطريقتين السابقتين والتي تجري المعالجة بهما على أساس خلايا المدى ذات البعد الواحد ، فإن المعالجة تتم على أساس خلايا ثنائية البعد مثلما بالشكل 6-2 ، عمقها مدى وعرضها سمت وعبـر عـدد مـن دورات الهوائي . يتم تخزين بيانات توزيع الزخم أثناء دوران الهوائي على شـكل خريطة رقمية تستخدم للكشف عن الأهداف ذات البيانات المتغيرة . تصـلح هـذه الطريقة مع الزخم الثابت كالجبال وليست فعالة في حالة الـزخم غيـر المسـتقر كالمطر وفي حالات التداخل الشديد .

أسئلة وتمارين

1- أوجد شكل دالة الارتباط الذاتي لنبضة وحيدة عرضها τ ومطالها A .

2- اشرح الغرض من التكبير اللوغريتمي والتفاضل للإشارات الرادارية وكيفيـة تحقيقه مع الرسم . اشرح ما هو دور الثنائي الموصول في خرج المفاضل .

3- اشرح المقصود بالترشيح التوافقي للإشارات الرادارية مع ذكـر شـكل مـن أشكال النبضة المستخدمة قي ذلك .

4- اشرح فكرة التحكم الزمني بالتكبير ثم اكتب علاقة رياضية متوقعة بين كل من جهد التحكم بمعامل تكبير المكبرات والزمن .

5- وضح الفرق بين التكامل قبل وبعد الكشف .

6- تحدث عن طريقة CFAR المعروفة بإيجاد متوسط المدى أو متوسـط الخليـة وعلاقتها بإحدى طرائق المعالجة التماثلية .

7- بالمعادلات وضح أن خرج المرشح المتوافق مع الإشارة المرسلة يعادل دالـة الارتباط التقاطعي للإشارة المستقبلة مع الإشارة المرسلة مع تأخير زمني .

8- هوائي رادار زاوية شعاعه 2° يدور بسرعة 10RPM ، أوجد عدد النبضـات القادمة في الدورة من هدف نقطي بمجال الرادار إذا كان تردد تكرار نبضـته 300Hz .

الباب الخامس

تمييز الأهداف المتحركة

5-1 ظاهرة دوبلر

ظاهرة دوبلر Doppler Effect هي ظاهرة طبيعية مصاحبة لكل أشكال الموجات بما فيها الموجات الصوتية والموجات الكهرمغنطيسية . وتتلخص الظاهرة في أن الموجة المرسلة من مصدر ما إلى مستقبل بينه وبين ذلك المصدر حركة نسبية ، تصل إلى المستقبل بتردد يختلف عن التردد الأصلي للموجة .

إذا أمكننا التعبير عن المقدار اللحظي للموجة عند المرسل بدلالة كل من المطال A والتردد f أو التردد الزاوي ω وفقاً للعلاقة الجيبية التالية

$$\Psi (t) = A \cos 2\pi f t \qquad 5\text{-}1$$

$$\Psi (t) = A \cos \omega t \qquad 5\text{-}2$$

فإنه يمكن التعبير عن الموجة المستقبلة بدلالة زمن رحلتها بين المرسل والمستقبل t_d بالعلاقة

$$\Psi (t) = A \cos \omega(t + t_d) \qquad 5\text{-}3$$

والتي يمكن كتابتها كالتالي

$$\Psi (t) = A \cos (\omega t + \Phi) \qquad 5\text{-}4$$

حيث Φ زاوية الطورPhase Angle وتعادل

$$\Phi = \omega t_d \qquad 5\text{-}5$$

بما أن سرعة الموجة تكون ثابتة خلال عبورها لوسط ما ، فإن زمن رحلة الموجة بين المرسل والمستقبل وبالتالي زاوية طور الموجة يرتبطان بسرعة انتشار المـوجة v والمسافة المقطوعة r بالعلاقتين التاليتين

$$t_d = r / v \qquad 5\text{-}6$$

$$\Phi = \omega r / v = \beta r \qquad 5\text{-}7$$

حيث β ثابت الطور Phase Constant . بالاستفادة من المعادلة 8-1 فإن β تعادل

$$\beta = \omega / v = 2\pi / \lambda \qquad 5\text{-}8$$

في حال وجود تغير في المسافة r بين المرسل والمستقبل لوجود حركة نسـبية Relative Motion بينهما ، فإن زاوية الطور تتغير تبعاً لذلك التغير مما ينتج عنه تغيير في تردد الموجة المستقبلة نسبة لأن التردد الزاوي الناشئ هو معدل التغير في طور الموجة ويعادل

$$\omega_d = d\Phi / dt = \beta v_r \qquad 5\text{-}9$$

حيث v_r هي السرعة النسبية بين المرسل والمستقبل ، ويسمى التردد الناتج بتردد دوبلر أو بإزاحة دوبلر Doppler Shift ويعبر عنه بأي من المعادلتين

$$f_d = \omega_d / 2\pi = v_r / \lambda \qquad 5\text{-}10$$

$$f_d = (v_r / v)\ f \qquad 5\text{-}11$$

حيث تزيد إزاحة دوبلر بزيادة النسبة بين السرعتين وزيادة تردد الموجة f . تعتمد إشارة تردد دوبلر على اتجاه السرعة النسبية بين المرسل والمستقبل إذ يكون موجباً في حال تقاربهما لبعضهما وسالباً في حال تباعدهما عن بعضهما . ونجد أن تردد دوبلر في حالة الموجة المستقبلة من هدف متحرك بواسطة الرادار يتضاعف نسبة لمسار ذهاب ورجوع الموجة ، أي أن

$$f_d = 2 v_r / \lambda \qquad 5\text{-}12$$

إذا ما كانت السرعة النسبية بين الرادار والهدف بالعقدة knots ، والتي تعادل ميلاً بحرياً nautical mile واحداً في الساعة (1.852 كلم / ساعة) ، والطول الموجي بالأمتار ، فإنه يمكن حساب تردد دوبلر بالهيرتز بالعلاقة

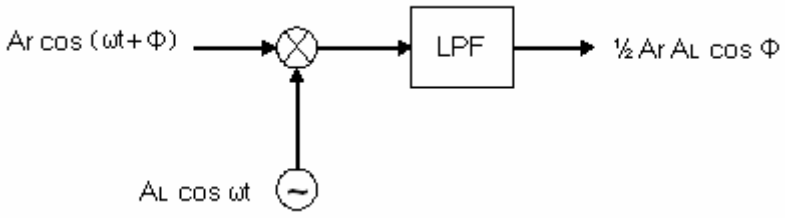
$$f_d = 1.03 v_r / \lambda \qquad 5\text{-}13$$

2-5 تمييز الأهداف المتحركة

يستقبل الرادار إشارات منعكسة من أهداف غير مرغوبة ولم يتم تصميم الرادار من أجلها يمكن تسميتها بالأهداف غير المرغوبة أو الزخـم Clutter والتي تعمل على تقليل أداء الرادار من حيث صعوبة تمييز الأهداف المطلوبة من بينها .

من أبرز الأهداف تلك الأهداف الثابتة كالجبال والمباني وسطح الأرض والتي تقوم بعكس الإشارات الرادارية في اتجاه الرادار . إضافة إلى أن بعض الأهداف المتحركة بسرعات بطيئة كالسحب والأمواج والطيور والمركبات الأرضية غالباً ما تُعتبر زخـماً . ويعتبر الزخم إضافة إلى الضوضاء والتداخل من أكبر العوائق بالنسبة للرادار ، فلذا كان لا بد من إيجاد طرائق لمعالجة الإشارات الرادارية المستقبلة للتقليل من أثر الزخـم . من أبرز المعالجات تلك تمييز الأهداف المتحركة Moving Target Indication ويختصر بالأحرف MTI ، والذي يعتمد في مبدأ عمله على ظاهرة دوبلر التي سبق شرحها .

في أنظمة تمييز الأهداف المتحركة القديمة نسبياً ، كان يستخدم مميز ترددات Frequency Discriminator أو مزيل التعديل الترددي للكشف عن التغير في تردد الإشارة المستقبلة عن المرسلة وبالتالي تمييز الهدف المتحرك . إلاّ أن هذه الطريقة ينقصها الاستقرارية خاصة في حال عدم استقرار مرسل الرادار نفسه .



الشكل 5-1 كاشف الطور

يستخدم كاشف الطور الحساس Phase Sensitive Detector لقياس زاوية طور الإشارة بالنبضة المستقبلة ومقارنتها مع زوايا طور الإشارة بالنبضات التي تليها . إذا تساوت زوايا الطور عبر النبضات المتتابعة ، فإن ذلك يدلّ على أنّها منعكسة

من هدف ثابت ، في حين يدلّ عدم تساويهن على أن الهدف يتحرك داخل مجال الرادار وبذا يمكن تمييزه من الأهداف الثابتة . يتكون كاشف الطور في أبسط صوره من ضارب أو مازج يتبعه مرشح تمرير منخفض LPF كما بالشكل 5-1 أعلاه . يعمل المازج على ضرب الإشارة المستقبلة مع إشارة مولّدة محلياً لها نفس تردد وطور الإشارة المرسلة من الرادار لنحصل على

$$v_x = A_r \cos (\omega t + \Phi) . A_L \cos \omega t \qquad 5\text{-}14$$

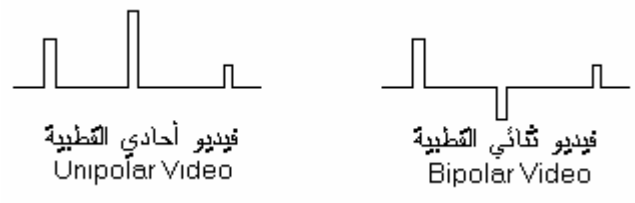
$$= \tfrac{1}{2} A_r A_L \{ \cos (2\omega t + \Phi) + \cos \Phi \} \qquad 5\text{-}15$$

وبعد الترشيح نحصل على

$$v_o = \tfrac{1}{2} A_r A_L \cos \Phi \qquad 5\text{-}16$$

تؤخذ إشارة دخل كاشف الطور عادة من خرج مكبرات التردد المتوسط بمستقبل الرادار وتمزج مع إشارة المذبذب المتزامن Coherent Oscillator ، المتزامن مع المرسل والذي يساوي تردده التردد المتوسط للمستقبل . إذا كانت إحدى إشارتَي الدخل بدلالة الجيب والأخرى بجيب التمام لحصلنا على $\tfrac{1}{2} A_r A_L \sin \Phi$.

هذا ويعتبر كشف الطور أحد طرائق إزالة تعديل إشارة التردد المتوسط إلى جانب كاشف الغلاف الذي تعرضنا له في الباب الثالث . إلاّ أن كاشف الطور يعتبر كاشفاً متزامناً لاعتماد إشارة خرجه على طور الإشارة المستقبلة إضافة إلى مطالها ، في حين يعتبر كاشف الغلاف كاشفاً غير متزامن لاعتماد إشارة خرجه على مطال الإشارة المستقبلة دون طورها . كما نراها في الشكل 5-2 أدناه ، فإن إشارة الفيديو الناتجة عن كاشف الطور ثنائية القطبية Bipolar لطبيعة دالة جيب التمام ، في حين أن إشارة الفيديو من كاشف الغلاف أحادية القطبية Unipolar موجبة أو سالبة حسب اتجاه الثنائي بدائرة الكاشف المبينة بالشكل 3-4 .

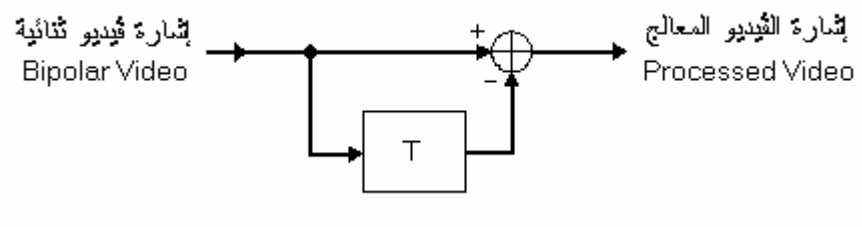


الشكل 5-2 قطبية إشارة الفيديو

3-5 مرشح الأهداف المتحركة

بعد إزالة تعديل الإشارة المستقبلة بواسطة كاشف الطور ، يتم ترشيح إشارة الفيديو لإلغاء الأهداف غير المرغوب فيها ومنعها من الوصول إلى مبين الرادار . عملياً لا يحدث إلغاء كامل ولكن يجري تقليل لمستوى الزخم وذلك باستخدام مرشحات MTI .

أبسط الأشكال لمرشحات MTI هو ذاك المرشح الذي يعرف بلاغي النبضتين Two-pulse Canceller وهو عبارة عن دائرة تقوم بتأخير نبضة الفيديو وطرح مطالها من مطال النبضة القادمة . يستخدم لذلك مؤخـر Delay زمن تأخيره يعادل فترة تكرار النبضة ، بالإضافة إلى طـارح Subtractor كما بالشكل 5-3 أدناه .



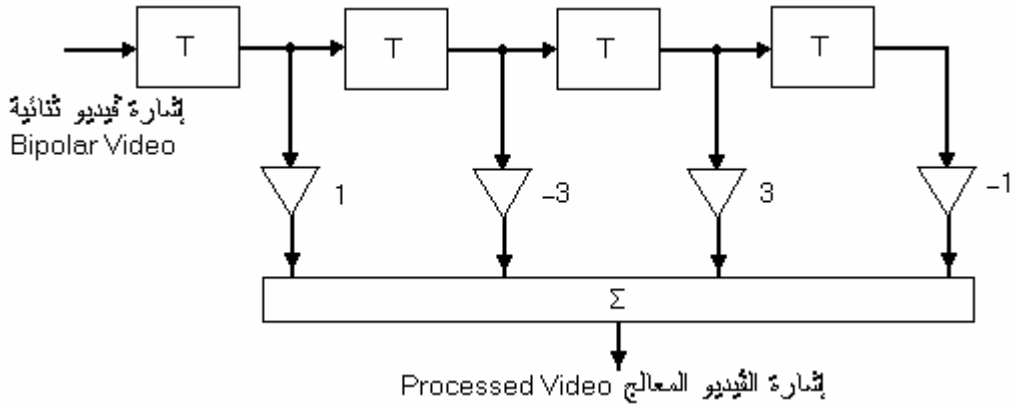
الشكل 5-3 مرشح MTI لاغي النبضتين

تتقابل النبضات المنعكسة من نفس الهدف كل فترة تكرار النبضة (أي بمعدل تردد تكرار النبضة) ليتم طرح مطالاتها . في حال تساوي مطالي نبضتين متتاليتين منعكستين من نفس الهدف ، يكون الخرج صفراً لتساوي زاويتي الطور بالنبضتين فيتم إلغاء نبضات الفيديو الناشئة عن الأهداف الثابتة . بالإضافة إلى إلغائها الأهداف الثابتة ، نجد أن عملية تمييز الأهداف المتحركة تقوم بتحسين نسبة إشارات الأهداف السريعة للأهداف البطئية الحركة وبالتالي زيادة وضوحها على شاشة الرادار وإن كانت ذات نبضات ضعيفة قبل إجراء عملية MTI . يمكن التعبير عن معامل تحسين MTI بالعلاقة

$$\textit{Improvement Factor} = SCR_o \; / \; SCR_i \qquad 5\text{-}17$$

حيث SCR هي نسبة الإشارة إلى الزخم Signal-to-Clutter Ratio . يمكن زيادة معامل تحسين MTI باستخدام عدة مرشحات موصلة على التتالي لتكوين لاغي

ثلاث نبضات أو أكثر . إلاّ أنه يفضل استخدام مرشحات MTI رقمية كالمرشحات المستعرضة Transversal Filters لسهولة تصميمها ومرونته حيث يتم ذلك فقط باختيار الأوزان a_n المناسبة للمرشح . نجد الأوزان تساوي [1,-1] في مرشح لاغي النبضتين ، [1,-2,1] في لاغي النبضات الثلاث ، [1,-3,3,-1] في لاغي النبضات الأربع مثل الموضح في الشكل 5-4 أدناه . لكل المرشحات نجد أن الوزن الأول $a_0 = 1$ وأن مجموع الأوزان يساوي صفراً .



الشكل 5-4 مرشح MTI رقمي

5-4 الاستجابة الترددية لمرشح MTI

إذا كان تردد دوبلر في الإشارة الرادارية المستقبلة من هدف معين أقل من السعة الترددية المثلى للمستقبل والتي تعادل مقلوب عرض النبضة ، أي إذا كان

$$f_d < 1/\tau \qquad 5\text{-}18$$

فإن تردد نبضات الفيديو الناتجة من كاشف الطور لذلك الهدف يعادل PRF ، في حين يتغير غلافها بتردد يعادل تردد دوبلر . يمكن التعبير عن غلاف جهد إشارة الفيديو ثنائية القطبية الناتجة في خرج كاشف الطور لعدة نبضات متتالية بالعلاقة

$$v_1 = k \sin (2\pi f_d t + \Phi_o) \qquad 5\text{-}19$$

حيث Φ_o الإزاحة في الطور اعتماداً على المدى ، k مطال الإشارة . غلاف جهد الإشارة قبل فترة زمنية تعادل فترة تكرار النبضة T يعطى بالعلاقة

$$v_2 = k \sin (2\pi f_d (t - T) + \Phi_o) \qquad 5\text{-}20$$

عند معالجة مرشح MTI لاغي النبضتين لإشارة خرج الكاشف ، تصبح إشارة خرجه

$$v = v_1 - v_2 \qquad 5\text{-}21$$

$$= 2\,k \sin(\pi f_d T)\cos(2\pi f_d (t - T) + \Phi_o) \qquad 5\text{-}22$$

باستخدام المتطابقة المثلثية لفرق جيبي زاويتين . الاستجابة الترددية للمرشح أو استجابة المطال هي القيمة المطلقة لدالة النقل وتعادل حاصل قسمة مطال جهد الخرج على مطال جهد الدخل حيث

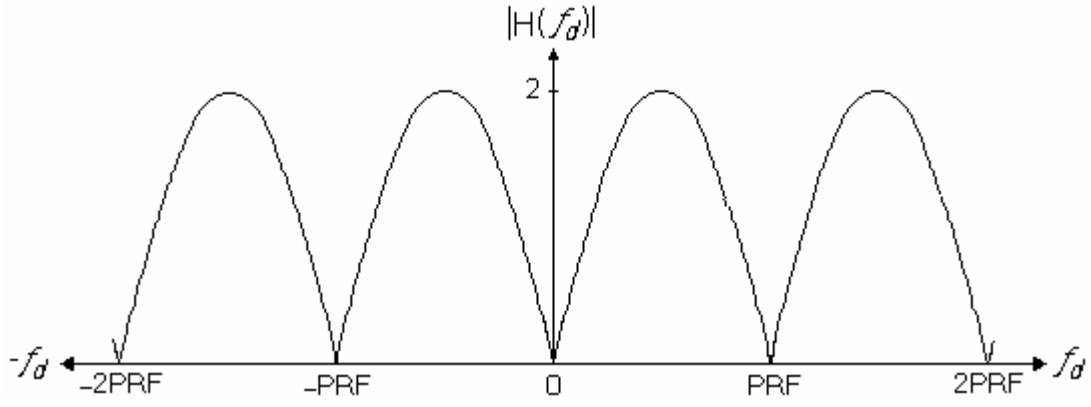
$$|H(f_d)| = 2 \sin(\pi f_d T) \qquad 5\text{-}23$$

يتضح من العلاقة أعلاه أن الاستجابة الترددية للمرشح دالة في تردد دوبلر ولها قيم صفرية عندما تساوي زاوية دالة الجيب بالزاوية π أو إحدى مضاعفاتها حيث

$$\pi f_d T = n\pi \qquad 5\text{-}24$$

$$f_d = n / T = n\,PRF \qquad 5\text{-}25$$

حيث $n = 0, \pm1, \pm2, \ldots$. الشكل 5-5 أدناه يوضح شكل الاستجابة الترددية لمرشح MTI لاغي النبضتين .



الشكل 5-5 الاستجابة الترددية لمرشح MTI

يتضح من شكل الاستجابة الترددية لمرشح MTI المبينة أعلاه أنها دالة دورية في تردد دوبلر نتيجة لدورية استجابة كاشف الطور لزاوية طور إشارة دخله ، حيث يتكرر مقدار الدالة الجيبية كل نصف دورة كاملة للزاوية .

5-5 السرعات العمياء

من شكل الاستجابة الترددية لمرشح MTI أعلاه ومن المعادلة 5-25 نجد أن خرج المرشح معدوماً عند ترددات دوبلر أخرى خلاف الصفر هي مضاعفات تردد تكرار النبضة PRF . نتيجة لذلك فإن المرشح لا يستبعد الأهداف الثابتة فحسب بل يستبعد أيضاً تلك التي تتحرك محدثة ترددات دوبلر تعادل تردد تكرار النبضة أو أحد مضاعفاته .

تعتبر هذه الظاهرة عيب من عيوب مرشحات تمييز الأهداف المتحركة وتنشأ نتيجة لحركة الأهداف بسرعات نسبية معينة من الرادار تعرف بالسرعات العمياء Blind Speeds لعدم تمكن الرادار من رصد تلك الأهداف رغم وصول إشارات الصدى منها .

لإيجاد السرعات العمياء للهدف ، نستخدم المعادلة 5-12 والتي تعطي تردد دوبلر بدلالة الطول الموجي λ ونعوض بدلاً عنه في المعادلة 5-25 لنحصل على السرعات العمياء

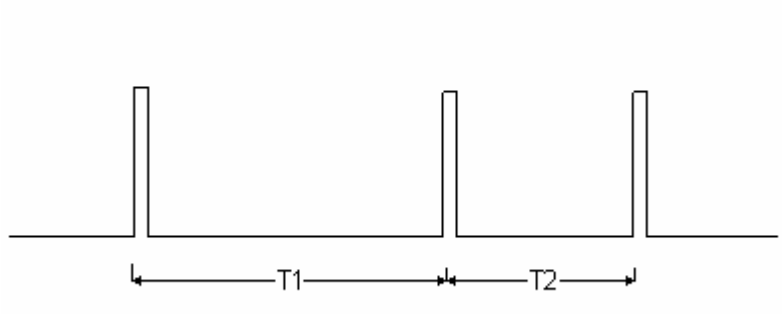
$$v_B = n\ PRF\ \lambda / 2 \qquad 5\text{-}26$$

يمكن إيجاد السرعات العمياء أيضاً بمعلومية أن إلغاء الهدف المتحرك بين موقعين عند نبضتين متتابعتين ناتج عن تساوي جيبي (أو جيبي تمام) زاويتي الطور في النبضتين رغم اختلاف الموقع . سبب ذلك هو تساوي الفرق في مدى الهدف بين الموقعين وأحد مضاعفات نصف الطول الموجي $\lambda/2$ ، أي أن

$$\Delta r = n\lambda / 2 \qquad 5\text{-}27$$

وذلك لدورية الطور مع المسافة كما يتضح من المعادلة 5-7 والمعادلة 5-8 . السرعات العمياء هي معدل الفرق في المدى بين الموقعين خلال فترة تكرار النبضة T مقلوب تردد تكرار النبضة ، وتعادل

$$v_B = \Delta r / T = n\ PRF\ \lambda / 2 \qquad 5\text{-}28$$



الشكل 5-6 تردد تكرار النبضة المترنح

للتخلص من عمى السرعات العمياء برادار MTI ، يتم تغيير تردد تكرار النبضة بصورة مستمرة وبنسق معين بما يعرف بتردد تكرار النبضة المترنح Staggered أو المتناثر Sparse . تضمن هذه الطريقة اختلاف السرعات العمياء بين كل نبضة وأخرى وبالتالي التمكن من رصد أي هدف متحرك ، سواء قصد الحركة بسـرعة عمياء بغرض تضليل الرادار أو لم يقصد ذلك .

5-6 زوايا الطور العمياء

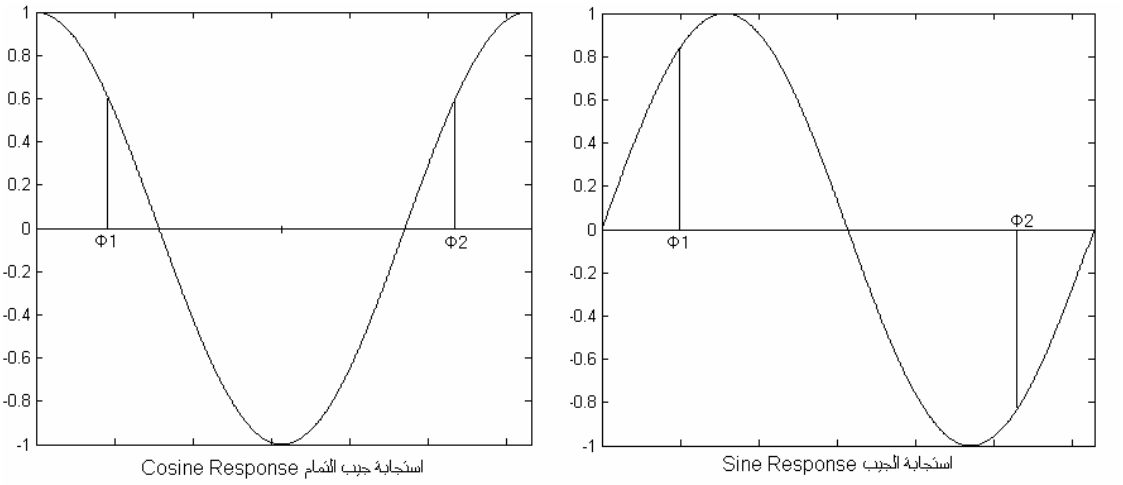
من عيوب مرشح MTI أيضاً زوايا الطور العمياء Blind Phases والتي تنتج من تماثل استجابة كاشف الطور حول منتصفه مما ينتج عنه تساوي جيبي تمام زاويتين مختلفتين وبالتالي تساوي إشارة خرجه لإشارتي دخل بأطوار مختلفة .

يؤدي عمى زوايا الطور هذا إلى إمكانية إلغاء مرشح MTI إلى هدف متحرك جاءت منه نبضتي صدى متتاليتين بزاويتين عمياوتين كما بالشكل 5-7 أدناه . كحل للمشكلة يتم استخدام كاشفي طور أحدهما استجابته دالة جيب التمام كالمعتاد ، بينما الآخر استجابته دالة الجيب بإزاحة طور إشارة المذبذب المتزامن COHO الداخلة إليه بمقدار $\pi/2$ كما بالشكل 5- 8 .

من شكل الاستجابتين أدناه ، نلاحظ أن أي زاويتين تظهران عمياوتين بأي من الاستجابتين لا تظهران كذلك بالأخرى . يتم ترشيح خرج أي من الكاشفين على حدة ومن ثم يتم جمع خرجي المرشحين جمعاً طورياً Phasor Sum للحصول على إشارة الفيديو المعالجة . إشارة خرج الكاشف الأول والناتجة عن استجابة جيب

التمام تسمى بالإشارة مشتركة الطور Inphase ، في حين تسمى إشارة خرج الثاني بالإشارة متعامدة الطور Quadrature .

في حال استخدام كاشف طور واحد فقط ، فإن جهد إشارة الفيديو ينعدم تماماً قبل الترشيح عندما تصل إشارة الصدى من الهدف إلى الكاشف بزاوية طور مقدارها{0,π} إذا كان من نوع الجيب ، أو بزاوية طور مقدارها{π/2,3π/2} إذا كان من نوع جيب التمام ، سواء كانت من هدف ثابت أو متحرك .



الشكل 5-7 الزوايا العمياء

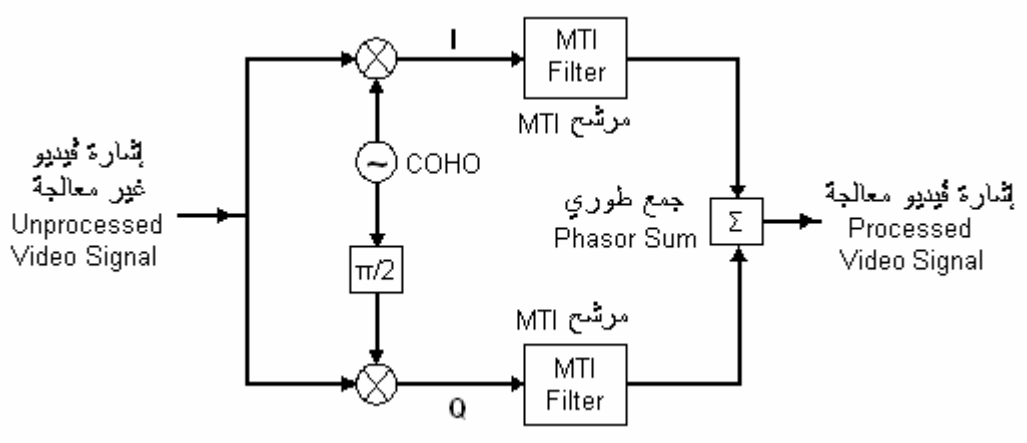
5-7 السرعات التماسية

ينتج تردد دوبلر في إشارة الهدف المتحرك عن السرعة النسبية بينه والرادار حسب العلاقة بينهما في المعادلة 5-12 . نجد أن السرعة النسبية ترتبط بكل من سرعة الهدف v وزاوية اتجاه حركته من الخط الواصل بينه والرادار ψ بالعلاقة

$$v_r = v \cos \psi \qquad 5\text{-}29$$

ينعدم تردد دوبلر عندما يسير الهدف بزاوية عمودية على الخط الواصل بينه والرادار أي عندما يتحرك بسرعة تماسية Tangential Speed فيقوم مرشح MTI بإلغائه من شاشة الرادار . لتفادي عيب السرعات التماسية يتم إضافة قناة غير متزامنة موازية لقناة MTI المتزامنة ثم يتم جمع إشارتي خرجيهما للحصول على إشارة ذات نسبة أهداف متحركة إلى زخم عالية .

من المعتاد أن يتوفر لعامل الرصد أداة للتحكم بمستوى سطوع الزخم الظاهر على الشاشة حسب ما يناسبه مثل التأكد من ضبط المدى بالمعايرة بأهداف ثابتة ومحددة لديه كالجبال وكذلك للحصول على خلفية تضاريسية للشاشة . كما يمكنه مراقبة انتشار السحب داخل مجال الرادار لإرشاد الطائرات دون الحاجة إلى رادار إرصاد جوي ، لذلك نجد أن القناة غير المتزامنة في بعض الأنظمة تعرف بقناة الطقس Meteo Channel .



الشكل 5-8 استخدام قناتين متزامنتين

على الرغم من عيوب نظام تمييز الأهداف المتحركة MTI ، إلاّ أنه يمتاز ببساطة تصميمه وقلة كلفته ويمكن تنفيذه باستخدام التقنيات التماثلية أو الرقمية . في الجانب الآخر نجد بعض التقنيات الرقمية المستخدمة لتقليل الزخم تتصف بالتعقيد وارتفاع الكلفة مقارنة مع تقنيات MTI والتي أبرزها ما يعرف بكشف الأهداف المتحركة Moving Target Detection ويختصر MTD ، والمستخدم في الرادار الدوبلري .

أسئلة وتمارين

1- هدف سرعته 360 knots يتجه نحو رادار تردده 300MHz ، أوجد تردد إشارة الصدى المستقبلة منه وإشارته .

2- أوجد الاستجابة الترددية لمرشح MTI لاغي النبضتين رياضياً وارسمها .

3- استنبط قانون عام للاستجابة الترددية لمرشح MTI لاغي أي عدد من النبضات .

4- اشرح الفروق بين الكشف المتزامن وغير المتزامن للإشارات الرادارية مستعيناً برسم كل من الكاشف وشكل إشارتي الدخل إليه والخرج منه في كل حالة .

5- هدف يسير في اتجاه الشمال الشرقي بسرعة 360 عقدة رصده رادار تردده 150MHz وتردد تكرار نبضته 250Hz عند زاوية اتجاه 270° ، أوجد تردد إشارة الصدى المستقبلة منه ثم أوجد السرعة العمياء التي يمكن أن يسير بها نفس الهدف في تلك اللحظة .

6- عدد واشرح عيوب مميز الأهداف المتحركة مع شرح العلاج المتبع لكل منها بالتفصيل .

7- ارسم دائرة لمرشح رقمي مستعرض لاغي ثلاث نبضات مع توضيح أوزان الضرب به .

8- قم بتصميم مرشح رقمي مستعرض لاغي خمس نبضات باستنباط أوزانه . الإجابة هي [1,-4,6,-4,1] .

9- باستخدام برنامج MATLAB ، أوجد الاستجابة الترددية للمرشح أعلاه وارسمها .

10- باستخدام برنامج SIMULINK ، قم بتصميم نموذج لمحاكاة كاشف الطور ومرشح مميز الأهداف المتحركة MTI لاغي النبضتين .

الباب السادس

معالجة البيانات الرادارية

1-6 مقدمة

من أبرز محدوديات رادار الاستطلاع التقليدي الحاجة إلى كادر بشـري عـالي التأهيل لتشغيل النظام إضافة إلى الحاجة إلى عدد من العاملين لتشغيله مما يعقد من ترتيبات العمل بينهم بصورة منسقة وسهلة في نفس الوقت .

أضف إلى ذلك محدودية الدقة في القياس بواسطة الحواس البشرية وعدم مقدرتها على الاستمرار لفترات طويلة دون راحة مما يستوجب تقسيم العمـل بـين عـدة أشخاص وبالتالي يزيد من العدد المطلوب للتشغيل . إلى جانب الدقة فـي القيـاس يصعب التعامل البشري مع عدد كبير من الأهداف وتتبعها على الشاشة في نفـس الوقت دون إغفال بعض منها .

يتم نقل المعلومات الرادارية في الأنظمة اليدوية بواسطة الاتصالات الصوتية مما يعمل على تقليل معدل تدفق المعلومات ويقلل مـن كفـاءة منظومـة الاسـتطلاع بمجملها . كما يتم تسجيل البيانات الرادارية عن الحركة الجوية على مدار السـاعة للاستفادة منها مستقبلاً سواء للتحليل أو مراجعة حركة العبـور بصـورة يدويـة بتدوينها على لوحات الرسم أو كتابتها على الورق مما يؤثر على صلاحية حفظهـا ومقدار الاستفادة منها .

نجد أنه رغم أن الكشف الأساسي عن الأهداف يتم بواسـطة وحـدات الـرادار الإلكترونية ، إلا أن القرار النهائي في تحديد نتيجة الكشف يقع على عامل الرصد أمام شاشة الرادار . العامل هو من يحدد إذا ما كانت البقعة Plot المعروضة على الشاشة تمثل هدفاً أم أنها إنذار كاذب ناتج عن قمة جبل يعرف مكانه أو أن بقعـة أخرى صغيرة يمكن أن تكون بسبب طائر كبير أو أخرى ناتجة من أثـر تـداخل محطة إرسال إذاعي في ذلك الاتجاه [7] . كما أن على عامل الرصد القيام بتتبع كل

الأهداف وفي آن واحد لتحديد مساراتها وتقدير سرعاتها دون حدوث التباس قد ينتج لتقاطع مسارات الأهداف المختلفة .

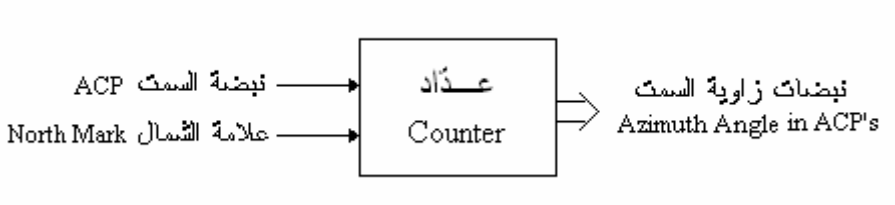
نسبة لما ذكر من محدوديات للكشف اليدوي وما يتبعه من تدني في الأداء وارتفاع في كلفة التشغيل ، كان لا بد من السعي إلى تطوير ما يمكن تطويره ليجري كل من الكشف والتتبع بشكل آلي . هذا وقد تحقق ذلك بإدخال التقنيات الرقمية والحاسوب للقيام بالكشف الآلي على الإشارات الرادارية وبمعالجة البيانات الرادارية Radar Data Processing بعد الكشف .

6-2 قياس الزاوية والمدى

في الأنظمة الرادارية التي تستخدم مبينات تقليدية مثل مبين المدى أو مبين المدى والسمت ، يتم الحصول على إحداثيات الهدف بصورة بيانية من الشاشة بواسطة عامل الرصد ، إذ لا توجد إشارة كهربية أو قيمة رقمية تعبر عن أي منهما بصورة مباشرة . حتى يتم الحصول على البيانات الرادارية ثم معالجتها ، يجب توفير إحداثيات الأهداف على شكل إشارات رقمية .

يتم الحصول على معلومات زاوية الهدف في الرادار بقياس زاوية اتجاه الهوائي لحظة وصول نبضة الصدى من الهدف وذلك عن طريق مجس للموضع Position Sensor مرتبط ميكانيكياً مع عمود دوران الهوائي . يعتبر المحول المتزامن Synchronous Transformer من أبرز مجسات الزاوية التي كانت تستخدم لضبط تزامن دوران خط المسح في مبين المدى والسمت مع دوران الهوائي . ذلك المحول عبارة عن مولد كهربي ذي وجهين أو ثلاثة أوجه .

تماشياً مع المعالجة الرقمية ، يكثر حالياً استخدام المضمن الضوئي Optical Encoder الذي يعطي مقدار الزاوية في صورة رقمية ويشتمل على عداد يعمل على عد نبضات ساعة السمت ACP's الناشئة بسبب دوران عمود الهوائي ، يتم تصفيره بواسطة نبضة علامة الشمال North Mark التي تنشأ عند مرور الهوائي باتجاه الشمال الجغرافي كما بالشكل 6-1 أدناه .



الشكل 6-1 المضمن الضوئي

من الباب الأول نعلم علاقة مدى الهدف بالزمن المحسوب مـن لحظـة انطـلاق النبضة المرسلة حتى وصول نبضة الصدى من الهدف . تنتج نبضات ساعة المدى RCP's من وحدات التزامن الأساسية بالرادار مع انطلاقة النبضة المرسلة وتستمر حتى اكتمال مدى الرادار لتعبر كل منها عن مدى محدد ، وعنـد ورود النبضـة المستقبلة من الهدف يتم تسجيل رقم نبضة ساعة المدى المطابقـة لهـا كمقيـاس للمـدى . تزداد الدقـة والتمييز في تحديـد المـدى بزيـادة عـدد النبضـات المستخدمة وبصغر عرض النبضة الرادارية المرسلة .

تسمى المساحة المكوّنة من أصغر مدى وزاوية يمكن تحديد مقـداريهما بخليـة المدى Range Cell والتي عادة ما تجري معالجة البيانات على أساسها . نلاحظ أن تعريف خلية المدى المشار إليه هنا لا يختلف عما سبق ذكره في تقنيـات CFAR لمعالجة الإشارة الرادارية بالباب الرابع .

3-6 الكشف الآلي

لتقليل الأخطاء الناتجة عن الكشف اليدوي للأهداف الرادارية ولتحسـين معـدل الكشف ، فقـد تم ابتكار عـدة تقنيات للكشـف الآلـي Automatic Detection . تختلف الكاشفات الآلية في فكرة عملها ولكن تتفق في مهامها وهي :

- تكامل نبضات الصدى المستقبلة
- اتخاذ القرار بوجود الهدف وشرعيته
- إيجاد إحداثيات الهدف .

كثير من خوارزميات الكشف تبدأ بطريقة أداء عامل الرصد الجالس أمام مبـين المدى والسمت ، والذي دوره الأساسي البحث عن تراكمات البقع على شاشة المبين والتي تمثل تكاملاً للنبضات القادمة من نفس الهدف . يهمل عامل الرصـد البقـع الصغيرة التي تنشأ من الانعكاس من أجسام صغيرة كالطيور ويهتم بالبقع الأكبـر والتي تمثل الأهداف ، بينما يهمل كذلك البقع الكبيـرة جـداً والتـي تنشـأ مـن الانعكاسات من الأجسام الضخمة كالجبال والمباني .

من تقنيات الكشف الآلي التماثلية الأساسية استخدام التكامل بعد الكشـف والـذي سبق ذكره في الباب الرابع وذلك لزيادة طاقة إشارة الفيديو إلى أعلى مستوى ممكن لها ، ثم تمريرها إلى كاشف طاقة للكشف عن الإشارات ذات مسـتويات الطاقـة الأعلى والناتجة من أهداف صحيحة .

أبرز الكاشفات الآلية الرقمية الشائع استخدامها هو كاشف النافـذة المنزلقـة أو المتحركة Sliding or Moving Window Detector ذو مستويي الكشف [1]. إشـارة دخل هذا الكاشف إشارة فيديو ثنائية ، تعرف بالأبيض والأسود B/W ، قام كاشف مستويات بإنتاجها من نبضات الفيديو متعددة المستويات المزال تعـديلها . تمثـل القيمة العليا للإشارة الثنائية قبول النبضة المستقبلة كنبضة صدى صحيحة وإن كان ذلك لا يعني تقرير وجود هدف صحيح بعد .

يعمل كاشف النافذة المتحركة كمكامل للنبضات حيث يقوم بتعداد نبضات الفيديو الثنائية داخل نافذته المتحركة ويقرر وجود بقعة صحيحة من هدف في حالة تحقيق عدد النبضات شروط الكشف وهي وقوعه بين المستوى الأدنى والمستوى الأعلـى للكشف ، أي أن

$$TH_L \leq \tilde{n} \leq TH_H \rightarrow \text{A Valid Plot Exists} \qquad 6\text{-}1$$

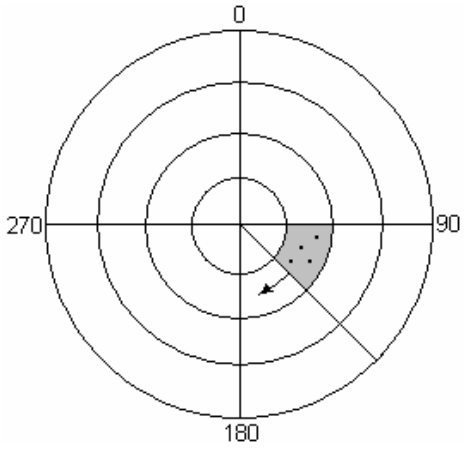
$$\tilde{n} < TH_L \text{ OR } \tilde{n} > TH_H \rightarrow \text{No Valid Plots Exist} \qquad 6\text{-}2$$

يعتمد تحديد مستويي الكشف المذكورين على مساحة نافذة الكاشـف ، إذ يجـب زيادة كل منهما في حال كبر مساحة النافذة التصميمية . أمـا في حالـة الزيـادة

الناتجة في مساحة النافذة للزيادة في مدى الهدف بالابتعاد عن المركز ، فإنه يجب تصغير كليهما . كما يعتمدان على تردد تكرار النبضة حيث يزيد أي منهما للزيادة المتوقعة في عدد النبضات المستقبلة حسب المعادلة 28-4 ، وبالمثل لزيادة المقطع الراداري للأهداف المراد رصدها .

يعمل كاشف النافذة المتحركة على البقع المخزونة بذاكرة النظام لتتحرك النافـذة الافتراضية على سطح مماثل لمجال عمل الرادار أو شاشة مبين المدى والسـمت بحيث تتقدم في اتجاه زيادة زاوية السمت في اتجاه عقارب الساعة ، وبحيث يزيـد موقع حافتها المتقدمة بما يعادل التمييز في السمت والذي يعـادل زاويـة شـعاع الهوائي Beamwidth كما بالشكل 6-2 أدناه .

بعد إكمال دورة كاملة حول المركز، تقفز النافذة إلى الخارج مبتعدة عن المركز لمواصلة دورة جديدة بما يعادل عمق خلية المدى والذي يحدد التمييز في المدى في خرج هذا الكاشف إلى جانب عرض النبضة الرادارية المستقبلة . في حال كشـف وجود هدف صحيح ، يتم أخذ مركز النافذة كتقدير لموقع الهدف المكتشـف بمـا يعرف اصطلاحاً بشطر الشعاع Beam Splitting .



الشكل 6-2 كاشف النافذة المتحركة

يزيد كاشف الطاقة بعد الكشف Post-detection من نسبة الإشارة إلى الضوضاء في وجود الضوضاء البيضاء ، في حين يستقبل كاشف النافذة المتحركة نبضـات ثنائية الجهد وبذلك لا يعتمد في أدائه على طاقة النبضة المستقبلة وبالتالي يعتبر ذو

كفاءة أقل من المكامل بعد الكشف المثالي . ولكننا بالمقابل نجد أن كاشف النافـذة المتحركة يعمل بكفاءة أعلى في وجود مصادر ضوضاء غيـر قاوسـية التوزيـع Non-Gaussian . يعرف الكاشف الآلي أيضاً في كثير من مراجع معالجة البيانات الرادارية بمستخلص البقع [8] Plot Extractor ، الذي عادة ما يتم تحقيقه باسـتخدام عدة معالجات رقمية للإشارة أو حاسوب ذي سرعة معالجة كبيرة .

4-6 التتبع أثناء البحث

من الباب الأول نعلم أنه يوجد رادار يعرف برادار التتبع ومن اسمه يتضـح أن وظيفته تتبع الأهداف أثناء حركتها داخل مجال عمله . يتتبع هـذا الـرادار هـدفاً واحداً في كل مرة بحيث يتجه شعاع الهوائي نحو ذلك الهدف بصورة مستمرة دون الالتفات لأهداف أخرى . يعرف هذا النوع من التتبع الراداري بالتتبع داخل الشعاع Within-beam Tracking والذي يستخدم في وحدات التحكم بالنيران ، وهو خـارج نطاق هذا الكتاب .

النوع الثاني من التتبع يعرف بالتتبع أثناء البحث Track-while-scan ، وتختصر TWS ، والذي يستخدم في أنظمة الاستطلاع بغرض تتبع الأهداف المكتشفة أثنـاء البحث عن أهداف أخرى ورصد مساراتها دون حدوث تغيير فـي حركـة دوران الهوائي والتي تتواصل بسرعة ثابتة .

تتم عملية التتبع أثناء البحث على البيانات الرادارية مباشرة بعد إجراء الكشـف الآلي أو استخلاص البقع التي سبق الحديث عنه . عادة ما يتم تحقيق هذه المعالجة الرقمية باستخدام حاسوب من النوع المعتاد ولكن ذو سرعة عالية وذاكرة كبيرة ، بخلاف الكاشف الآلي الذي غالباً ما يستخدم دوائر رقميـة أو معالجـات رقميـة للإشارة Digital Signal Processors ذات سرعات معالجة عالية مقارنة بالحواسيب التقليدية . يتم تصميم برنامج المعالجة بواسطة إحدى لغـات البرمجـة الموجهـة للكائنات OOP مثل لغة C++ [22] لتوافقها مع فكرة التعامل مع الأهداف الراداريـة التي تظهر وتختفي مما يتطلب إدارة محكمة لذاكرة الحاسوب [7].

يعمل معالج TWS على إنشاء مسارات للأهداف في الذاكرة عشوائية الوصـول RAM بعد التأكد من استمرارية وجود الهدف من بيانات البقع القادمة إليه . عـادة ما يبدأ البرنامج بإنشاء مسارات Track Initiation مـؤقـتة ، تتحول إلى مسارات دائمة في حال استمرار وجود الهـدف داخل مجال الرادار لأكثر من دورة واحدة للهوائي . يقوم البرنامج بإنعاش المسـارات بالبيانـات الراداريـة كالإحـداثيات والسرعة واتجاه الحركة Heading في كل دورة جديدة للهوائي بصورة مسـتمرة دون خلط بيانات أي هدف مع آخر . عند اختفاء هدف من مجال الرادار ، يقـوم البرنامج بالتأكد من ذلك في عدد من دورات الهوائي ثم يقوم بإنهـاء المسـارات Track Termination وذلك لتوفير الذاكرة لاستخدامها لأهداف أخرى .

من دواعي استخدام التتبع أثناء البحث الحاجة إلى استخدام مبينات رقميـة مثـل المبين المركب المشار إليه في الباب الثالث والذي يعتبر البديل الحالي لمبين المدى والسمت PPI التقليدي . يستخدم المبين بيانات المسار المرسلة إليه مـن حاسـوب التتبع أثناء البحث لتحديد موقع الهدف على الشاشة وتوضيح اتجاهه وكتابة بعـض البيانات كنص Text بجانب الرمز الممثل للهدف ، مثل تسمية الهدف أو ديباجتـه Label وإحداثياته وسرعته . كما يمكن رسم مسار الهدف على الشاشة على شـكل منحنى باستخدام مواقعه السابقة المسجلة في الذاكرة لإضفاء مزيد مـن التـأثيرات المرئية لعامل الرصد . تساعد هذه التأثيرات في تحليل طبيعة الهـدف المرصـود بشكل سهل ومريح ومقارنة مساره مع خطة الطيران Flight Plan المعـدة له مـن قبل السلطات وإذا ما قام بخرقها .

في كثير من الحالات يوضع مبين الرادار في مكان بعيد عـن الـرادار كبـرج المراقبة بالمطار أو مركز مراقبة عسكري لاختلاف بيئة العمل الخاصة بالرصـد عن بيئة الرادار . كما أنه قد تدعو الحاجة إلى نقل البيانات الرادارية إلى أمـاكن بعيدة جداً كمراكز التحكم بالحركة الجوية Air Traffic Control أو مراكـز قيـادة منظومات الدفاع الجوي مما يستوجب إرسالها عبر وسـائط الاتصـال المختلفـة كالألياف البصرية وشبكات الهاتف والاتصالات اللاسلكية .

يعتبر التتبع أثناء البحث من وسائل تقليل السعة الترددية للإرسال مما يقلل من كلفة نقل المعلومات الرادارية ، حيث يتم بعد المعالجة إرسال بيانات مسارات الأهداف فقط وليس إرسال نبضات الفيديو ذات الطيف الكبير . كما لا تصبح هنالك ضرورة لإرسال نبضات تزامن الرادار ودوران الهوائي والتي كانت تحتاج لقنوات مستقلة إضافية بخلاف المستخدمة لنقل الفيديو .

في أنظمة الكشف والتتبع الآلي لا بد من تحسين معالجة الإشارة الرادارية مثل معالجة MTI ومعالجة CFAR وذلك لتقليل كل من الزخم والضوضاء ، وحتى لا تصل بيانات عن أهداف غير حقيقية إلى المتتبع أثناء البحث مما يسبب تشبعاً للذاكرة عشوائية الوصول RAM .

5-6 تنعيم المسارات

من أهم القرارات التي يجب اتخاذها في نظام التتبع أثناء البحث هو تحديد إذا ما كانت البقعة الجديدة المكتشفة بواسطة الكاشف الآلي تنتمي إلى أحد مسارات الأهداف الموجودة سلفاً أم أنها ناتجة عن هدف مكتشف لأول مرة ويحتاج إلى إنشاء مسار جديد خاص به .

في حال تقرير تبعية البقعة الجديدة لأحد المسارات القديمة تطل إشكالية تحديد ذلك المسار من بين المسارات الأخرى ، لا سيما بالنسبة للمسارات القريبة من بعضها وبالأخص المسارات المتقاطعة . يستفاد من ماضي الهدف من البيانات المخزونة في المسار على الذاكرة لتقدير أو تخمين الموقع المستقبلي للهدف باستخدام مرشح تنبؤي Prediction Filter يعمل على بيانات المسار .

يتم تخزين الموقع المتنبأ به بالذاكرة لاستخدامه للمقارنة مع مواقع البقع الجديدة التي ترد إلى النظام بإحداثيات تم قياسها فعلياً بالرادار . من الطبيعي أن يحدث خطأ في تقدير الموقع ، إلا أنه تُحسب القيمة المتوسطة للموقع بالإضافة إلى قيمة لتقدير الخطأ Error Estimation تستخدم في إيجاد التقدير التالي المتنبأ للموقع .

إن تطبيق الترشيح التنبؤي في التتبع الآلي للأهداف يساهم أيضاً في تنعيم المسارات Track Smoothing بترشيحها بتمرير الترددات الدنيا LPF مما يحسن من انسيابية المسار وتقليل التعرجات به . كما أن استخدام مرشحات تنبؤية متطورة تدخِل في حساباتها الطبيعة الإحصائية للرادار وللأهداف وكل ما يتعلق بقياس الإحداثيات يزيد من دقة القياس ويقلل الخطأ فيه بدرجة كبيرة تمكن حتى من تصحيح الخطأ في القياس الفعلي للإحداثي .

تستخدم في أنظمة التتبع عوامل موازنة Weighting Factors تعتمد قيمها على معرفة أخطاء الرادار نفسه وكيفية توزيع تلك الأخطاء . يتم ضبط قيم تلك العوامل في بعض المتتبعات بصورة آلية بناء على نجاح عملية التقدير والذي يعتمد على مقدار معدل الأخطاء بالنسبة للزمن ، وتعرف في الأدبيات بالترشيح المتكيف Adaptive Filtering .

تتضح مزايا الضبط الآلي لعوامل الموازنة في المرشحات التنبؤية عندما نأخذ في الاعتبار مدى التغير الكبير الذي قد ينشأ في دقة قياس الرادار والتي تتأثر بتغير قدرة الإشارة المستقبلة ، عدم استقرار دوائر النظام ، تقلبات الجو ، تنوع الزخم ، أثر الضوضاء وتباين المقاطع الرادارية للأهداف .

الترشيح التنبؤي هو عبارة عن خوارزمية رياضية يمكن تحقيقها باستخدام الدوائر الصلبة أو بواسطة البرمجيات كما هو الحال بالنسبة لنظام التتبع أثناء البحث في الرادار . توجد عدة مرشحات تنبؤية تستخدم في مختلف الأغراض كالتحكم بالأنظمة اللا خطية وتصحيح أجهزة القياس وتوجيه الصواريخ والقذائف وفي أنظمة الاتصالات الرقمية ، تختلف عن بعضها في الدقة والسرعة وتعقيد التصميم ومقدار الكلفة .

من المرشحات الأكثر شيوعاً لا سيما في نظم الاستطلاع المدنية مرشح أو متتبع ألفا وبيتا Alpha-Beta Tracker ، وذلك لبساطة تصميمه وسهولة دمجه كجزء من برنامج التتبع أثناء البحث [7].

6-6 متتبع ألفا وبيتا

تأتي بساطة هذا المرشح من استخدامه لعوامل موازنة ذات قيم ثابتة لا تتغير آلياً مع تغير الخطأ في تقدير الموقع . يستخدم المرشح عاملين للموازنة قيمة كل منهما أكبر من صفر وأقل من واحد صحيح ، أحدهما α ويتعلق بالخطأ في تقدير الموقع والآخر β والذي يتعلق بالخطأ في تقدير السرعة . في صورته الرياضية [1]، يقوم متتبع ألفا وبيتا بحساب كل من الموقع المنعم Smoothed Position الحالي والسرعة المنعمة الحالية بالمعادلات التالية

$$\underline{x}_n = x_{pn} + \alpha (x_n - x_{pn}) \qquad 6\text{-}3$$

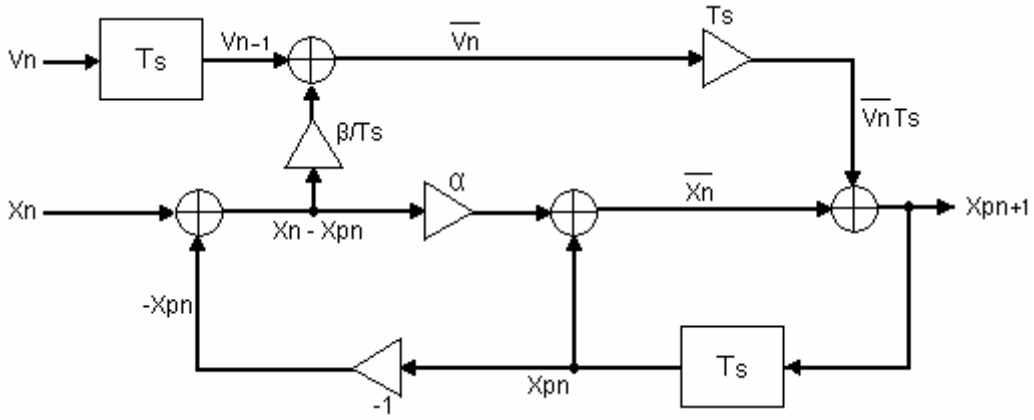
$$\underline{v}_n = v_{n-1} + \beta (x_n - x_{pn}) / T_s \qquad 6\text{-}4$$

حيث x موقع الهدف بالنسبة للرادار سواء كان مدى أو زاوية ، x_n القيمة المقاسة بواسطة الرادار لموقع الهدف في الدورة الحالية n ، x_{pn} الموقع الذي جرى التنبؤ به مسبقاً للهدف لدورة الهوائي الحالية ، في حين أن T_s هو زمن الدورة الكاملة الواحدة ويمثل فترة أخذ العينات .

يتضح من المعادلات أنّه إذا كانت $\alpha = 0$ فإن الموقع المنعم للهدف يعادل الموقع المتنبأ به سابقاً ولا يتأثر بالخطأ في التنبؤ ، في حين إذا كانت $\alpha = 1$ فإن الموقع المنعم يعادل الموقع المقاس بواسطة الرادار ولا يتأثر بالتنبؤ . بالمثل فإنّه إذا كانت $\beta = 0$ فإن السرعة المنعمة للهدف تعادل السرعة المقاسة السابقة للهدف بأخذ أنّه يتحرك بسرعة ثابتة ، في حين إذا كانت $\beta = 1$ فإن السرعة المنعمة تصحح بمعدل تغير الخطأ في تنبؤ الموقع . يستخدم كل من الموقع المنعم والسرعة المنعمة لإيجاد الموقع المتنبأ به في الدورة القادمة n+1 كما يلي

$$x_{p(n+1)} = \underline{x}_n + \underline{v}_n T_s \qquad 6\text{-}5$$

يمكن تحقيق هذا المتتبع باستخدام المرشح الرقمي المبين بالشكل 6-3 أدناه والذي يستخدم مؤخرين Delays اثنين لتخزين القيم الحالية لهذه الدورة إلى الدورة القادمة بتأخير يعادل زمن دورة الهوائي T_s .



الشكل 6-3 متتبع ألفا وبيتا

إذا كان الرادار غير مجهـز لقياس السرعة من تردد دوبلر الناتج عـن حركـة الهدف ، يمكن حساب السرعة المتوسطة للهدف بين موقعين خـلال دورة واحـدة للهوائي بالعلاقة [7]

$$v_n = (x_n - x_{n-1}) / T_s \qquad 6\text{-}6$$

$$x_{p(n+1)} = (1 - (\alpha+\beta))\, x_{pn} + (1 + (\alpha+\beta))\, x_n - x_{n-1} \qquad 6\text{-}7$$

وكحالة خاصة إذا كانت $\alpha+\beta = 1$ ، فإن الموقع المتنبأ به للدورة القادمة

$$x_{p(n+1)} = 2\, x_n - x_{n-1} \qquad 6\text{-}8$$

للحصول على أفضل تنعيم ممكن ، يجب إيجاد قيمتي العامِلَين ألفـا وبيتا بإجراء تجارب عملية على نظام الرادار المراد استخدام المرشح به وللأهداف التي صـمم من أجلها . إلا أن بـندكت Benedict قام باقتراح العلاقة التالية بينهما في أنظمـة التتبع أثناء البحث [1] للحصول على قيم مثـلى

$$\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha) \qquad 6\text{-}9$$

يمكن توسيع متتبع ألفا وبيتا ليشمل العجلة بالإضافة للموقع والسـرعة لإعطـاء نتائج أفضل ، ليعرف بمتتبع ألفا – بيتا – قاما . ورغم بسـاطة خوارزميـة هـذا المرشح وسهولة تحقيقه ، إلا أننا نجد أن متتبع ألفا وبيتا ذو أداء أقل مع الأهـداف ذات المناورة العالية كالمقاتلات ويفضـل استخدام مرشحات تنبؤية أخرى لمواجهة تلك المشكلة أبرزها مرشّح كالمان Kalman Filter العادي أو المطور .

7-6 ترشيح البقع الكاذبة

يتم رفع حساسية مستقبل الرادار للحصول على معدل الكشف الأقصى الذي يوفر عدداً أكبر من الأهداف ويزيد من مدى الكشف كما سبق ذكره في الباب الثـاني . إلا أن ذلك الإجراء قد يترتب بسببه إنتاج مستخلص البقع لعدد كبيـر مـن البقـع الكاذبة ويزيد من معدل الإنذارات الكاذبة FAR .

يعمل معالج الإشارة على تقليل تلك الإنذارات الكاذبة الواصلة إلـى مسـتخلص البقع بقدر استطاعته قبل مرحلة الكشف الآلي . تُرشَح بيانات البقع الكاذبة المتجهة إلى المتتبع بواسطة مرشح البقع الكاذبة False Plot Filter .

تعتبر فكرة عمل هذا المرشح بسيطة حيث يقوم بتخزين كل البقع صحيحة كانت أو كاذبة في مسار انتقالي لا تنتقل البقع منه إلى المتتبع أو إلى المبين إلا بعـد أن يستوفي المسـار شروطاً معينة . عادة يتحقق ذلك بعد توفر البقعة المشتركة الثالثة حيث تستخدم كل من البقعة الأولى والثانية لتأسيس المسار الانتقالي ولا تنتقلان من المرشح إلى المتتبع بل تظلان مخزونتين بفرضية اشتراكات أخرى فـي المسـار لاحقـاً .

في عملية التتبع أثناء البحث يجب أن توجد بقعة واحدة ابتدائية على الأقل لإنشاء المسار ولا تُعرض البقع التي لا تكون مسارات على المبينات . لذا فإن اسـتخدام هذه الطريقة في التتبع وترشيح البقع الكاذبة يمكن الرادار من العمل بحساسية عالية جداً وبمعدل إنذارات كاذبة منخفض ، حيث يصل احتمال الإنذارات الكاذبـة Pfa إلى أقل من واحد في المليون [8].

أسوة بترشيح البقع الكاذبة يستخدم مرشح الأهداف الكاذبة False Target Filter [7] وذلك لمعالجة البيانات الرادارية كجزء من المتتبع لإلغاء الأهداف الثابتة والبطيئـة كالسيارات بما يشبه عملية تمييز الأهداف المتحركـة MTI لمعالجـة الإشـارات الرادارية . إضافة لذلك يتخذ القرار بإنهاء مسار أي هدف لا يتمكن الرادار مـن الاستمرار برصده لخروجه خارج مجال الرادار أو لانخفاض ارتفاعه .

8-6 تشكيل البيانات المرسلة

يقوم المتتبع أثناء البحث بإرسال بيانات مسارات الأهداف إلى الجهات المستفيدة الأخرى مثل المبينات المركبة ، مسجلات البيانات الرادارية وأنظمة التتبع المتعدد وذلك عبر منافذ الاتصالات المتسلسلة Serial Communications المختلفة .

تستخدم المنافذ الأساسية للحاسوب مثل منفذ RS232 أو منفذ الشبكة Ethernet لإرسال البيانات الرادارية إلى الوحدات القريبة من حاسوب المتتبع مباشرة ، مثل المبين المركّب المصاحب للرادار بغرض الضبط والصيانة أو إلى مراكز المراقبة المحلية القريبة للرادار . أما الإشارات المراد إرسالها إلى مواقع بعيدة فتحتاج إلى التعديل الرقمي Digital Modulation ، سواء كان ذلك لإرسالها عبر كوابل نحاسية أو ألياف بصرية أو عبر الأثير وذلك باستخدام المعدل/مزيل التعديل Modem المناسب لقناة الاتصال المستخدمة .

عادة ما تُستخدم نفس قناة الاتصال للتحكم بالرادار ومراقبته بما يعرف بأنظمة التحكم والمراقبة من بعد Remote Control and Monitoring Systems ، وتختصر RCMS . يمكن عن طريق هذه الأنظمة إيقاف أو تشغيل أي من وحدات الرادار أو ضبطها من بعد ، بالإضافة إلى مراقبة أداء مختلف الوحدات أثناء عملها مع استمرار انسياب البيانات الرادارية من الرادار .

يحتاج إرسال الإشارات الرقمية إلى أن تكون بنية البيانات Data Format معلومة لدى كل من جهتي الإرسال والاستقبال وذلك لفك رموزها ومعرفة ترتيب المعلومات التي تحملها . لاختلاف الشركات المصنعة وتباين النظم الرادارية نجد أن هنالك عدة بنيات لبيانات الرادار مستخدمة في شتى أنحاء العالم بعض منها عسكرية وأخرى مدنية تختلف باختلاف البلدان واختلاف الأحلاف العسكرية والتوزيعات الجغرافية . من البنيات المستخدمة والمدمجة كبنية اختيارية في كثير من المبينات المركبة المستخدمة في أنظمة الاستطلاع ، البنية القياسية لمنظمة الطيران المدني العالمية ICAO والتي تعرف ببنية الطيران المدني CA Format .

وكذلك نجد البنية الأوربية المتطورة أستريكس ASTERIX (وهي اختصار للجملة All Purpose Structured Eurocontrol Radar Information Exchange) ، إضافة إلى بنيات مدنية وعسكرية أخرى مختلفة .

في بنية الطيران المدني[8]، يتم تقسيم البيانات إلى حقول Fields ، طول كل حقل 13 بت واحدة منها لسلامة البيانات Parity Bit . تدمج الحقـول لتشـكل رسـائل Messages طـول كل منها أربعة حقول في حالة إرسال بيانات رادار الاستطلاع الأولي PSR فقط . أما في حالة وجود رادار استطلاع ثانوي SSR يشارك الرادار الأولي نفس معالج البيانات ، كما يرد في الباب التاسع ، فتُستخدم سبعة حقول .

الحقل الأول لأي رسالة هو الحقـل العاطل Idle Field ويرسل وحده في الرسائل العاطلة عندما لا توجد بيانات مرسلة . الرسائل العاطلة ذات حقل واحد ونمط ثابت وسلامة بيانات زوجية Even Parity كما يوضح الشـكل 6-4 أدنـاه ، وتسـتخدم بغرض التزامن حيث ترسل رسالة عاطلة واحدة على الأقل بعد كل رسالة .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

الشكل 6-4 الرسالة العاطلة

من الرسائل التي ترسل من المتتبع تلك التي تحمل بيانات الهـدف ، وحقولهـا الأربعة هي حقل الهوية ID ، المدى ، السمت وحقل امتداد سمت الهدف . البـت الأولى بحقل الهوية تساوي '1' فقط عندما يقوم المتتبـع بإنتـاج أهـداف محاكـاة Simulated وإرسالها إلى المبين بغرض التدريب أو الضبط . تمثل الكلمة المكونة من البت رقم2 إلى البت رقم12 هوية الهدف أو ترتيبه بين الأهداف والبت رقم13 لسلامة البيانات كما بالشكل 6-5 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	P

الشكل 6-5 حقل الهوية

الكلمة المكونة من البت رقم1 إلى البت رقم12 بحقل المدى تمثل المدى المائـل Slant Range للهدف بتمييز يعادل 1/16 من الميل البحري حيث البت رقم1 هـي البت ذات الدلالة العظمى MSB والبت رقم13 لسلامة البيانات كما بالشـكل 6-6 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
128	64	32	16	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/16	P

الشكل 6-6 حقل المدى

الكلمة المكونة من البت رقم1 إلى البت رقم12 بحقل السـمت تمثـل سـمت أو زاوية اتجاه الهدف من الرادار بالنسبة لاتجاه الشمال ، بتمييز 0.088° وتقابله نبضة سمت ACP واحدة كما بالشكل 6-7 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
204	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	P

الشكل 6-7 حقل السمت

البت رقم1 بحقل امتداد سمت الهدف تساوي '0' ، في حين من البت رقم2 إلـى البت رقم6 تمثل امتداد السمت Azimuth Runlength للهدف أو عرضه بنبضـات السمت . من البت رقم7 إلى البت رقم12 تمثل الزمن الذي استغرقته الرسالة فـي المعالج كما بالشكل 6-8 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	64	32	16	8	4	4	2	1	1/2	1/4	1/8	P

الشكل 6-8 حقل امتداد سمت الهدف

6-9 التتبع المتعدد

يمكن استخدام رادار الاستطلاع لتغطية مجال جوي محـدد بالمـدى الأقصـى للرادار الذي يعتمد على كل من فترة تكرار نبضته وعناصـر معادلـة الـرادار المعلومة . من الصعب تغطية كل المجال الجوي لمعظم البلدان لا سـيما الكبيـرة

منها باستخدام رادار واحد نسبة لمحدودية مدى الرادار ولأثر كروية الأرض في كشف الأهداف البعيدة ذات الارتفاعات المنخفضة . وبما أنه يفضل استخدام عدة ترددات وخصائص رادارية مختلفة ، فإن الأنظمة الرادارية عادة ما تعمل في داخل شبكات مشكلة من عدد من تلك الأنظمة .

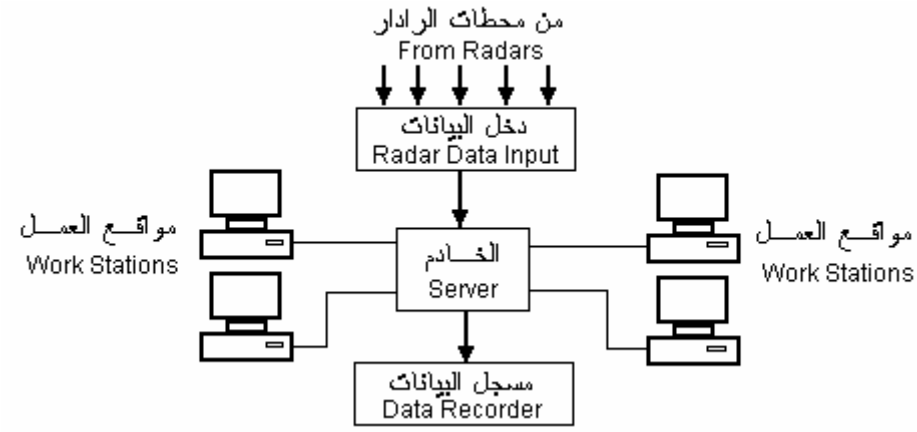
في السابق كانت تلك الشبكات الرادارية موصولة عن طريق الاتصالات الصوتية لتبادل المعلومات فيما بين أطرافها . إلا أنّه بعد التقدم الذي طرأ في كل من الكشف والتتبع الآلي وتطور تقنيات الاتصالات الرقمية أصبح نقل البيانات عبر الشبكات يتم بصورة آلية وسريعة . تستخدم وسائط الاتصال المختلفة كخطوط الهاتف التقليدية والألياف البصرية والاتصالات اللاسلكية والفضائية في نقل البيانات الرادارية من محطات الرادار المنتشرة في كل البقاع إلى مراكز لتجميع وتحليل المعلومات .

في ظلّ هذا التحول في تقنيات ومفاهيم الاستطلاع ، تطور أسلوب معالجة البيانات الرادارية بالشبكة ليتم دمج بيانات مسارات الأهداف المستقبلة من عدة محطات رادارية في متتبع واحد مشكلاً ما يعرف اصطلاحاً بمنظومة التتبع المتعدد للأهداف Multi Tracking . يمكن في هذه الحالة عرض المعلومات على شاشات المراقبة بحيث يظهر كل المجال الجوي المغطى بعدة محطات رادار كما لو كان مغطى برادار واحد فقط .

تشتمل منظومة التتبع المتعدد على عدة مواقع عمل Workstations بها حواسيب موصولة في شكل شبكة محلية LAN كما بالشكل 6-9 أدناه . كما تشتمل المنظومة على معدات للاتصال بين المنظومة ومحطات الرادار وعلى وحدات لتسجيل البيانات الرادارية لعرضها وتحليلها مستقبلاً .

كما يتم في مراكز التحكم بالحركة الجوية ATC تسجيل المحادثات الصوتية بين كل من الموجهين والمراقبين الجويين من جهة والطيارين أثناء تحليق طائراتهم من جهة أخرى . مثال لنظم التتبع المتعدد المستخدمة منظومة توباز [9] Topaz والتي

تستقبل البيانات الرادارية من ثماني محطات رادار استطلاع في وقت واحد وذلـك لعرضها وتحليلها بمركز المراقبة والسيطرة .



الشكل 6-9 منظومة التتبع المتعدد

من بين التقنيات المستخدمة في التتبع المتعدد تقنية توسيط المسارات حيث تتقاطع مجالات عمل محطات الرادار الموجودة بالشبكة وترصد نفس الأهداف من أكثـر من محطة . تقوم منظومة التتبع المتعدد بأخذ متوسط معلومات مسارات الهدف من المتتبعات المحلية لكل رادار ثم تعمل على تأسيس مسار لذلك الهدف فـي ذاكـرة المنظومة لتخزين بياناته بعد معالجتها .

لكننا نجد أن توسيط المسارات محلياً [5] Local Track Averaging LTA بـإجراء التنعيم للمسارات في كل متتبع محلي على حدة ثم إجراء عملية التنعيم مرة ثانيـة بمنظومة التتبع المتعدد ، أو ما يعرف بالتوسيط المزدوج Double Averaging ، قد يؤدي إلى خطأ التنعيم المتكرر . ينتج ذلك الخطأ نسبة لتكرار إجراء التنعيم الأمر الذي من شأنه تقليل مقدرة المتتبع المتعدد على كشف مناورات الأهداف لا سـيما السريعة منها .

أسئلة وتمارين

1- تحدث عن دواعي معالجة البيانات الرادارية .

2- بالرسم عدد مراحل انتقال الإشارة المستقبلة والبيانات بالرادار بعد خروجهـا من المزدوج .

3- صف كيفية عمل كاشف النافذة المتحركة . وضح إذا ما كان يمكن اعتبار هذا الكاشف مكاملاً للنبضات الرادارية .

4- رادار عرض نبضته المرسلة 1μs وزاوية شعاع الهوائي المستخدم به 2° ، ما هو العدد الكلي للنوافذ التي يمر بها كاشف النافذة المتحركة في كل دورة للهـوائي إذا كان تردد تكرار نبضة الرادار 333Hz .

5- اشرح المقصود من أن المتتبع أثناء البحث يقلل من السعة الترددية اللازمـة لنقل المعلومات الرادارية .

6- أذكر الغرض من استخدام المرشحات التنبؤية في التتبع بالرادار .

7- بالمعادلات أشرح طريقة عمل مرشح متتبع ألفا وبيتا ثم ارسم تركيب مرشـح رقمي للمرشح مع توضيح القيم المستخدمة وإشارات دخل وخرج كل مرحلة مـن مراحل المرشح .

8- مستخدماً بنية الطيران المدني ، اكتب شفرة الرسالة الرقمية الثنائيـة Binary المرسلة من متتبع أثناء البحث والخاصة بهدف هويته 0137 ، مداه مـن الـرادار 240km ، زاوية اتجاهه أو سمته 75° وامتداد سمته سبعة نبضات .

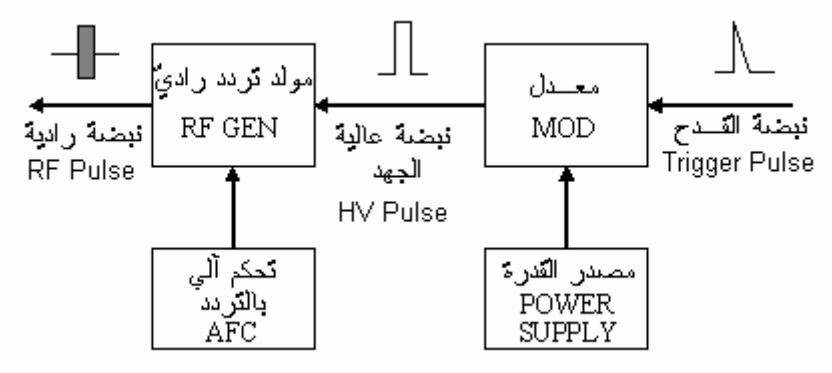
الباب السابع

مرسلات الرادار

7-1 خواص المرسل

يعتبر مرسل الرادار الفعال مصدر الطاقة الكهرمغنطيسية المرسلة من الرادار والمنتشرة داخل مجال عمله سواء بصورة مستمرة أو على شكل نبضات جيبية وبالتردد والقدرة المحددتين حسب متطلبات النظام الراداري المستخدم .

يتركب مرسل الرادار النبضي كما سبق ذكره في الباب الثالث من وحدتين أساسـيتين هما مولد التردد الرادي والمعدل ، بالإضافة إلى دوائر التحكم الآلي بالتردد ومصادر التغذية بالتيار المباشر وخطوط ودوائر الربط ووحدات التهوية .



الشكل 7-1 تركيب مرسل الرادار

يتم اختيار تردد الرادار بناء على عدة عوامل من بينها حجم النظام وكتلته لا سيما حجم الهوائي الذي يزيد بزيادة الطول الموجي المستخدم وخاصة لدى استخدام إشارة رادارية ذات تردد منخفض . وينطبق نفس الأمر على كل مكونات المرسل إذ تزيد أحجام كل من مولد التردد الرادي والمعدل وخطوط نقل الإشارة مما يشكل تبعات تصعب من استخدام النظام في بعض التطبيقات ، مثل الرادار المحمول Airborne أو المتحرك أو في حال معدلات المسح العالية التي تتطلب تحريك الهوائي ميكانيكياً . إلا أن زيادة تردد الإشارة المرسلة في الجانب الآخر تقلل من

مدى الرادار نسبة للتوهين Attenuation الذي تعانيه الإشارة أثناء انتشارها من وإلى الرادار .

إضافة لتردد الرادار ، يختلف تصميم مرسلٍ عن آخر باختلاف السعة الترددية لكل منهما وسهولة تغيير تردد الإرسال . السعة الترددية Bandwidth للمرسل هي الفرق بين أعلى تردد وأقل تردد ممكنين دون تغيير مؤثر في القدرة أو الكفاءة . إمكانية تغيير التردد Tunability وبالسرعة المطلوبة تعتبر من أهم خواص الرادار العسكري في سياق الحرب الإلكترونية وذلك بنوعيه ؛ الرادار سريع التغيير في التردد Frequency Agile ورادار القفز الترددي Frequency Hopping . كما يحتاج الرادار لتغيير تردده لزيادة مقدرته على الكشف إذ تُكتشف أهداف عند ترددات معينة دون اكتشافها لدى ترددات أخرى بما يعرف بالتنوع في التردد Frequency Diversity .

من معادلات الرادار بالباب الثاني ، نجد أن الطاقة المرسلة من العوامل الهامة في تحديد المدى الأقصى للرادار . في الرادار النبضي تزيد طاقة النبضة المرسلة بزيادة كل من القدرة القصوى للمرسل وعرض النبضة . زيادة عرض النبضة يقلل كل من الدقة والتمييز في المدى المقاس بواسطة الرادار ، في حين تقليل عرض النبضة يستدعي استخدام مرسل ذي قدرة عالية قد تصل إلى بضع ميقاواطات في الأنظمة ذات المدى الكبير .

يتصف المرسل عالي القدرة بكبر حجمه واحتياجه لجهد مباشر عالي لتشغيله مما قد يؤدي إلى حدوث شرر Arcing بأجزاء المرسل المختلفة وإمكانية تولد إشعاعات متأينة مصاحبة مثل الأشعة السينية X-Ray والتي تشكل خطورة على الأشخاص المحيطين بالنظام ، الأمر الذي يتطلب إضافة دروع واقية تمنع أو تقلل من تسريب تلك الإشعاعات مما يزيد من حجم وكتلة المرسل .

كما نلحظ من معادلات الرادار ارتباط كل من القدرة القصوى للمرسل وعرض النبضة بكل من دورة عمل المرسل والقدرة المتوسطة المتوفرة من مصدر التغذية

بالطاقة . إن عمل المرسل بدورة عمل صغيرة يسمح بتقليل درجة حرارته بواسطة وحدات التبريد خلال فترة توقف الإرسال مما يقلل من احتمال تلفه ويحسن من كفاءته . الكفاءة Efficiency هي مقياس لمقدرة مرسل الرادار على تحويل الطاقة المسحوبة من مصدر التغذية بالتيار المباشر إلى طاقة تردد رادي بأقل فقد ممكن في دوائره . لا بد من توافق ممانعة خرج المرسل مع كل من ممانعة الهوائي ودوائر الربط ، وذلك لتحقيق أكبر كفاءة ممكنة وحماية المرسل من القدرة المرتدة إليه بالإضافة إلى تحقيق الانتقال الأقصى للقدرة Maximum Power Transfer .

يحتاج المرسل إلى العمل باستقرارية عالية توفر الاستقرار في كل من مطال وطور الإشارة المرسلة والعمل على إنتاج الإشارة بأقل تشويه Distortion ممكن لشكل موجة النبضة المشكلة بواسطة المعدل . يتضح التأثير السالب لعدم استقرارية المرسل أكثر ما يتضح في الأنظمة المتزامنة ، كالرادار المستمر CW ونظام تمييز الأهداف المتحركة والرادار الدوبلري حيث يعتمد أي منها في عمله على طور إشارة الصدى المستقبلة . ويشتد تأثير عدم الاستقرارية ذلك في الأنظمة التي تستخدم تعديلاً ترددياً أو طورياً للإشارة المرسلة إلى جانب التعديل النبضي ، مثل أنظمة ضغط النبضة وأنظمة تحريك الشعاع إلكترونياً بمصفوفات الطور والتردد.

ختاماً لدى ذكر خواص المرسل لا بد من الإشارة إلى كل من كلفته الابتدائية وإمكانية وكلفة الصيانة والزمن اللازم للصيانة MTTR بالإضافة إلى العمر الافتراضي Lifetime ، لا سيما للصمامات ، والاستمرارية في العمل دون توقف والتي عادة ما تقدر بالزمن المتوسط بين الأعطال MTBF .

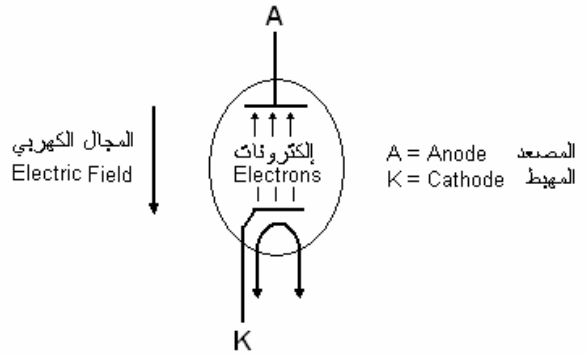
2-7 الصمّامات الفراغية

تُستخدم أدوات إلكترونية وموجية عديدة ومتباينة في مبدأ عملها لإنتـاج إشـارة التردد الرادي RF عالية القدرة بمرسل الرادار . يمكن تقسيم هذه الأدوات كما سبق ذكره في الباب الثالث إلى الصمامات الفراغية ، الأدوات مقاطعة المجال ، الأدوات خطية الشعـاع و أدوات الحالة الجامدة .

من أقـدم هذه الأدوات اسـتخـداماً الأنابـيب الفـراغية Vacuum Tubes أو الصمامات الأيو-حرارية Thermionic Valves والتي حلت مكانها كثير من الأدوات الأخرى في معظم تطبيقات الإلكترونيات والاتصالات . إلا أننا نجدها ما تزال مستخدمة إلى اليوم في كثير من أنظمة الرادار كمعدلات ، وأيضاً بمستوى أقل كمولّدات تردد رادي في المرسلات ذات الترددات المنخفضة في نطاقي التردد العالي HF والتردد العالي جداً VHF .

تمتاز هذه الصمامات بقلة تكلفتها مقارنة بالصمامات الأخرى ، وبالاستمرارية Reliability العالية مقارنة بأدوات الحالة الجامدة الحساسة للتغيرات المفاجئة في الجهد . كما أن لها مقاومة دخل كبيرة ومعامل ضوضاء قليل يجعلانها متميزة في تحقيق دوائر دخل المكبرات الصوتية . إلا أنها في المقابل ذات كفاءة متدنية وسعة ترددية محدودة لا تمكنها من العمل في نطاق الموجات المكروية .

تعتمد نظرية عمل الصمام الفراغي على مبدأ الإشعاع الأيوني الحراري للإلكترونات Thermo-ionic Emission . يتم تسخين سطح معدني من مادة غنية بالإلكترونات مثل مادة التنجستن ، فتتحرر بعض الإلكترونات من ذراتها مشكلة سحابة إلكترونية على سطح ذلك المعدن ، تُجذب الإلكترونات الحرة تلك بواسطة مجال كهربي ليتم تجميعها عند موقع آخر .

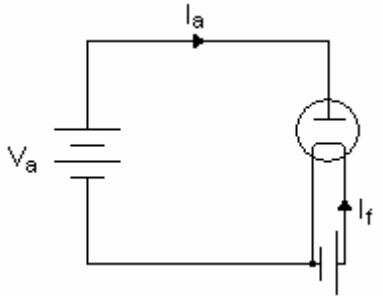


الشكل 7-2 الصمام الثنائي

أبسط أنواع الصمامات الفراغية هو الصمام الثنائي Diode والذي يتكون من أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء بداخله مهبط Cathode من التنجستن ومصعد

Anode مصنوع من النحاس . يتم تسخين المهبط مباشرة بتمرير تيار كهربي عبر جـسم المهبط مباشرة حيث يكون المهبط عبارة عن فـتيلة Filament من السلك ، أو أن يكون مستقلاً ويحتضن سخّـاناً كهربياً Heater داخل وعاء زجاجي لتسخينه كما بالشكل 7-2 أعلاه . يتم توصيل كل من المصعد والمهبط بأقطاب توصيل لاستخدامها في الدائرة الخارجية التي يستخدم الصمام كأحد مكوناتها .

في حالة استخدام سخّـان مستقل عن المهبط يمكن استخدام مصدر تيار متردد أو مباشر لتغذيته ، إلاّ أنه يفضل استخدام مصدر تيار مباشر في حال قيام المهبط بتسخين نفسه . بعد مرور تيار بالفتيلة لفترة كافية لرفع درجة حرارة المهبط وبعد تسليط جهد كهربي موجب على المصعد بالنسبة للمهبط ، يسري تيار إلكتروني من المهبط إلى المصعد داخل الصمام مما ينشئ تياراً كهربياً من المهبط إلى المصعد عبر الدائرة الخارجية كما بالشكل 7-3 .

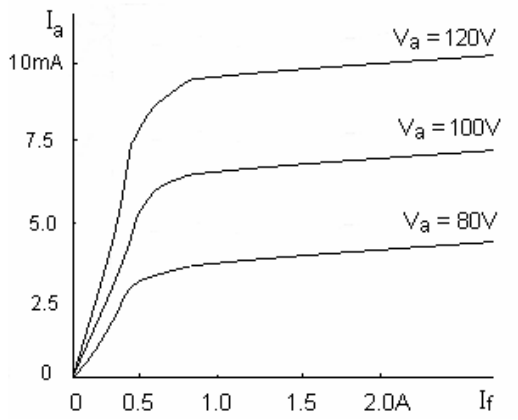


الشكل 7-3 دائرة الصمام الثنائي

يتناسب تيار المصعد I_a مع تيار الفتيلة I_f عند تثبيت جهد المصعد نتيجة للزيادة في عدد الإلكترونات المحررة من المهبط بواسطة الأثر الحراري للتيار ، والذي يتناسب مع مربع تيار الفتيلة ومقاومتها $I_f^2 R_f$. إلا أنه مع زيادة تيار الفتيلة وارتفاع درجة الحرارة ، يقل معدل الزيادة في إنتاج الإلكترونات مما يؤدي إلى تشبع Saturation في تيار المصعد كما يتضح من المنحنى في الشكل 7-4.

عادة يتم تثبيت جهد الفتيلة وبالتالي تيارها ليعتمد تيار المصعد على جهد المصعد V_a والذي يتناسب معه بشكل مماثل لأي من المنحنيات بالشكل 7-5 . تستخدم

كثير من الصمامات الفراغية جهد فتيلة متردد مقداره 6.3V توصل معه الفتائل على التوازي ، وذلك إذا ما أُريد عدم تأثر أي صمام بعدم وجود صمام آخر أو احتراق فتيلته . أما في حال تفضيل تعطيل عمل دوائر النظام بغرض الحماية عند رفع أحد الصمامات من الدائرة أو احتراق فتيلته ، فيتم توصيل كل الفتائل على التوالي مع مصدر التيار . يستخدم الصمام الثنائي في الأنظمة القديمة لتقويم التيار المتردد في وحدات التغذية لا سيما النوع الذي به مصعدين ومهبط واحد لإنتاج موجة كاملة من خرج محول ذي ثلاث أطراف ، كما كان يستخدم ككاشف غلاف في المستقبِلات .

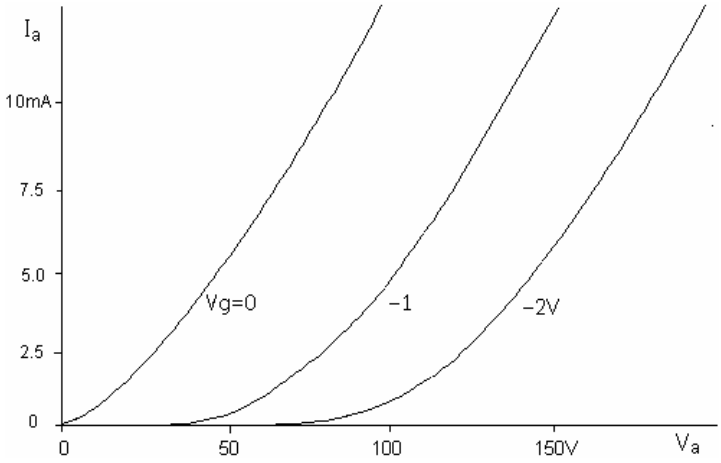


الشكل 7-4 منحنيات تيار الصمام الثنائي

3-7 الصمام الثلاثي

بإضافة شبكة معدنية بين المصعد والمهبط في الصمام الفراغي تمر من خلالها الإلكترونات وتوصيلها بقطب خارجي نحصل على الصمام الثلاثي Triode . يمكن عن طريق هذه الشبكة التحكم بتيار الصمام وتوظيفه كمكبر ، وتسمى بالشبكة الحاكمة Control Grid ، أو باختصار الشبكة .

في حال ثبات جهد المصعد ، يتأثر التيار بالتغير في جهد الشبكة V_g إذ يزيد بزيادته نتيجة للتحفيز الناشئ لحركة الإلكترونات بسببه . حتى يتم التحكم في تيار المصعد بصورة أكثر خطية ولمنع سريان تيار في الدائرة الخارجية للشبكة ، يسلط جهد انحياز سالب على الشبكة بالنسبة إلى المهبط . الشكل 7-5 يعرض منحنيات تيار المصعد مع كل من جهد المصعد وجهد الشبكة .



الشكل 7-5 منحنيات تيار الصمام الثلاثي

لتوفير جهد الانحياز السالب للشبكة ، توضع مقاومة R_k في دائرة المهبط ترفع جهده من جهد الخط الأرضي للمصدر أو الجهد صفر كما في الدائرة الموضحة في الشكل 7-6 ، في حين توصل الشبكة بمقاومة كبيرة إلى الخط الأرضي . نسبة لعدم وجود تيار شبكة يمر بالمقاومة R_g ، فإن جهد الشبكة يساوي صفراً وبالتالي يكون أقل من جهد المهبط بما يعادل I_aR_k . من الدائرة نجد أن المصعد موصول إلى مصدر التغذية بالتيار المباشر عن طريق مقاومة R_a والتي تمثل حملاً لتيار المصعد ، حيث يتغير جهد المصعد مع التيار بالعلاقة

$$V_a = V_A - I_a R_a \qquad 7\text{-}1$$

يتضح أنّه يمكن التحكم في تيار المصعد وبالتالي في جهده عن طريق تغيير جهد الشبكة . إذا ما سلطت على شبكة الصمام إشارة جهد متغير وكان أقصى مطال موجب لها أقل من جهد انحياز الشبكة السالب ، فإنّنا نحصل على دائرة مكبر للجهد ذي مقاومة دخل كبيرة تعادل R_g . تعرف النسبة بين التغير في تيار المصعد إلى التغير في جهد الشبكة داخل الجزء الخطي للمنحنى بمعامل تكبير التيار وتعادل Trans-conductance

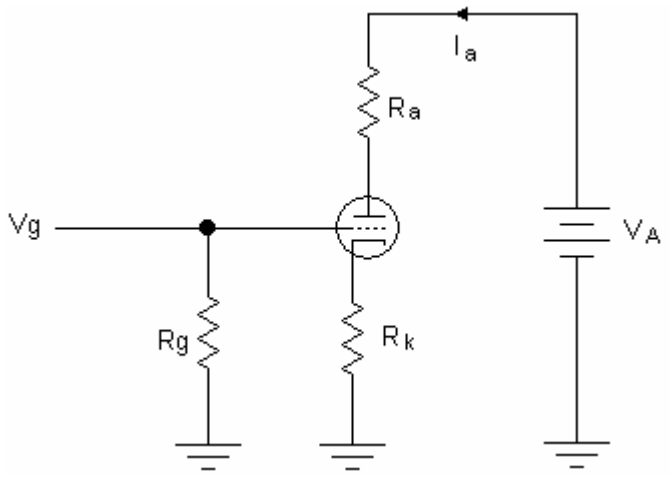
$$G_m = \Delta I_a / \Delta V_g \qquad 7\text{-}2$$

وباستخدام العلاقة 7-1 نجد أن التغير في جهد الخرج يعادل

$$\Delta V_a = - \Delta I_a R_a = - G_m \Delta V_g R_a \qquad 7\text{-}3$$

وبالتالي فإن معامل تكبير الجهد يصبح

$$A_V = \Delta V_a / \Delta V_g = - G_m R_a \qquad 7\text{-}4$$



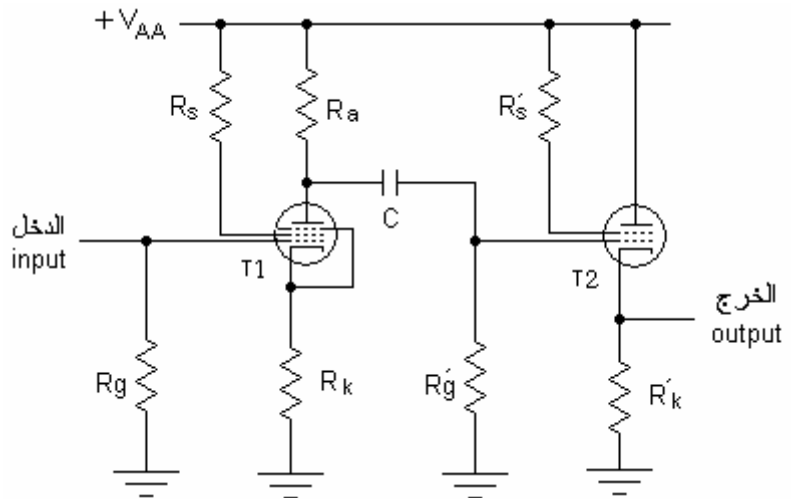
الشكل 7-6 دائرة الصمام الثلاثي

يوجد تشابه بين كل من الصمام الثلاثي والترانزستور الحقلي FET من حيث اعتماد التيار في كل منهما على جهد إشارة الدخل بخلاف الترانزستور ثنائي القطبية الذي يعتمد فيه التيار على تيار إشارة الدخل . إضافة لاستخدامه للتكبير ، يستخدم الصمام الثلاثي في بعض مرسلات الرادار المتري كمذبذب لإنتاج إشارة التردد الرادي عالية القدرة .

لزيادة معامل تكبير الصمام ، أضيفت شبكة أخرى بين الشبكة الحاكمة والمصعد تعرف بالشبكة الحاجبة Screen ليتشكل الصمام الرباعي Tetrode . يتم تسليط جهد موجب أصغر من جهد المصعد على الشبكة الحاجبة يؤدي لزيادة كبيرة في تيار المصعد كما في الصمام T2 والمستخدم كتابع مهبط بالشكل 7-7 . رغم كبر معامل تكبيره ، نجد أن الصمام الرباعي يعاني من الإشعاع الثانوي Secondary Emission بين الشبكة الحاجبة والمصعد ذو الجهد الأعلى إذ يسري تيار بالمصعد لا يعتمد على جهد الشبكة الحاكمة مما يقلل من حساسية التحكم بجهد الخرج .

تمت إضافة شبكة ثالثة بين الشبكة الحاجبة والمصعد موصولة مع المهبط داخلياً أو خارجياً للتخلص من مشكلة الإشعاع الثانوي ليتشكل الصمام الخماسي Pentode

مثل الصمام T1 والمستخدم كمكبر جهد في دائرة المكبر ذي المرحلتين والموضحة بالشكل 7-7 . يمتاز هذا الصمام بمعامل تكبير عالي واستقرارية جيدة ، إلا أنّه ذو سعة داخلية كبيرة لتقارب الشبكات من بعضها الأمر الذي يحصر استخدامه في دوائر الترددات المنخفضة مثل المعدلات .



الشكل 7-7 الصمام الرباعي والخماسي

7-4 الماغنترون

الماغنترون Magnetron من الأدوات المتقاطعة المجال Crossed Field Devices ويعتبر أكثر الصمامات المستخدمة لتوليد التردد الرادي في مرسلات الرادار النبضي العاملة في نطاق الموجات المكروية .

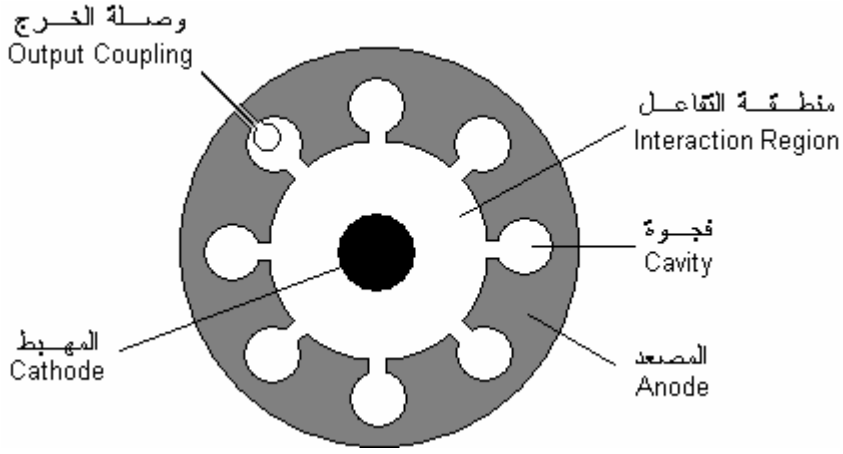
يصنّف الماغنترون كصمام ثنائي ذاتي التذبذب يمتاز بصغر حجمه ووزنه وتحمله للاهتزازات الميكانيكية والصدمات مما يؤهله للعمل بالأنظمة المحمولة والمتحركة Mobile . كما يمتاز أيضاً بطول عمره وقلة كلفته مقارنة بالأدوات الأخرى ، لذا نجده يستخدم في التطبيقات العامة كالأفران المكروية المنزلية وكمصدر للموجات المكروية في التجارب المعملية .

إلى جانب ذلك نجد أن الماغنترون يعمل على جهود كهربية منخفضة نسبياً مقارنة بكثير من الصمامات الأخرى العاملة في نفس النطاق الترددي وبكفاءة جيدة مما يقلل من مخاطر الإشعاعات الضارة .

إلا أن الماغنترون لا يعمل كمكبر مما يحد من عمله في كثير من الأنظمة التـي تنتج إشارة التردد الرادي في مستويات قدرة منخفضة ثم يتم تكبيرها مثل الأنظمة المتزامنة كرادار دوبلر وأنظمة ضغط النبضة . كما يعيبه أيضاً عدم مقدرته على إنتاج نبضات عالية القدرة يقل عرضها عن 50ns الأمر الذي يؤثر في دقة قيـاس المدى بالرادار .

كذلك نجد أن الماغنترون ذو سعة ترددية قليلة تحد من استخدامه فـي الأنظمـة التي تحتاج إلى تغيير تردد الإرسال بين فينة وأخرى لأسـباب أمنيـة أو فنيـة . وبصورة عامة يعاني الماغنترون من عدم استقرارية التردد والطور مما يحد مـن استخدامه في الأنظمة الرادارية المتزامنة ويمنع اسـتخدامه نهائيـاً فـي أنظمـة الاتصالات المختلفة .

يتركب الماغنترون ذو الفجوات Cavity Magnetron من المهبط المتمركز عنـد وسطه والمصعد الذي يشكل الجسم الخارجي للصمام كما بالشـكل 7-8 أدنـاه . تعرف المنطقة بين المصعد والمهبط بمنطقة التفاعـل Interaction Region ، فـي حين تعرف الفجوات بداخل جسم المصعد بالفجوات أو الغرف الرنّانة وهي مفتوحة على منطقة التفاعل وتتساوى في أحجامها .



الشكل 7-8 الماغنترون ذو الفجوات

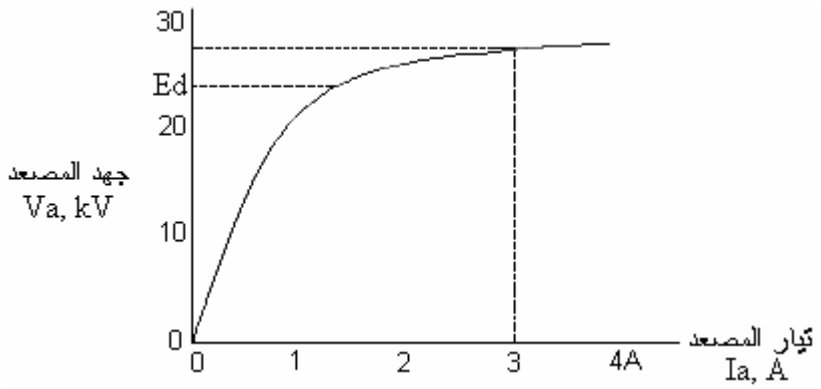
يوضع جسم الماغنترون النحاسي داخل الفراغ لمغنطيس دائم أو مغنطيس كهربي قوي على شكل حدوة الحصان بحيث يقاطع المجال المغنطيسي المجال الكهربـي

عمودياً في منطقة التفاعل بداخل الصمام . تتحرك الإلكترونات من المهبط بعد تحررها منه بفعل الحرارة متجهة إلى المصعد عبر منطقة التفاعل ، تحت تأثير المجال الكهربي الناشئ بسبب فرق الجهد بين المصعد والمهبط .

نتيجة لحركتها ، تنشئ الإلكترونات حول مساراتها مجالات مغنطيسية تتفاعل مع المجال المغنطيسي الموجود بمنطقة التفاعل مما يجبرها على تغيير اتجاهاتها وجعلها تدور حول المهبط . في حال وصول شدة كل من المجالين المغنطيسي والكهربي والتيار الإلكتروني في منطقة التفاعل إلى مستويات معينة ، فإنّه تتولد موجات كهرمغنطيسية تنتشر نتيجة للحركة الدائرية للإلكترونات .

تعمل الغرف الرنّانة على تحديد تردد الموجة المطلوبة بناء على أحجامها حيث يزيد التردد بصغر حجم الغرفة الرنّانة . لإيصال الإشارة المنتجة إلى الخارج ، يتم تمرير الموجة عن طريق دليل موجة Waveguide موصول بإحدى الغرف ، أو باستخدام حلقة Loop من السلك كهوائي صغير لتحويل الطاقة إلى كهربية وتمريرها عبر كابل محوري إلى خارج الصمام كما بالشكل . في حال استخدام دليل موجة ، يجب توفير ضغط جوي داخله ليعادل الضغط الكبير داخل الصمام حتى لا ينهار الحاجز الزجاجي الموجود بينهما .

يتطلب تولد المجال الكهرمغنطيسي بالماغنترون شروطاً ترتبط بكل من المجال المغنطيسي والكهربي وحجم كل من منطقة التفاعل والفجوات وعدد تلك الفجوات .



الشكل 7-9 منحنى تيار الماغنترون

عند ثبات مقدار كل من المجال المغنطيسي ودرجة حرارة المهبط ، لا يصل تيار الماغنترون إلى قيمة مقدرة إلا بعد وصول الجهد بين المصعد والمهبط إلى قيمة حرجة تتولد بعدها إشارة التردد الرادي بصورة قوية ومستقرة . تعرف هذه القيمة الحرجة لجهد الماغنترون E_d بجهد هارتري Hartree Voltage ، وتعادل حوالي 90% من الجهد العامل للصمام كما هو موضح بالمنحنى بالشكل 7-9 أعلاه .

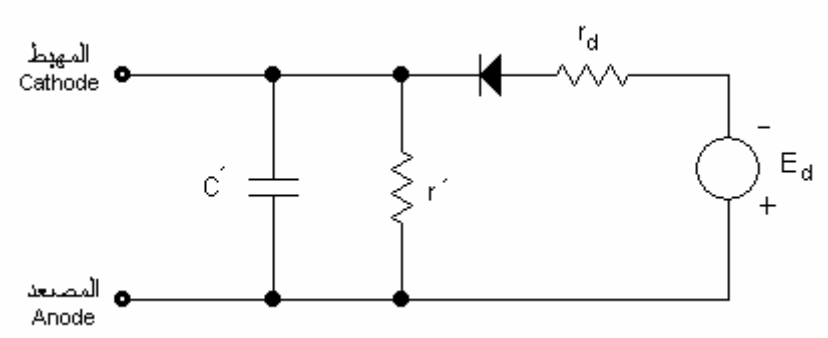
7-5 تحليل الماغنترون

يمكن أن تتولد بالماغنترون مجالات كهرمغنطيسية ذات قدرات منخفضة عند جهود أقل من جهد هارتري مما يستوجب التأكد من وصول جهده إلى الصفر مباشرة بعد اكتمال إنتاج النبضة الرادية . كما أن عمل وأداء الماغنترون يتأثر بصورة مباشرة بالتغير في تيار المصعد وبالتغير في ممانعة الحمل والتي يشكلها كل من المزدوج والهوائي ودوائر الربط .

يسمى التغير في التردد الناتج في إشارة خرج الماغنترون من التغير في التيار بمعامل الدفع Pushing Figure ووحدته وحدة تردد لكل وحدة تيار وعادة ما تستخدم MHz/A . كما يسمى الفرق بين أعلى وأقل تردد منتج في حال تغير طور الحمل بمقدار زاوية كاملة 360° بمعامل السحب Pulling Figure ، والذي يصل في العادة إلى أكثر من 15MHz .

يوجد عدد مقدر من الإلكترونات داخل منطقة التفاعل والتي لا تتمكن من تحويل طاقتها إلى طاقة كهرمغنطيسية وتعود إلى المهبط نسبة للانحناءات في مساراتها تحت تأثير المجالين المغنطيسي والكهربي . يتسبب ذلك في زيادة كبيرة بدرجة حرارة المهبط وتسمى تلك الزيادة بالحرارة الراجعة Back Heating ، والتي قد تسبب تلفاً بالصمام إذا ما لم يتم تداركها . لذلك يتم التحكم في تيار فتيلة الصمام إلكترونياً بتخفيض حرارة المهبط في حال ارتفاع القدرة المتوسطة لإشارة الخرج . يمكن في المرسلات التي لها دورة عمل كبيرة وقدرة عالية إطفاء الفتيلة بالكامل بعد التأكد من بدء عمل الصمام والاكتفاء بالحرارة الراجعة فقط لتسخين المهبط .

يتم تمثيل الماغنترون بدائرة مكافئة مكـونة من ثنائي موحد للتيار ، مكثـف 'C يمثل سعة الصمام المتناثرة Stray Capacitance ومقاومة 'r تمثل التسـريب فـي التيار كما بالشكل 7-10 أدناه . تمثل المقاومة r_d بالدائرة المكافئة مقاومة الانحياز الأمامي للثنائي ، بينما يمثل مصدر الجهد E_d جهد الانحياز العكسي للثنائي والذي يمثل جهد هارتري في الماغنترون .



الشكل 7-10 الدائرة المكافئة للماغنترون

من أجل الحصول على استقرارية أكبر في تردد الماغنترون تم تطـويره لابتكـار الماغنترون المحوري Coaxial Magnetron . في هذا النوع يتم توظيـف غرفـة رنّانة معينة كعنصر لتحديد التردد مما يمكن من الحصول على استقرارية في تردد الإشارة مع التغير في الحمل والتيار والحرارة . كما يمتاز الماغنترون المحـوري عن الماغنترون ذو الفجوات بإمكانية التحكم في تردده ميكانيكياً عن طريق مكبس متحرك يغير من حجم الغرفة الرنّانة بواسطة محرك كهربي صغير . إلاّ أن مثـل هذا الصمام يحتاج إلى مراعاة تخفيض درجة حرارته بعد إطفائه تدريجياً حتـى لا ينحصر المكبس بداخل الغرفة نتيجة انكماشها المفاجئ .

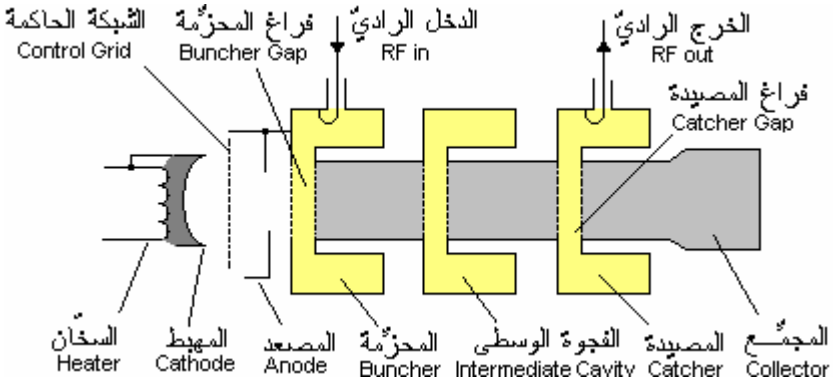
7-6 الكلايسترون

يعتبر الكلايسترون Klystron صمام قدرة من الأدوات الموجية خطيـة الشـعاع Linear-Beam ذات الكفاءة العالية في نطاق الموجـات المكرويـة . وهـو مـن المكبرات التي تمتاز بمعامل تكبير عالي وقدرة قصوى كبيـرة وكفـاءة مرتفعـة مقارنة بالأدوات الموجية الأخرى .

يحتاج الكلايسترون إلى جهود عالية جداً مقارنـة بالصـمامات الأخـرى مثـل الصمامات الفراغية والماغنترون وصمام الموجة الراحلة حيث لا تفوقه في ذلك إلا الصمامات العاملة بسرعات إلكترونيـة نسـبية Relativistic مثـل الجيروتـرون والأبيترون . كما يتصف الكلايسترون بسعة ترددية صغيرة لا تسمح بتغيير كبيـر في تردد الإشارة التي يعمل على تكبيرها . إضافة لذلك نجده ذا حجم كبير يزيـد منه الحاجة إلى وجود دروع حوله تمنع تسرب الأشعة السينية التي قد تتولد به إلى خارج الصمام .

يتركب الكلايسترون كما يتضح من الشكل 7-11 أدناه من ثلاث مراحل هي مدفع الإلكترونات ، التردد الرادي ومرحلة المجمع . يقوم مدفع الإلكترونات Electron Gun بإنتاج الإلكترونات من المهبط وتركيزها Focusing لتقليل الأثر الحـراري الذي قد ينتج من احتكاكها بجدار الصمام ثم قذفها عبر الشبكة الحاكمة التي تـتحكم في شـدة التيار الإلكتروني إلى مرحـلة التردد الرادي RF Section .

تشتمل مرحلة التردد الرادي على المصعد ذو الشكل الأسطواني والذي به ثلاث فجوات تتصل الأولى بخارج الصمام لإدخال الإشارة والأخيرة لإخراج الإشارة بعد تكبيرها وتمر الإلكترونات من خلال نفق بوسط المصعد . يمكن إدخال الإشارة أو إخراجها كموجة كهرمغنطيسية أو كتيار كهربي ، ويتم تحويلها من أو إلـى تيـار بواسطة حلقة من سلك معدني في حال عدم استخدام دليل موجة . يعمـل المجمـع Collector على تجميع الإلكترونات الحرة المقذوفة بعد عبورهـا عبـر المصـعد المجوف .



الشكل 7-11 تركيب الكلايسترون

عند مرور الإلكترونات بمرحلة التردد الرادي عبر الفجوة الأولى والتي تسمى بالمحزمة Buncher ، يتم تعديل طاقة الإلكترونات بواسطة المجال الكهرمغنطيسي لإشارة الدخل عالية التردد . بعد مرورها عبر الفجوة الوسطى للمصعد ، تميل الإلكترونات إلى تحويل طاقتها المستمدة من المجال الكهربي داخل الصمام إلى مجال كهرمغنطيسي له نفس تردد إشارة الدخل وذلك عبر الفجوة الأخيرة والتي تسمى بالمصيدة Catcher حيث يتم تحويل جزء كبير من الطاقة إلى إشارة الخرج .

كما هو متوقع فإن العلاقة بين كل من تيار الكلايسترون والجهد بين المصعد والمهبط علاقة غير خطية ، صيغتها الرياضية هي

$$I = K V^{3/2} \qquad 7-5$$

حيث K معامل الصمام ، في حين أن العلاقة بين القدرة والجهد هي

$$P = K V^{5/3} \qquad 7-6$$

نسبة لخطورة استعماله وكبر كلفته وحجمه واحتياجه لمصدر تغذية خاص متعدد الجهود ، يندر استخدام الكلايسترون في مرسلات الرادار شائعة الانتشار ويستخدم في عدد من أنظمة الاتصالات لاستقراريته وارتفاع قدرته . يوجد نوع من الكلايسترون يعمل كأداة ذاتية التذبذب ذو كلفة منخفضة وجهود تشغيل أقل من الكلايسترون المكبر يسمى بكلايسترون الانعكاس اللاإرادي Reflex Klystron والذي يستخدم كمذبذب محلي في بعض مستقبلات الرادار القديمة .

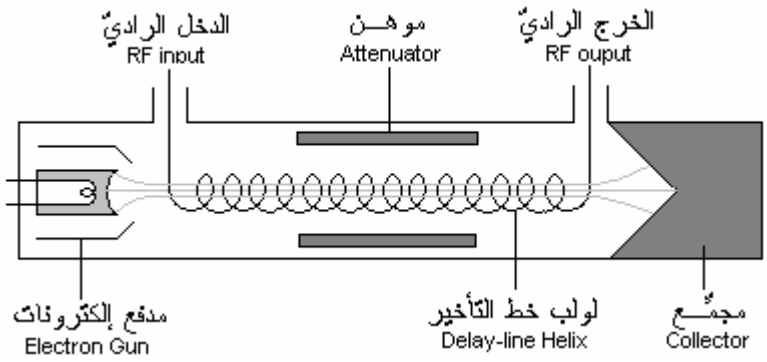
7-7 صمام الموجة الراحلة

يعتبر صمام الموجة الراحلة أو المتنقلة Traveling Wave Tube صمام قدرة من الأدوات الموجية خطية الشعاع Linear-Beam ذو معامل تكبير عالي وسعة ترددية كبيرة ولا يحتاج إلى جهود عالية مقارنة بالكلايسترون ، إلا أنّه ذو كفاءة أقل منه .

مثلما يتركب الكلايسترون ، يتركب صمام TWT من ثلاث مراحل هي مدفع الإلكترونات ، قطاع التفاعل ومجمع الإلكترونات كما بالشكل 7-12 أدناه . يوجد

بداخل قطاع التفاعل سلك لـولبي Helix يعمـل كخـط تـأخير للموجـة وتمـر الإلكترونات خلال لفاته أثناء عبورها القطاع . تدخل إشارة الدخل عاليـة التـردد بواسطة طرف خط التأخير القريب من مدفع الإلكترونات وتخرج مـن الطـرف الثاني بعد أن تقضي فترة زمنية أطول داخل مرحلة قطاع التفاعل بسـبب السـلك اللولبي . تكتسب الموجة خلال رحلتها عبر بالصـمام طاقـة مـن الإلكترونـات المتحركة بسرعة نحو المجمع مما يحدث تكبيراً مقدراً في الإشارة الرادية .

إلى جانب استخدامه كمرسل مستقر في الرادار ونظم الاتصـالات الفضـائية ، يمتاز صمام TWT بخطية عالية ومعامل ضوضاء منخفض . لذلك كان يسـتخدم كمكبر قليل الضوضاء LNA بمراحل التردد الرادي بمستقبلات الرادار القديمة . تم تصميم صمام التويسترون Twystron ليجمع بين خواص كل مـن الكلايسـترون وصمام الموجة الراحلة ليكون له كفاءة عالية وسعة ترددية كبيرة .



الشكل 7-12 صمام الموجة الراحلة

7-8 المعدِّلات النبضية

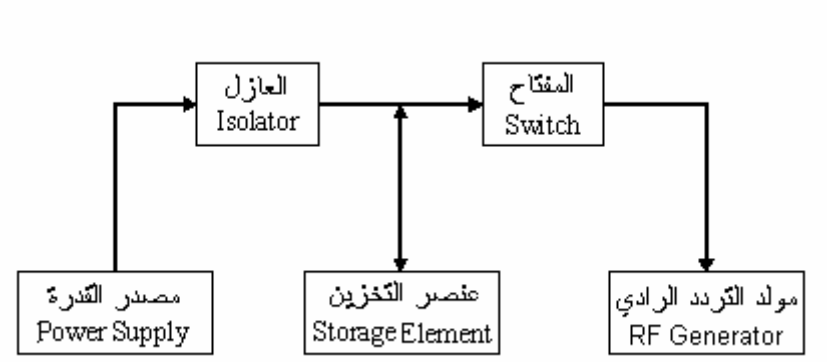
يعمل المعدل بمرسل الرادار النبضي على توفير إشارة نبضية ذات جهد عـالي جداً تقوم بتشكيل نبضات التردد الرادي عالية القدرة المنتجة بواسطة مولد التـردد الرادي دون حدوث تشويه نتيجة للتيار المسحوب .

رغم أنه توجد عدة أنواع من المعدلات النبضية التي تستخدم في مرسل الرادار ، إلا أنها تشترك في استخدامها وسائل لتخزين الطاقة خلال فترة الاستقبال بالإضافة

لمفتاح إلكتروني عالي القدرة لتفريغ الطاقة المخزونة عند الإرسال كما يتضح من الشكل 7-13 . يجب أن يكون مصدر القـدرة Power Supply بالتيـار المباشـر والمستخدم في المرسل ذا قدرة كبيرة كافية للحصول على قدرة الإرسال المطلوبة .

غالباً ما يستخدم الرادار المكروي مصدراً للإمداد بالطاقة (مولد أو محـول) ذا ثلاثة أوجه 3-phase بدلاً من وجه واحد وذلك لحصول على تيار مباشر لا يهـبط إلى الصفر بعد التقويم . كما يستخدم مغـيراً للتردد Frequency Converter لرفـع تردد المصدر (من 50Hz إلى 400Hz) وذلك لتسهيل ترشيح التيار بعـد التقـويم وبالتالي الحصول على أقل مركبات ترددية ممكنة .

بالإضافة للتقويم والترشيح ، يشتمل مصدر القدرة على مـنظّم للجهـد لضـمان استقرار مطال النبضة عالية الجهد المنتجة بواسطة المعدل . تحدث فـي دوائـر المعدل تغيرات بمعدلات كبيرة في كل من الجهد والتيار عند الإرسال ، الأمر الذي يتطلب استخدام عازل Isolator لحماية مصدر التغذية وضمان عدم تأثر أدائه بتلك التغيرات السريعة .



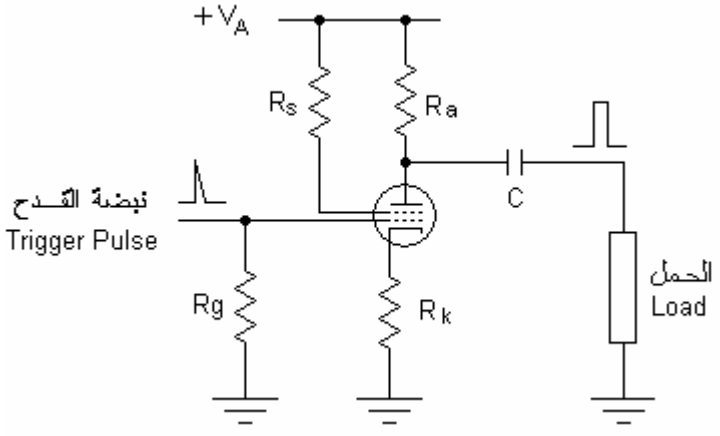
الشكل 7-13 مبدأ عمل المعـدل

تستخدم عدة أدوات إلكترونية كمفاتيح بالمعـدلات مثـل الصـمام الربـاعي ، الثايرترون والترانزستور الحقلي . الثايرترون Thyratron هو الصـمام المنـاظر للثايرستور Thyristor من أدوات الحالة الجامدة ويشابهه في وظيفته وإن اختلفا في مبدأ عمل كل منهما . الثايرترون صمام ثلاثي له مصعد ، مهبط وشـبكة تحكـم ومحاط بوعاء زجاجي أو خزفي Ceramic مملؤ بغاز قابل للتأين مثل الهيدروجين

المستخدم في الصمامات عالية القدرة أو مثل بخار الزئبق المستخدم في الصمامات ذات القدرات المنخفضة نسبياً . يحتاج الصمام إلى نبضة قـدح Trigger موجبـة حتى يتأين الغاز فتعمل الأيونات الموجبة به على توصيل التيـار بـين المصـعد والمهبط مما يصاحبه هبوط كبير في الجهد بينهما . يستمر الغاز في التأين حتـى بعد اختفاء النبضة الموجبة إلى أن يهبط التيار المار بالصمام إلى قيمة منخفضـة جداً فيختفي التأين وينقطع سريان التيار .

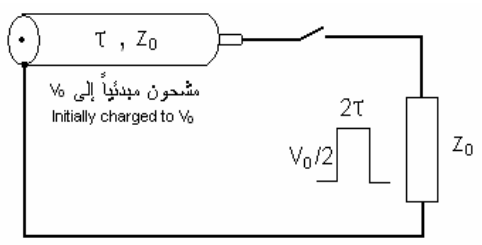
رغم تباين تركيبها ، إلا أنّه يمكن تقسيم المعدلات النبضية بصورة عامـة إلـى نوعين أساسيين [6] هما الصمام الصلب Hard-tube والنوع الخطّي Line-type . في معدلات الصمامات الصلبة لا يتم امتصاص كل الشحنة الكهربية المخزونة بواسطة الحمل إذ أن الصمام أقرب ما يستخدم كمكبر نبضـي Pulsed Amplifier ولـيس كمفتاح إلكتروني .

يتم تسليط نبضة موجبة على الشبكة الحاكمة للصمام فيسري تيار مشـبع عبـره مسبباً انخفاضاً كبيراً ومفاجئاً في جهد المصعد كما يتضح مـن الشـكل 7-14 . نتيجة لذلك الانخفاض في جهد المصعد ، يتم تفريغ الشحنة المخزونة بالمكثف عبر مولّد التردد الرادي والذي يشكّل حمل المعدل دون وصول الجهد إلى الصفر ممـا يبقي جزءاً من الشحنة بالمكثف . يتكرر شحن المكثف خلال فترة الاسـتقبال مـن مصدر التغذية بتيار منخفض كثيراً عن تيار التفريغ وذلك عبر الحمل نفسه .



الشكل 7-14 معدل صمام صلب

بخلاف معدلات الصمامات الصلبة ، يتم في المعـدلات مـن النـوع الخطـي امتصاص كلّ الشحنة الكهربية المخزونة بواسطة الحمل . يأتي اسم هذا النوع من المعدلات للتشابه في طريقة تخزين وتفريغ الطاقة التي تستخدم فيه مـع طريقـة تخزين وتفريغ الطاقة في خط النقل ذي الدائرة المفتوحة المبين في الشكل 7-15 . إذا ما كان زمن انتشار الموجة عبر الخط المشحون إلى جهد كهربي V_o يعادل τ ، فإنه إذا تم تفريغ شحنة الخط في حمل متوافق مع ممانعته المميزة Z_o ، فإن الجهد بين طرفي الحمل يكون على شكل نبضة مستطيلة مطالها $V_o/2$ وعرضها 2τ .



الشكل 7-15 فكرة المعدل من النوع الخطّي

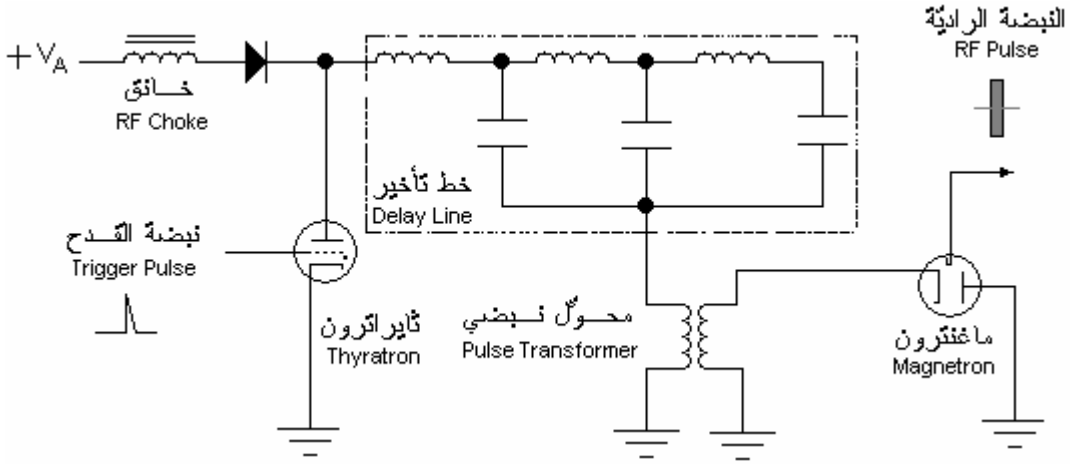
عملياً لا تستخدم خطوط النقل في تحقيق المعدل وتستبدل بعـدد مـن الملفـات والمكثفات تقوم بتخزين الطاقة خلال فترة الاستقبال تعرف بشبكة تشكيل النبضـة Pulse Forming Network أو بخط التأخير . الدائرة الإلكترونيـة بالشـكل 7-16 لمعدل من النوع الخطي يستخدم خط تأخير يتم شحنه عبر الملف الابتدائي للمحول عن طريق الثنائي وخانق التردد الرادي RF Choke واللذان يشكلان عازلاً لمصدر التغذية لحمايته .

يستخدم المحول النبضي لرفع جهد نبضة خرج المعـدل ، فـي حـين يسـتخدم الثايرترون كمفتاح لتفريغ الشحنة عبره إلى الحمل . المحولات النبضية محـولات مخصصة للتعامل مع النبضات القصيرة والحادة ، مثل نبضات الـرادار ، وذلـك لتقليل التشويه الذي قد ينشأ في إشارة خرج المعـدل نتيجـة للمغنطـة المتبقيـة Residual Magnetism بالقلب الحديدي بعد اختفاء التيـار . عـادة مـا تسـتخدم المحولات لربط المعدل والحمل في النوع الخطي مـن المعـدلات ، إلا أنهـا لا تستخدم في معدلات الصمام الصلب .

خلال فترة الاستقبال ، يتم شحن خط التأخير بواسـطة الثنـائي وعبـر الملـف الابتدائي للمحول بمعدل تغير منخفض لا يسمح بتوليد تيار يذكر بالملف الثانوي ، بينما لا يمر تيار عبر الصمام غير المتأين . عند وصول نبضة الإشعال من مولّـد النبضات بالرادار ، يتأين الصمام ويفرغ شحنة الخط عبره مما تنتج عنـه نبضـة عالية الجهد بالملف الثانوي للمحول النبضي تعمل على تغذية مولد التردد الـرادي فينتج نبضة جيبية ذات قدرة وتردد كبيرين تتجه إلى الهوائي لإرسالها .

يعمل الثنائي بالدائرة على منع تفريغ الشحنة بمصدر التغذية ، بينما يمنع الخانق وصول الترددات العالية إليه . يستخدم في مثل دوائر المعدلات هذه ثنـائي زينـر Zener Diode موازياً للصمام وذلك لامتصاص القوة الدافعـة الراجعـة المتولـدة بالملف الابتدائي للمحول .

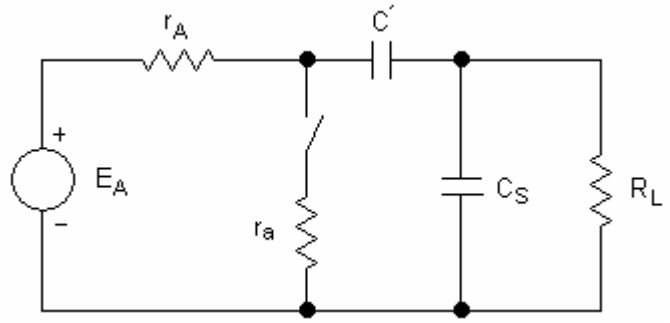
في كل المعدلات ، نجد أن نبضة الإشعال أو القـدح Trigger Pulse القادمة مـن مولد النبضات هي التي تحدد زمن بداية إرسال النبضة ، في حين أن خواص خط التأخير أو شبكة تشكيل النبضة (أو سعة المكثف في حالة المعدل الصلب) هـي التي تحدد عرض النبضة وبالتالي دقة القياس والتمييز في المدى .



الشكل 7-16 دائرة معدل نبضي

يمكن تمثيل معدل الصمام الصلب بدائرة مكافئة تشتمل على مفتاح مثالي علـى التوالي مع مقاومة مصعد r_a لتمثيل الصمام كما بالشكل 7-17. المقاومة R_L تمثل

الحمل في حين يمثل المكثف C_S السعة المتناثرة Stray Capacitance الناشئة من أجزاء دائرة الخرج المختلفة . يمثل E_A جهد مصدر التغذية بالتيار المباشر وتمثل المقاومة r_A مقاومته في حين يمثل المكثف 'C مكثف الربط مع الحمل . تؤثر كل من السعة المتناثرة للفات المحول وبقية أجزاء الدائرة بالإضافة إلى سعة الحمل غير الواردة على الدائرة المكافئة في شكل النبضة المنتجة حيث يتشوه غلافها ولا يكون مستطيلاً تماماً كما هو متوقع .

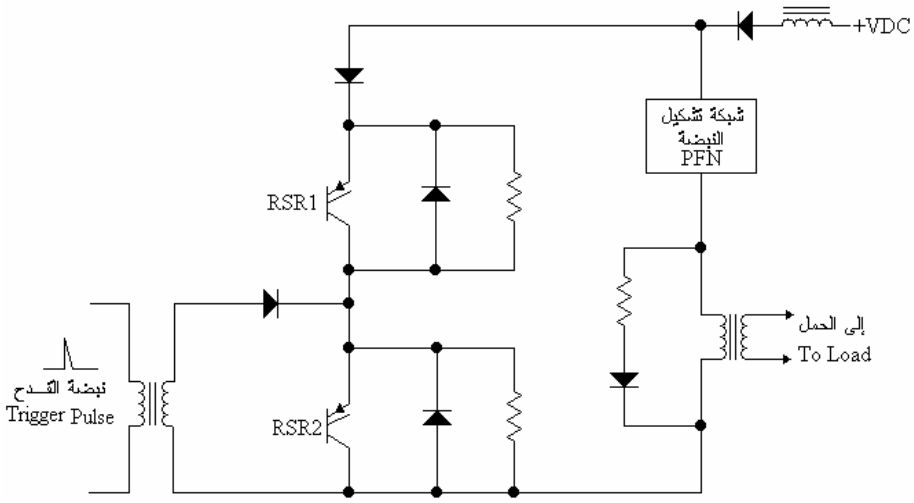


بالشكل 7-17 الدائرة المكافئة للمعدل

من أمثلة أدوات الحالة الجامدة المستخدمة في المعدلات النبضية مقوم عكس التوصيل Reverse-switching Rectifier والذي يستخدم بدلاً من الثايرستور SCR نسبة إلى العيوب المتعلقة بقفل وفتح الثايرستور .

بخلاف الثايرستور ثلاثي الأقطاب ، فإن RSR ثنائي القطب ويتم بدء توصيله للتيار بواسطة الارتفاع المفاجئ في الجهد بين مصعده ومهبطه وليس بواسطة نبضات القدح . يتواصل سريان التيار حتى هبوطه إلى مقدار أقل من تيار المسك Holding Current ، مثلما في الثايرستور .

الشكل 7-18 أدناه يوضح معدل من النوع الخطي يستخدم في تكوينه مفتاحين RSR . يتم رفع جهد نبضة الإشعال بواسطة محول رافع للحصول على نبضة يتعدى معدل تغير جهدها 15kV/µs تعمل على انهيار المفتاح RSR2 ، والذي يعمل بدوره على انهيار المفتاح RSR1 فتفرغ شحنة شبكة تشكيل النبضة عبر المحول لتنتقل الطاقة منه إلى الحمل .



الشكل 7-18 معدل RSR

يستخدم الترانزستور الحقلي FET لتحقيق المعدل النبضي وذلك بتوظيف مصفوفات مشكلة من عدد من الترانزستورات لزيادة القدرة القصوى ورفع الاستمرارية Reliability . تمتاز هذه النوعية من المعدلات بخاصية التعطل التدريجي Fail Soft ، فلا يتعطل المعدل بتلف أحد عناصره ، ولكن يقلّ أداؤه تدريجياً إلى أن يؤثر ذلك على القدرة المنتجة بالمرسل بشكل واضح .

أسئلة وتمارين

1- اذكر خواص مرسل الرادار التي تؤثر في اختياره للعمل بنظام الرادار .

2- بالرسم وضح التركيب الداخلي للماغنترون المحوري مع شرح طريقة عمله .

3- مع الشرح ارسم الدائرة المكافئة للماغنترون . اشرح المقصود بجهد هارتري مع رسم بياني توضيحي له .

4- اشرح دور شبكة تشكيل النبضة PFN في معدل الرادار .

5- ارسم دائرة مرسل رادار كامل تحتوي على معدل يستخدم شبكة تشكيل النبضة وصمام ثايرترون يقوم بتعديل إشارة خرج ماغنترون عن طريق محول نبضي مع التوضيح على الرسم .

6- اشرح طريقة عمل الصمام الخماسي بالتفصيل .

7- دائرة مكبر جهـد مقاومة دخلها 10MΩ وتستخدم صماماً ثلاثـياً معامل تكبير التيار به $G_m = 10mA/V$ ومقاومة حمل مصـعده $R_a = 10K\Omega$ ، فـإذا كانـت المقاومة الموصولة بالمهبط $R_k = 500\Omega$ ارسم الدائرة الإلكترونية كاملـةً ثـم أوجد معامل تكبير الجهد للدائرة .

8- وضح العلاقات الرياضية بين كـل مـن التيـار والجهـد والقـدرة لصـمام الكلايسترون ، ثم قارن بين مزايا وعيوب كل من الكلايسترون وصمام الموجة الراحلة .

9- مرسل يستهلك قدرة متوسطة 10kW ويعمل بدورة عمل 0.1% بكفاءة 40% ، أوجد القدرة القصوى المرسلة إذا كان فقد خط التوصيل والمزدوج 2dB وكسب الهوائي 32dB .

10- صمام كلايسترون يعمل في الظروف الطبيعية لعمله بجهـد بـين المصـعد والمهبط مقداره 39kV ، أوجد كل من شدة التيار المار به والقدرة المستنفدة إذا كان معامل الصمام واحد .

الباب الثامن

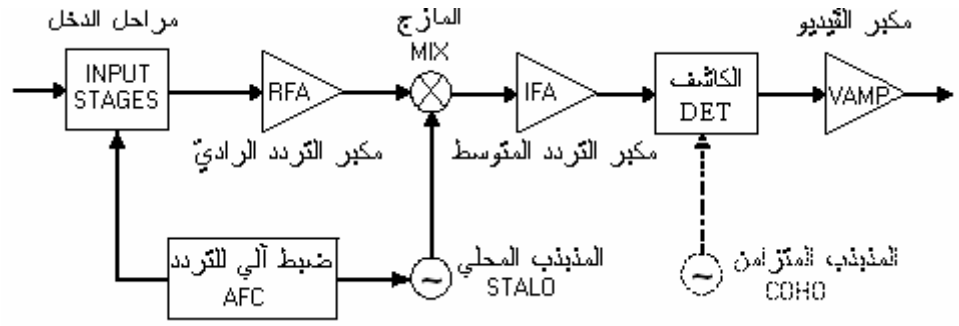
مستقبلات الرادار

8-1 خواص المستقبل

إن الدور الرئيسي لمستقبل الرادار هو التقاط و كشف نبضات الصدى القادمة من الأهداف في ظل وجود أنواع التداخل المختلفة مـن تشـويش وضوضـاء تـأتي مصاحبة للإشارات وزخم ناتج عن وجود أجسام أخرى تشارك الأهداف المطلوبـة نفس المجال .

كما سبق ذكره في الباب الثالث ، فإن المستقبل يعمل علـى تكبيـر الإشـارات الملتقطة بواسطة الهوائي إلى مستوى يمكن التعامل معه . كما يقوم بإجراء العديـد من المعالجات على الإشارة كتلك التي ورد تفصيلها في الباب الرابـع مـن هـذا الكتاب كالترشيح والتكبير اللوغريتمي والتفاضل والتحكم الزمني بالتكبير وتكامـل النبضات وتثبيت معدل الإنذارات الكاذبة بالإضافة إلى أول مستويات الكشف وهي إزالة تعديل الإشارة لإنتاج نبضات الفيديو .

يمكن تمثيل تركيب مستقبل الرادار بالمخطط الصندوقي في الشـكل 8-1 أدنـاه والذي يتضح به تعديلات للمخطط السابق عرضـه بالشـكل 3-3 بحيـث يضـم المخطط مراحل الدخل التي تشمل المزدوج ودوائر الحماية والتنغيم بالإضافة إلـى المذبذبات المحلية والتحكم الآلي بالتردد .



الشكل 8-1 مستقبل الرادار

كما يتضح من الشكل فإننا اعتمدنا استخدام النـوع السـوبر هيتـرودايـن مـن المستقبلات والذي يتم فيه تغيير تردد الإشارة الرادية المستقبلة إلى تردد متوسـط ثابت ومحدد لأي مستقبل . إلا أنّه توجد بعض المستقبلات التي بهـا أكثـر مـن مغـير ترددات Frequency Converter or Translator ، وبالتالي أكثر من تـردد متوسط واحد . تضم مراحل الدخل عادة مرشح BPF بغرض تقليـل الضوضـاء والتداخل من القنوات المجاورة والتخلص من الإشارة الصورة Image Rejection ، وهي إشارة يمكن استقبالها من مصدر خارجي ويزيد أو يقل ترددها عـن تـردد الرادار بضعف التردد المتوسط للمستقبل .

يتم تمييز مستقبل رادار ما عن مستقبل آخر بالنظر إلى الخواص الفنية والفيزيائية لكل منهما والتي تتلخص بشكل عام فيما يلي :

1. الحساسية Sensitivity
2. الاختيارية Selectivity
3. معامل الضوضاء Noise Figure
4. السعة الترددية Bandwidth
5. المدى الديناميكي Dynamic Range
6. الاستقرارية في الطور Phase Stability
7. منع التداخل Interference Rejection
8. العزل والحماية Isolation and Protection

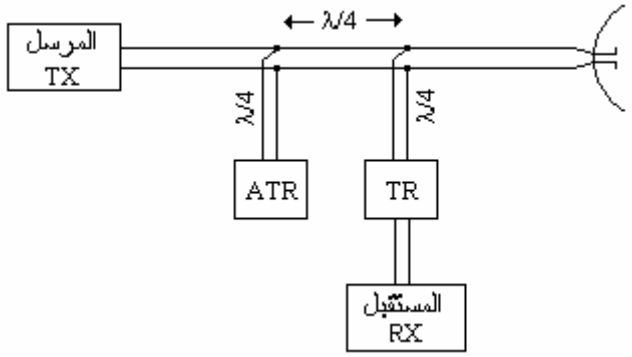
2-8 المزدوج

يمثل المـزدوج Duplexer ، أو مفتـاح الهـوائي Antenna Switch ، الوحـدة المشتركة بين كلّ من مرسل ومستقبل الرادار النبضي والتي تعمـل علـى عـزل مستقبل الرادار عن دوائر الإرسال وحمايته من الإشارات عالية القدرة .

يستخدم مزدوج الرادار النبضي ذو القدرة القصوى العالية مفرغات الشرر الغازية Gas Dischargers كأدوات أساسية في تركيبه في حين تُستخدم المفاتيح الإلكترونية مثل ثنائيات بِـ ـن PIN Diodes في أنظمة الرادار ذات القدرة القصوى المنخفضة . ويقدر عزل المزدوج بين المرسل والمستقبل بنسبة القدرة القصوى للمرسـ ـل إلـ ـى القدرة الآمنة عند دخل المستقبل دون حدوث تلف بدوائره والذي يعادل

$$\text{Isolation} = P_t / P_{r\,(max)} \qquad 8\text{-}1$$

مثال لذلك رادار القدرة القصوى لمرسله 1MW وأكبر قدرة ممكنة عند مـ ـدخل مستقبله 2.5W يجب ألا يقل عزل المزدوج الذي يستخدمه عن 56dB . توجد عدة أنواع من المزدوجات تختلف في طبيعة تكوينها والنطاق الترددي الـ ـذي تصـ ـلح للعمل به . يعتبر المزدوج المتفرع Branch-type [1] من الأنواع الشائع اسـ ـتخدامها في الأنظمة المترية في نطاق التردد العالي جداً والذي يستخدم أجـ ـزاء محسـ ـوبة الأطوال من الكوابل المحورية كما في الشكل 8-2 أدناه . تستخدم مفرغات الشرر لقصر الدائرة الكهربية عند الإرسال بفعل تأين الغاز الموجود بداخلها والتي يعتمد دور أي منها على الغرض منه ، إذ يمكن أن يكون مفرغ الشرر المعـ ـين مفتـ ـاح إرسال-استقبال TR Switch أو مفتاح عكس إرسـ ـال-اسـ ـتقبال ATR (Anti TR) Switch .



الشكل 8-2 المزدوج المتفرع

في حالة الإرسال يتأين الغاز بالمفتاحين ويحدث بهما شرر فيعمـ ـل مفتـ ـاح TR كدائرة قصيرة تمنع وصول إشارة المرسل عالية الجهد إلى مدخل المستقبل ، ولأنّه

يبعد عن خط النقل الرئيسي بمقدار ربع الطول الموجي فإنّه يظهر كدائرة مفتوحة بالنسبة للخط وبالتالي لا يؤثر على الإشارة المرسلة في طريقها من المرسل إلى الهوائي . نفس الشيء ينطبق على مفتاح ATR فهو يبدو كدائرة مفتوحة بالنسبة لخط النقل الرئيسي لبعده بربع الطول الموجي عنه . لمعرفة المزيد عن المحول ربع الموجة واستخدام الخطوط المبتورة Stubs المفتوحة والمقصورة يستحسن الرجوع إلى مرجع في نظرية خطوط النقل .

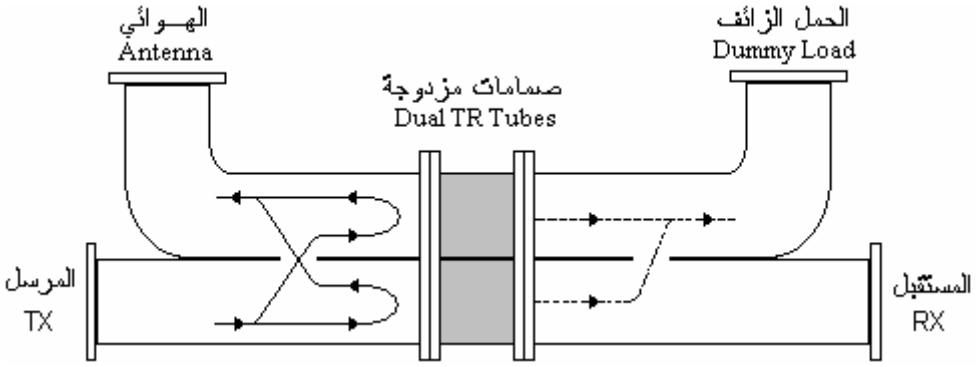
أما في حالة الاستقبال فيكون المرسل معطلاً ولا يحدث شرر في أي من المفتاحين ، فيبدو المفتاح ATR كدائرة قصيرة عند خط النقل ومفتوحة عند نقطة التفرع إلى المستقبل وبالتالي يمكن اعتبار المرسل غير موصول مع الخط وتمر إشارة الصدى القادمة من الهوائي إلى المستقبل دون المرسل .

يتضح مدى اعتماد أداء هذا المزدوج على الطول الموجي للإشارة المرسلة وبالتالي نجد سعته الترددية محدودة مما يقلل من المرونة في تغيير تردد الرادار . كما نجده لا يصلح للترددات الأعلى من النطاق المتري كالموجات المكروية والتي لا تُستخدم بها الكوابل لنقل القدرة العالية ، أضف إلى ذلك محدودية القدرة القصوى التي يمكنه التعامل معها .

من المزدوجات عالية الأداء والعاملة في نطاق الموجات المكروية المزدوج المتوازن Balanced Duplexer والذي يستخدم مقاطع من دليل الموجة . تعتمد فكرة عمل هذا المزدوج على استخدام وصلة هجينية Hybrid Junction بها شق قصير بالجدارين الرقيقَين لمقطعي دليلَي الموجة الملتصقين كما يتضح من الشكل 3-8 أدناه .

تشكل الوصلة الهجينية المكونة للمزدوج رابطاً متجهاً Directional Coupler ، نسبة ربطه تعادل 3dB [1] . في حالة الإرسال تنقسم القدرة القادمة من المرسل بالتساوي في دليلَي الموجة عبر الشق الأول ، فيقوم كل من مفتاحي TR بالتأين وعكس القدرة الساقطة إلى الهوائي كما يتضح من الخطوط المتصلة والتي تمثل

اتجاه القدرة المرسلة بالشكل . تتجه القدرة المتسربة عبر المفـاتيح إلـى الحمـل الزائف Dummy Load بدلاً من ذهابها إلى المستقبل .



الشكل 8-3 المزدوج المتوازن

أما في حالة الاستقبال ، لا تتأين المفاتيح فتمر إشارة الصدى كاملة عبر المزدوج من الهوائي إلى المستقبل . تنقسم القدرة بالتساوي عند الشـق الأول ، ولكن لتقدم الإشارة بزاوية طور مقدارها 90° عند عبور الشق تتراكم الطاقة في اتجـاه دليـل الموجة المتجه نحو المستقبل وليس الآخر المتجه نحو الحمـل الزائـف ^{2}. يمتـاز المزدوج المتوازن بقدرة قصوى كبيرة مقارنة بالمزدوج المتفرع وبسـعة ترددية أكبر تصل إلى 10% من تردد الإشارة الرادارية .

مفرغات الشرر الغازية التي تعمل كمفاتيح فـي مـزدوج الـرادار ذي القـدرة القصوى العالية هي عبارة عن صمامات مفرغة من الهواء ومملوءة بغـاز سـريع التأين عند القدرات الرادية العالية . إلى جانب سرعة تأينها يجب أن تكون كـذلك سريعة في فقد التأين Deionization لدى اختفاء القدرة الرادية المنتجـة بواسـطة المرسل .

تُملأ تلك الصمامات عادة بغاز الأرغون لانخفاض جهد انهياره ولتطويـل عمـر تشغيل الصمام ، إلا أن استخدام الأرغون النقي يقلل من سرعة فقـد التـأين ممـا يجعل مفرغ الشرر غير ملائم للاستخدام للرادار قصير النبضة . يتم إسراع عملية فقد التأين بإضافة بخار الماء إلى الأرغون ، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل استمرارية وعمر عمل الصمام .

للحصول على صمام سريع وعـالي الاسـتمرارية ، يـدمج مصـدر إضـافي للإلكترونات بداخل الصمام يعمل على انتشار بعض الإلكترونات الحرة بالصـمام تساعد على التأين فور ظهور القدرة الرادية . يعمل مصدر الإلكترونات هذا علـى المحافظة على حياتها Keep-alive وهو عبارة عن مفرغ تيار مباشر ضـعيف أو مصدر إشعاع نشط Radioactive .

3-8 حماية المستقبل

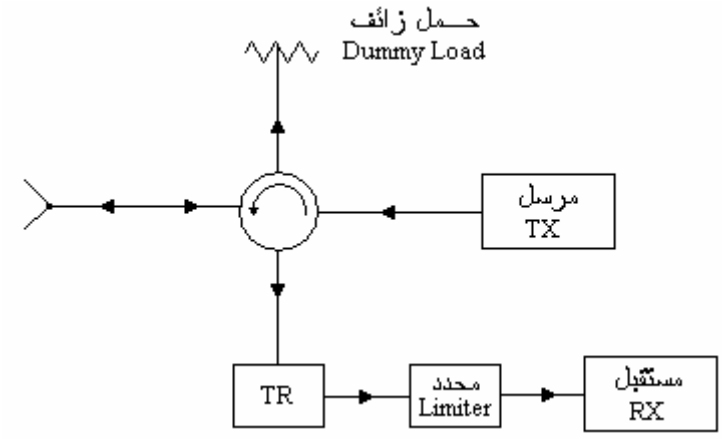
تعمل مفاتيح TR التي تستخدم مفرغات الشرر على قصر الدائرة في حال وجود القدرة الرادية العالية المنتجة في المرسل مما يصعب من وصولها إلـى المسـتقبل عبر المزدوج ولكن لا يمنعه كلية . كذلك يحتاج المسـتقبل أيضـاً إلـى الحمايـة Protection من الإشارات القوية من المرسلات المجـاورة أو إشـارات الصـدى المنعكسة من الأجسام القريبة للهوائي والتي قد تؤدي إلى تلفه أثناء فترة الاسـتقبال التي لا يعمل بها المرسل أو عند توقف الرادار عن العمل .

تتأثر مراحل دخل المستقبل بتلك الإشارات القوية أكثر من غيرها لا سيما المازج البلّوري الحساس الذي يستخدم في الأنظمة المكروية ويوضع داخل دليل الموجـة لاستخلاص إشارة التردد المتوسط من الإشارة الرادية المستقبلة وإشارة المذبـذب المحلي . يستخدم غطاء معدني لإغلاق دليل الموجة القادم من الهوائي ليشكل دائرة قصيرة للإشارات في حال تعطيل الرادار عن العمل لفترة من الزمن .

تستخدم الثنائيات بأنواعها مثل ثنائي PN وثنائي PIN لإضعاف القدرة الراديـة المتجهة إلى المستقبل وذلك بدون تسليط جهد انحياز على الثنائيات في حال القدرة المنخفضة نسبياً . أما في حال القدرات العالية ، تستخدم إشارة إطفـاء Blanking تأتي من وحدة التزامن لحظة الإرسال لتوفير انحياز أمامي للثنائيات لمنع الإشـارة من الوصول إلى المستقبل .

تستخدم أدوات الفرايت Ferrite في تركيب كثير من المزدوجات وفـي حمايـة المستقبلات بالرادار بديلاً عن مفرغات الشرر . يمتاز ثنـائي الفرايـت بسـرعته

العالية التي تصل إلى أقل من نانو ثانية وبعمر غير محدود ما لم يتم تخطى القدرة القصوى له . إلاّ أن تلك الأدوات ذات أحجام كبيرة مقارنة بأدوات الحماية الأخرى وبها فقد كبير في القدرة ، الأمر الذي يتطلب تبريد تلك الأدوات بالهواء أو الماء .



الشكل 8-4 الدوار

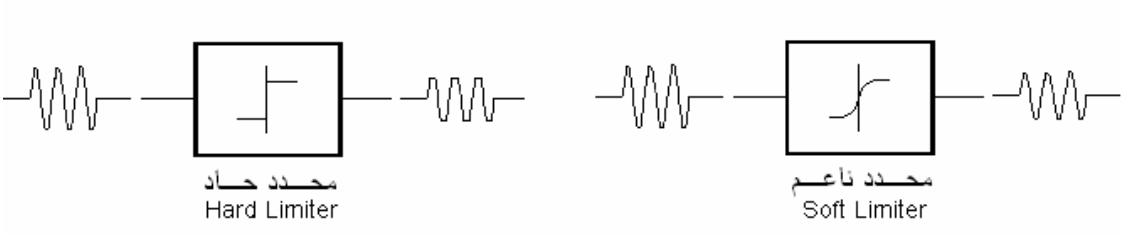
يعد الدوار Circulator من أدوات الفرايت الشائعة الاستخدام في الرادار المستمر والنبضي على السواء حيث يغني عن استخدام المزدوج . كما يتضح مـن الشـكل 8-4 أعلاه ، فالدوار عبارة عن أداة ذات ثلاثة منافذ أو أربعة يوصل أحدها بحمل زائف . يوفر الدوار عزل لا بأس به بين المرسل والمسـتقبل ، إلا أن المسـتقبل يحتاج إلى الحماية الإضافية بدرجة أكبر عند استخدام الدوار . بصـورة عامـة ، ليس العزل بين منافذ المرسل والمستقبل فقط هو الذي يحدد مقدار القدرة المتسربة إلى المستقبل ، ولكن نجد أن عدم توافق ممانعة الهوائي في حالة الإرسال تـؤدي إلى انعكاس جزء من القدرة المرسلة من الهوائي إلى المستقبل مما يزيد من مقدار التسريب . يمتاز الدوار بالعمر الطويل والتماسك الميكانيكي إلى جانب تفوقه على المزدوج بالسعة الترددية الكبيرة .

8-4 المحدِّدات

إضافة إلى إمكانية إتلاف دوائر دخل المستقبل ، يمكـن أن تـؤدي الإشـارات المستقبلة القوية إلى تشبع Saturation مراحل التكبير المختلفة بالمستقبل مما يـؤثر في خطية المكبرات وبالتالي يؤدي إلى حدوث تشويه بالإشارة . كما يمكن أن تقود

إشارة الدخل الكبيرة المكبر إلى الدخول في حالة لا يمكنه الرجوع منها وتؤثر في أدائه وكفاءته مثل سحبه لتيار مباشر أكبر أو عدم استقرار خواصه وبالتالي إمكانية تولد إشارات أخرى في خرجه .

تعتبر مراحل الفيديو من أكثر مراحل المستقبل قابلية لحدوث التشبع نسبة لكبـر الإشارة المارة بها وصغر ترددها إذ تحتاج إلى زمن أطول للرجوع إلـى أدائهـا الطبيعي مقارنة بمكبرات التردد المتوسط . لتقليل احتمال التشبع ، يستخدم مستقبل الرادار محـدداً Limiter واحداً أو أكثر لمطال الإشارة الرادارية . يمكن أن يـتم التحديد في آخر مراحل التردد المتوسط قبيل إزالة التعديل حيث يفضـل اسـتخدام محدد ناعم Soft Limiter قبل الكشف وذلك لضمان تناسب الإشارة المكتشفة مـع قوة إشارة الصدى ، لا سيما عند استخدام كاشف الغلاف . أما في حالة اسـتخدام كاشف الطور ، فيفضل الاستفادة من محدد حـاد Hard Limiter للحصـول علـى إشارة في دخل الكاشف تعتمد فقط على طور الإشارة الرادارية دون المطال كمـا بالشكل 8-5 أدناه .



الشكل 8-5 المحدد الحاد والناعم

للمحدد ثلاثة عوامل هامة هي كفاءة أدائه في وجود الضوضاء ، انتظام مطـال إشارة الخرج وانتظام طورها . كفاءة أداء المحدد في وجود الضوضاء يعبر عنها مدى نجاح المحدد في تحديد الإشارات المدفونة داخلها وبالمحافظـة علـى نسـبة الإشارة إلى الضوضاء بين الدخل والخرج . قام قـاردنر[2] Gardner بعمل تقريب مفيد لإيجاد علاقة بين نسبة الإشارة إلى الضوضاء في خرج المحدد مع نظيرتهـا في الدخل كما يلي

$$SNR_o = SNR_i \ (1 + 2\ SNR_i) / (4/\pi + SNR_i) \qquad 8\text{-}2$$

وعندما تكون تلك النسبة في الدخل أكبر كثيراً من واحد $SNR_i \gg 1$ نحصل على

$$SNR_o = 2\ SNR_i \qquad 8\text{-}3$$

وحين تقل بكثير عن واحد $SNR_i \ll 1$ نحصل على

$$SNR_o = \pi/4\ SNR_i \qquad 8\text{-}4$$

تساعد المحددات في زيادة المدى الديناميكي للمستقبل وهو مدى إمكانية تعامل المستقبل مع الإشارات القوية والضعيفة في نفس الوقت ، ويقدر بالفرق بين مطال أقوى إشارة لا تتلف المستقبل ولا تشبع دوائره ومطال أقل إشارة مكتشفة . لذا فإن المدى الديناميكي يتأثر بما يلي :

- أقل إشارة مكتشفة MDS للمستقبل وهي إشارة الدخل التي تعطي نسبة إشارة إلى الضوضاء عند مخرج المستقبل تعادل واحداً
- أقصى انحراف مسموح به في أداء المستقبل
- نوع الإشارة الرادارية من حيث طبيعة الأهداف الموزعة أو النقطية والتداخل ذو النطاق العريض Wideband Interference

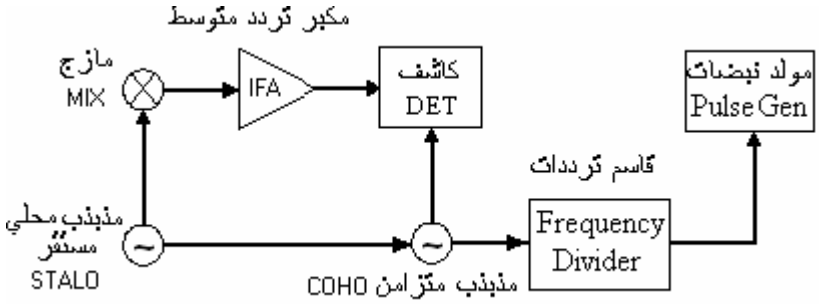
عدم الضبط الصحيح للمدى الديناميكي لمستقبل الرادار يجعله معرضاً للتداخل بنوعيه ؛ المقصود وغير المقصود ، والذي غالباً ما يؤدي في مجمله إلى التشبع والزيادة في الحمل . يفضل الرجوع إلى الباب الرابع لمعرفة المزيد عن أهمية المدى الديناميكي .

8-5 المذبذبات المحلية

يستخدم مستقبل الرادار السوبر هيترودابن عدة مذبذبات في تركيبه إذ يستخدم مذبذباً محلياً أو أكثر لتغيير تردد الإشارة المستقبلة إلى التردد أو الترددات المتوسطة . كما نجد المذبذب المتزامن للكشف المتزامن بواسطة كاشف الطور بالإضافة إلى مولّد نبضات التزامن الأساسية بالرادار . تزداد الحاجة إلى

استقرارية كل من مطال وطور المذبذب المحلي في الأنظمة المتزامنة والتي تعتمد في عملها على المعلومات الدوبلرية المضمنة بالإشارة المستقبلة .

المذبذب الرئيسي في مستقبل الرادار هو مذبذب جيبي ذو تردد يفوق أو يقل عن تردد المرسل بمقدار التردد المتوسط . يعرف هذا المذبذب في بعض من المراجع بالمذبذب المحلي المستقر Stable Local Oscillator وتختصر STALO . أما المذبذب الجيبي الثاني والمستخدم في الكشف المتزامن ويعادل تردده التردد المتوسط للمستقبل فيعرف بالمذبذب المتزامن Coherent Oscillator وتختصر COHO . بالنسبة لمولّد نبضات التزامن أو الإشعال فهو مولّد نبضي تردده هو تردد تكرار نبضة الرادار PRF والذي يحدد المدى الأقصى للرادار دون حدوث التباس في القياس . ليس لنبضة مولد النبضات هذا أي شكل موجي بعينه غير أنها يجب أن قصيرة وبها حافة حادة كالنبضة المستطيلة أو المثلثية .



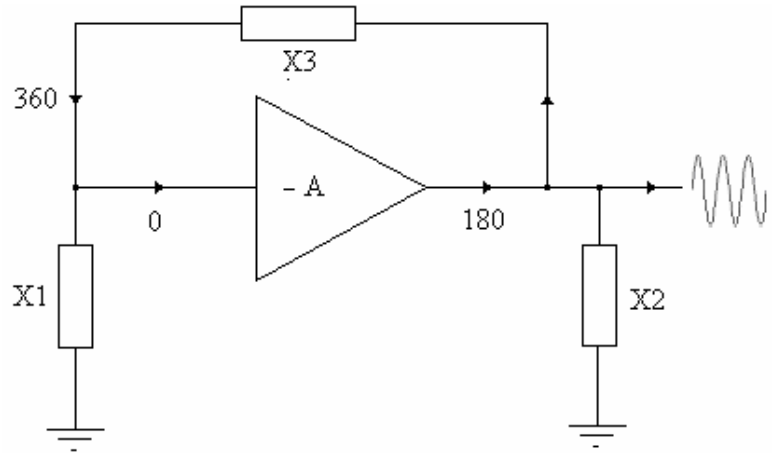
الشكل 8-6 المذبذبات المحلية بالرادار

في معظم الأنظمة المتزامنة يستخدم المذبذب المحلي المستقر لإنتاج الإشارة المرسلة قبل تكبيرها بواسطة المرسل من النوع مكبر القدرة ، وذلك إلى جانب دوره في تغيير التردد بالمستقبل وضبط تزامن كل من المذبذب المتزامن ومولّد نبضات التزامن الأساسية كما بالشكل 8-6 أعلاه . تعتمد إمكانية تغيير تردد الرادار على كفاءة واستقرارية هذا المذبذب بين الترددات المختلفة ، ويتوفر له ذلك بوجود وحدة للتحكم الآلي بضبط التردد AFC .

المذبذب هو عبارة عن مكبر يتم تصميمه للتذبذب باستخدام التغذية العكسية الموجبة Positive Feedback وفق شروط معينة . لضمان إنتاج الإشارة الجيبية من

المذبذب يشترط أن يكون معامل تكبير المكبر كافياً وأن تتساوى زوايا طور كـل من الإشارة المغذاة عكسياً وإشارة دخل المكبر . بمعنى أوضح يجـب أن تكـون محصلة الإزاحة في الطور بسبب المكبر ودوائر التغذية من أي نقطة وبـالرجوع إليها تعادل 360° أو إحدى مضاعفاتها .

إذا ما تم استخدام مكبر عاكس للطور مثل المبين في الشكل 8-7 أدنـاه بحيـث تتوفر إزاحة مقدارها 180° بين الخرج والدخل ، فإن شـرطي التذبـذب يكونـان معامل التكبير الكافي للمكبر ومساواة إشارة مفاعلة Reactance كل مـن الـدخل والخرج المشار إليهما في الشكل X1 , X2 ومخالفتها لإشارة مفاعلة دائرة التغذيـة العكسية X3 . يعتمد تردد الإشارة الجيبية المستقرة بعد المرحلة العابرة على قـيم الملفات والمكثفات التي تحقق الشروط أعلاه .

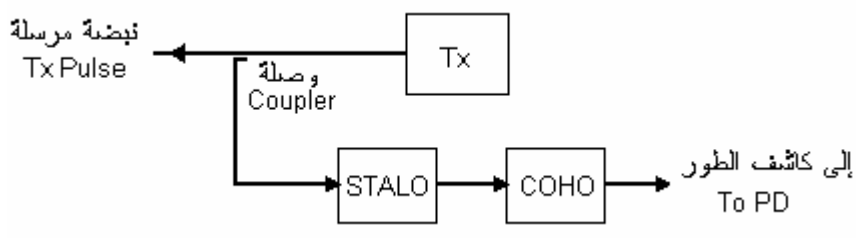


الشكل 8-7 الدائرة العامة للمذبذب

مما سبق إذا كانت كل من X1 , X2 محاثتَين (ملـفين) وكانـت X3 سـعة (مكـثـفاً) ، فإننا نحصل على ما يعرف بمذبذب هارتلي Hartley ، أما إذا كانتـا مكثفين وكانت X3 ملـفاً فنحصل على مذبذب كولبيت Colpitt . إلاّ أن اسـتخدام الملفات والمكثفات في تحديد التردد يلائم المذبذبات البسيطة التي يتأرجح ترددهـا بصورة شبه مستمرة كما في أجهزة الاستقبال الرخيصة ولكنه لا يلائـم الأنظمـة التي تحتاج إلى استقرارية عالية في التردد كالرادار . يأتي عدم الاستقرار في تلك المذبذبات من اعتماد التردد فيها على خواص المكبر وعلى استقرار تلك الخواص

مع التغير في درجة الحرارة ، إضافة للتذبذب في جهد مصدر التغذية مما يسـبب انجرافاً في التردد Frequency Drift .

إذا كان المرسل يستخدم أداةً عالية القدرة ذاتية التذبذب مثل الماغنترون ، تؤخـذ عينة من إشارة الخرج بواسطة رابط Coupler ذي توهين كبير لتعمل على ضـبط طور كل من إشارة المذبذب المحلي وإشـارة المذبـذب المتـزامن حتـى تكونـا متزامنتين مع الإشارة المرسلة .



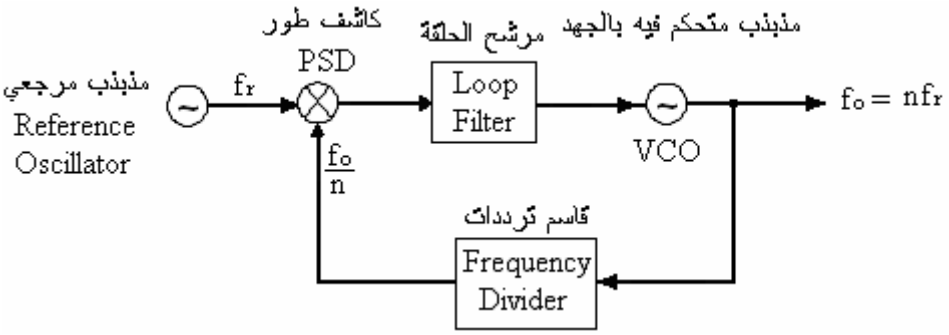
الشكل 8-8 التحكم بواسطة المرسل

لزيادة الاستقرارية ، تستخدم بلورة الكوارتز في دوائـر المذبـذبات لاتّصـافها بمعامل جودة Quality Factor عالي جداً يعمل على تقليل انجراف التردد . إلا أننا نجد في المقابل أن مذبذب البلورة Crystal Oscillator غير مرن في تغيير التردد ، الأمر الذي لا يناسب الأنظمة التي تحتاج إلى تغيير ترددها لا سيما العسكرية منها ومما يستدعي توفير مذبذب له نفس الاستقرارية العالية مع إمكانية تغيير تردده عند الطلب .

يستخدم التحكم الآلي في التردد AFC لضمان استقرار تردد كل مـن الإشـارة المنتجة في مولد التردد الرادي بالمرسل وإشارة المذبذب المحلي بالمستقبل . يـتم استخدام مذبذب البلورة كمذبذب مرجعي للتحكم في تردد مذبذب يتحكم فيه بالجهد VCO بعد مقارنة ترديهما وذلك باستخدام كاشف طور حساس يتبعه مرشح LPF. تشكل منظومة التحكم هذه حلقة طور مغلقة PLL تعمل على مساواة تردد المذبذب المراد التحكم فيه بتردد المذبذب المرجعي وبفرق ثابت في الطور .

للحصول على إمكانية تغيير تردد المذبذب بصورة رقمية ، يـتم إدخـال قاسـم ترددات قابل للبرمجة داخل الحلقة المغلقة فنحصل على ترددات تعادل مضـاعفات

التردد المرجعي اعتماداً على نسبة قسمة الترددات . الشكل 8-9 أدناه يوضح تلك المنظومة والتي تعرف بمركب أو مؤلـف التـرددات Frequency Synthesizer . تعتمد استقرارية التردد في مركب الترددات بصورة كبيرة على كل مـن خـواص مرشح الحلقة واستقرارية المذبذب المرجعي . في حين تعتمـد سـرعة اسـتجابة المنظومة لتغير نسبة قسمة الترددات على خواص مرشح الحلقة وسرعة اسـتجابة المذبذب المتحكم فيه بالجهد .



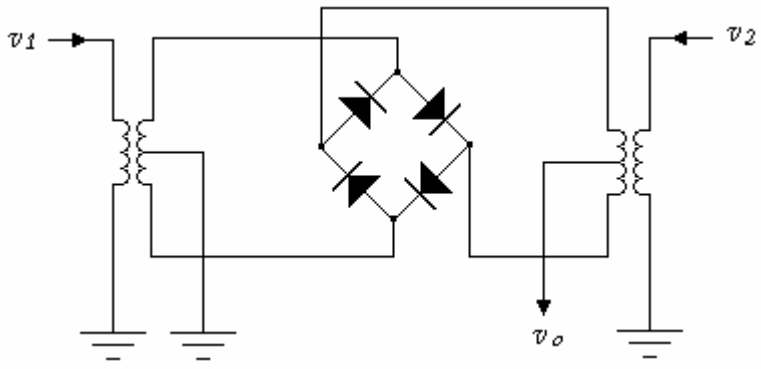
الشكل 8-9 مركب الترددات

8-6 المازجات والكاشفات

يشـار في كثير من المراجع [2] إلى أي دائرة بالمستقبل ككاشف طـور إذا مـا كانت بإشارة خرجها معلومة الطور فقط دون المطال ، وككاشف متـزامن عنـد اشتمال إشارة الخرج الطور والمطال ، وكمازج في حال اشتمالها كل من الطـور والمطال والتردد .

نجد أن هنالك عدة دوائر تماثلية ورقمية تستخدم لتحقيق المازجـات والكاشـفات المتزامنة وكاشفات الطـور . يسـتخدم ضـارب الإشـارة Signal Multiplier للحصول على حاصل ضرب إشارتين طورياً ويستخدم في مزج الإشارات التماثلية ليعطي خرجاً به إشارة تردد الفرق وإشارة تردد المجموع مثلما يتضح من المعادلة 3-2 . من أبرز تلك المازجات المعدل المتـوازن Balanced Modulator الـذي يستخدم ثنائيين كمفاتيح إلكترونية ، والكاشف الحلقي Ring Detector والموضح في الشكل 8-10 أدناه والذي يستخدم أربعة ثنائيات .

يمتاز المازج الأخير باستجابة جيبية وبخلو إشارة خرجه من مركبة التردد الأساسي عند تعامله مع الإشارات الجيبية ، في حين تكون استجابته مثلثية في حالة الإشارة المربعة Square Wave . لضمان أدائه ، تستخدم ثنائيات متماثلة من نوع Hot-carriers سريعة الفتح والغلق مع محولاّت متوازنة ذات سعات ترددية كبيرة .



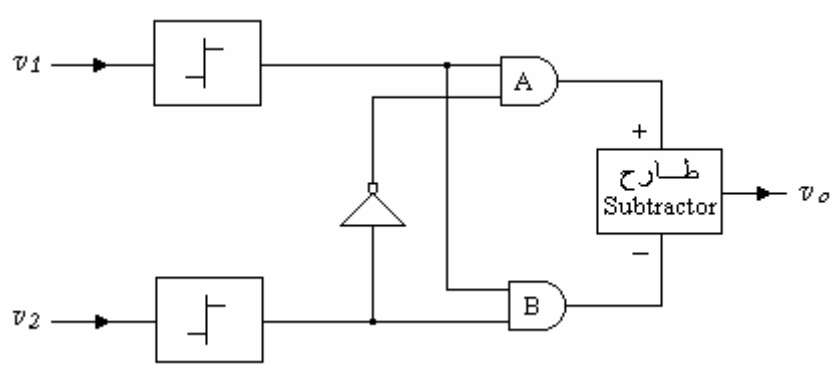
الشكل 8-10 المعدل المتوازن

كثيراً ما يستخدم الترانزستور لتحقيق المازج لا سيما في تغيير التردد الإشارة الرادية إلى التردد المتوسط كما يتضح في دائرة المستقبل الشكل 8-12. تعتمد فكرة عمل الترانزستور كمازج على إدخال إشارة الدخل الأقل جهداً إلى دائرة القاعدة ، بينما تدخل الأخرى على دائرة المشع .

يتعامل الترانزستور مع الإشارة الصغيرة كمكبر في هيئة المشع المشترك Common Emitter بينما يتعامل مع الأخرى في هيئة القاعدة المشتركة Common Base . لعدم خطية الترانزستور ، تتولد بالخرج عدة مكونات ترددية من بينها التردد المتوسط والذي يتم فرز إشارته بواسطة دائرة الرنين المكونة من المكثف والملف المتوازيان .

من الكاشفات التي تحتوي عناصر تماثلية ورقمية في دوائرها ذاك الذي يعرف بكاشف طور التطابق Coincidence Phase Detector ذو الاستجابة المثلثية . إحدى تلك الدوائر المحققة للكاشف كتلك المبينة في الشكل 8-11 أدناه والتي تحتوي محددين وبوابتين AND وعاكس بالإضافة إلى طارح تماثلي . نجد أنّه عندما يكون لكل من الإشارتين v_1 , v_2 نفس الطور In-Phase ، فإن البوابة B تسجل التطابق

لنصف الوقت في حين تسجل البوابة A عدم التطابق مما ينتج عنه في الخرج أقصى إشارة سالبة ممكنة . أما عندما تكونان متعامدتين طورياً Out of Phase ، فتتكون الحالة العكسية وينتج في الخرج أكبر إشارة موجبة ممكنة . يمكن تحقيق نفس الكاشف أدناه باستخدام بوابة XOR ولكننا نحصل على مركبة تيار مباشر في خرج البوابة ليست ملائمة لكثير من تطبيقات كاشف الطور .



الشكل 8-11 كاشف التطابق

8-7 دائرة المستقبل

حتى يتم الربط بين أجزاء المستقبل وتتبع مسار الإشارة من خلاله ، يعرض الشكل 8-12 والموجود بنهاية هذا الباب دائرة إلكترونية كاملة بسيطة تمثل مستقبل رادار من نوع السوبر هيترودابن .

دائرة الرنين المكونة من المكثف C1 والملف L1 تمثل مرحلة الدخل والمنغم Tuner لاختيار تردد الإشارة المطلوبة . الخط المتقطع الواصل بين المكثف المتغير C1 والمذبذب STALO يوضح أن هنالك ربطاً ميكانيكياً مع دائرة المذبذب المحلي (أو إلكترونياً مع مركب الترددات) ، وذلك لضمان تغيير الترددين بحيث يظل الفرق بينهما بمقدار التردد المتوسط للمستقبل .

يمثل الترانزستور Q1 مكبر التردد الرادي والذي يستحب أن يكون مكبراً قليل الضوضاء LNA في حالة الترددات المكروية حيث تكون ضوضاء النظام أكبر من الضوضاء المحيطية Ambient Noise . أما في الترددات المنخفضة ، فلا نحتاج لمثل ذلك المكبر لارتفاع مستوى الضوضاء المحيطية مقارنة بضوضاء النظام

System Noise . نفس الأمر ينطبق على رادار التتبع الذي يستخدم تقنيات المسـح الميكانيكي لقياس زاوية اتجاه الهدف لتصحيح اتجاه شعاع الرادار ، وذلك بسـبب الضوضاء المحيطية الناشئة عن المسح .

تستخدم دائرة المستقبل المذكورة الترانزسـتور Q2 كمكبـر للإشـارة الراديـة وكمازج للإشارات وتستخدم الترانزستور Q3 كمكبر لإشارة التـردد المتوسـط . عادة يكون المكبر الأخير من عدة مراحل وليست مرحلة واحـدة وذلـك لزيـادة الحساسية وتحسين الاختيارية . الثنائي D1 يمثل كاشف الغلاف أمـا الثنـائي D2 فنحتاجه لتفريغ شحنة مكثف الربط C10 ولا نحتاجه في حالة الربط بمحول .

الدائرة المكونة من المكثفين C12 ، C13 والملـف L5 تمثـل مرشـح لتمريـر الترددات الدنيا LPF لترشيح إشارة الفيديو . كما يستخدم مكثف الربط C14 لتمرير الإشارة إلى مكبر الفيديو الذي يمثله الترانزستور Q4 . لا بد من أن يكون مكثـف الربط هذا ذا سعة كبيرة حتى لا تتأثر المكونات الترديـة المنخفضـة للإشـارة بممانعته والتي تزيد بانخفاض التردد .

مكبر الفيديو المستخدم في هذه الدائرة في هيئة المجمع المشترك أو تابع المشـع Emitter Follower من أجل الحصول على مقاومة خرج صغيرة . إذا كان مكبـر الفيديو من عدة مراحل ، يجب مراعاة استخدام مكثفات ربط ذوات سعات كبيرة أو ربطها مباشرة Direct Coupling للحصول على السعة الترددية اللازمة لنبضـات الفيديو عريضة النطاق . يجب في دوائر المبين تصحيح قطبية نبضة الفيـديو إذا كانت معكوسة ، كوجوب أن تكون سالبة لدى وصولها مهبط مبين PPI التقليدي .

تستخدِم هذه الدائرة مطال إشارة الفيديو المكتشفة للتحكم الآلي بكسـب مراحـل التردد المتوسط وزيادة المدى الديناميكي للمستقبل ، كما سبق شرحه فـي البـاب الرابع . يستفاد من الشحنة السالبة التي تظهر بالمكثف C12 لتعـديل جهـد خـط التحكم الآلي بالكسب AGC Line ، وبالتالي معامل كسب المكبر . غالباً ما تحتـاج إشارة AGC إلى تكبيرها بواسطة مكبر خاص بها قبل تمريرها إلـى خـط AGC

وذلك لرفع استجابة المستقبل للتغيرات الصغيرة في جهد إشارة الفيديو . كما يجب أن تكون لحظية الاستجابة IAGC لقصر نبضات الرادار وارتفاع معدل التغير في مطال إشارة الفيديو لا سيما مع الأهداف النقطية .

أسئلة وتمارين

1- اشرح كيفية التخلص من الإشارة الصورة Image Rejection في مستقبل الرادار .

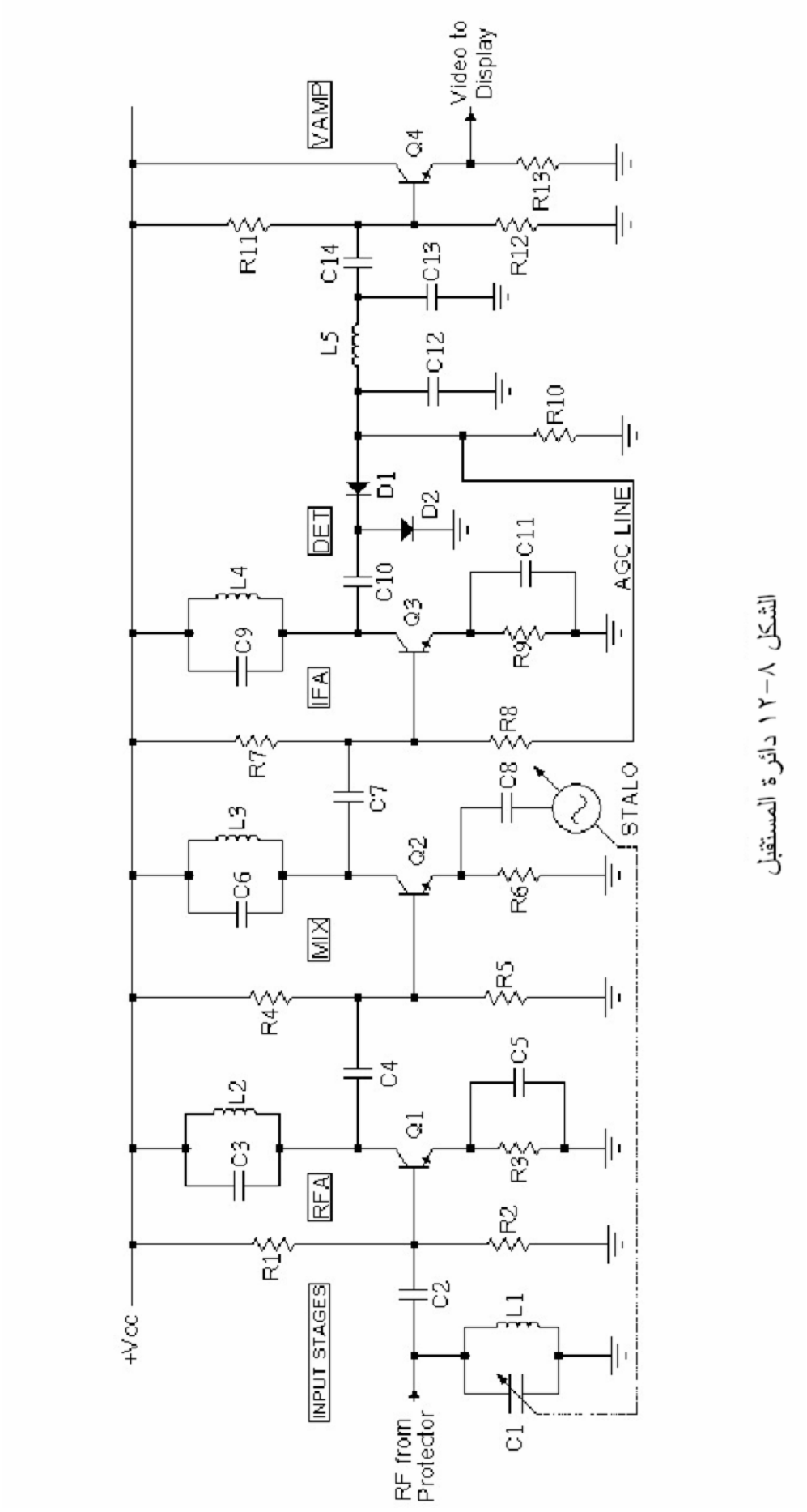
2- اشرح دور المحدد في مستقبل الرادار . بالمعادلات وضح علاقة قاردنر مع شرح الحالات الخاصة . ما المقصود بالمدى الديناميكي للمستقبل ؟ اذكر العوامل التي تؤثر به .

3- بالرسم اشرح طريقة عمل المزدوج المتفرع Branch-type بالتفصيل . مزدوج متفرع يعمل برادار متري تردده 150MHz ، أوجد طول خط النقل الرئيسي به بين نقطتي تفرع مفتاحي TR ، ATR . إذا كانت الممانعة الوصفية للخط 50Ω أوجد بعد أقرب نقطة تفرع من الهوائي عنه إذا كان الهوائي متوافقاً مع خط النقل . إذا كان خط النقل أعلاه عديم الفقد ومحاثته تعادل 35μH/m ، أوجد كل من معامل توهينه ومعامل طوره ومعامل انتشاره مع ذكر الوحدات .

4- بالرسم أشرح طريقة عمل حلقة الطور المغلقة . مؤلف ترددات يستخدم حلقة الطور المغلقة PLL ، ما هو طول كلمة التحكم Control Word لقاسم الترددات به إذا كان قادراً على إنتاج 512 تردد ولأي وحدة تدخل ؟

5- عدد أسماء المذبذبات المحلية بمستقبل الرادار ودور كل منها . هل عددها محدد لكل المستقبلات ؟ وضح .

6- في الدائرة الإلكترونية في الشكل 8-12 أدناه ، اشرح دور كل من الثنائي D2 والمكثف C14 .



الشكل ٨-١٢ دائرة المستقبل

الباب التاسع

الرادار الثانوي

9-1 نظام التعـارف

رغم أن ظهور الرادار قد مكّن الإنسان من كشف ورصـد الأهـداف الطـائرة والسفن التي لا يمكن رصدها بالعين المجردة ، إلاّ أنه لم يمكّنه من تحديـد هويـة الهدف وإذا ما كان يعتبر هدفـاً صديقاً أو عـدواً .

تم ابتكار أنظمة لتحديد الصديق مـن العـدو Identification Friend or Foe أو التعارف خدمة للأغراض العسكرية . كان الهدف الأساسي لتلك الأنظمة التفريـق بين الطائرات التابعة للمستخدم أو الحليفة له من جهة والطائرات المخترقة للمجال الجوي الخاص به من جهة أخرى . تزداد أهمية التعارف أثناء توجيه الطـائرات الاعتراضية Interceptors الصديقة نحو الطائرات المغيرة .

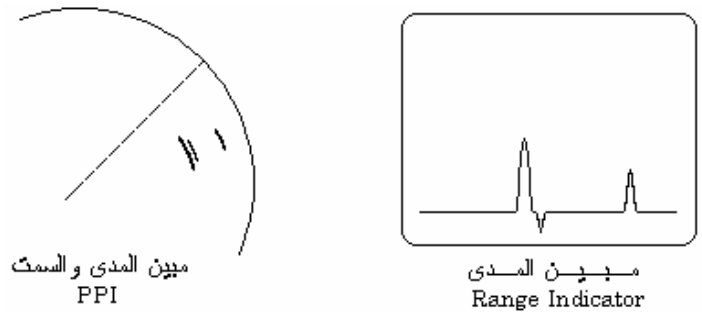
تتكون منظومة التعارف IFF من جزءين هما ؛ جهاز التعارف الأرضي وجهاز الإجابة المحمول بواسطة الطائرة الصديقة . يقوم جهاز التعارف بإرسال إشـارات لا سلكية يقوم الجهاز المحمول بالرد عليها لتحديد هويته والتعريف عن تبعيته .

من أقدم أنواع أنظمة التعارف ذلك الذي يعتمد على إشارة الرادار المرسلة تجـاه الطائرة أو السفينة الصديقة . جهاز الإجابة المحمول بالطائرة أو السفينة عبارة عن معيـد Repeater يعمل على إعادة إرسال النبضـة الراداريـة فتظهـر الطـائرة الصديقة على شاشة الرادار بصورة أقوى مقارنة بالأهداف الأخرى . إلاّ أن تلـك الأنظمة تعاني من عدم الاستقرار لاعتمادها على قوة الإشارة المستقبلة غير الثابتة بالإضافة لعدم التوافق مع ترددات أنظمة الرادار المختلفة .

تطورت أنظمة التعارف بإضافة قناة إرسال مستقلة عن الرادار وبتردد مختلـف عن تردده ، تقوم بإرسال إشارات استفسار Interrogation على شكل نبضات إلـى

كل الأهداف داخل مجال الرادار . عند استقبال جهاز الإجابة المحمول أو المجيب Transponder لإشارة الاستفسار ، يقوم بالرد عليها للتعريف عن الطـائرة التـي تحمله .

نسبة لتزامن إشارة الاستفسار المرسلة مع إشـارة الـرادار ، تظهـر النبضـة المستقبلة من المجيب قرب نبضة الصدى المنعكسة من الهدف على مبـين المـدى والسمت . كما تظهر نبضة الإجابة Reply على مبين المدى كنبضة سالبة بالقرب من نبضة الصدى الموجبة كما بالشكل 9-1. يستخدم نظام مشـابه فـي التوجيـه الأرضي للصواريخ المضادة للطائرات حيث يظهر صدى كل من الهدف المـراد إسقاطه والصاروخ الموجه على نفس الشاشة ، الأمر الذي يسـاعد فـي مرحلـة التوجيه اليدوي قبل التحول إلى التوجيه الآلي . لاحقاً ، يقوم حاسب آلـي بإنتـاج أوامر التوجيه وإرسالها إلى الصاروخ بمعلومية كل من موقعـه وموقـع الهـدف المعادي .

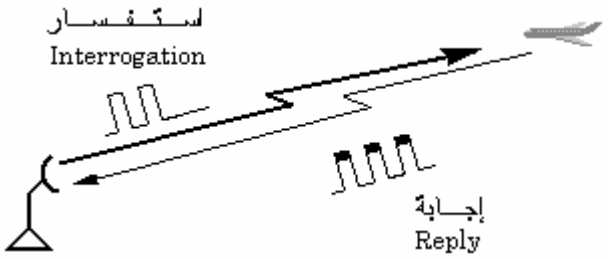


الشكل 9-1 نبضة الإجابة على المبينات

9-2 نظام الرادار الثانوي

تطورت نظم التعارف العسكرية بحيث تكون قياسية وذات كفاءة عاليـة ودقـة أفضل في القياس خدمة لكل من الأغراض العسكرية والمدنية . رغم التشابه فـي المهام ، تم تخصيص تسمية التعارف IFF للأنظمة العسكرية في حين يعرف النظام القياسي المدني بالرادار الثانوي . تأتي تسميته بالرادار لاتباع النظام لنفس فكـرة قياس مدى الهدف المستخدمة في الرادار الأولي وذلك بحساب زمن تأخير إشـارة الإجابة عن إشارة الاستفسار .

يستخدم رادار الاستطلاع الثانوي Secondary Surveillance Radar القياسـي ، ويختصر SSR ، تردداً قياسياً لإشارة الاستفسار يعادل 1030MHz وترددأ قياسـياً لإشارة الإجابة يعادل 1090MHz . بخلاف الرادار الأولي الـذي يقـوم بإرسـال نبضات معدلة متتالية تتكرر بتردد تكرار النبضة ، فإن إشارة الاستفسار المرسـلة من الرادار الثانوي تتضمن زوج من النبضات معدلتَين وبينهما فترة زمنية محددة . ترسل النبضتين دورياً بتردد ثابت يسمى مجازاً بتردد تكرار النبضة PRF تماشـياً مع مثيله في الرادار الأولي . بعد استقباله الاستفسار ، يرسل المجيب الإجابة نحو الرادار المستفسر على شكل إشارة رقمية Digital معدلـة تتضـمن الـرد علـى الاستفسار كما بالشكل 9-2 .



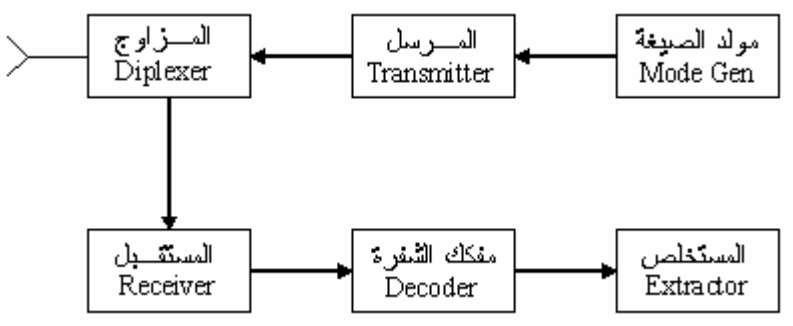
الشكل 9-2 إشارات الرادار الثانوي

يمكن تقسيم كامل أجزاء نظام الرادار الثانوي إلى ثلاث وحدات أساسية هي :

- المستفسر Interrogator بالرادار
- المجيب Transponder بالطائرة
- المستجيب Responser بالرادار

الشكل 9-3 يبين المخطط الصندوقي لرادار الاستطلاع الثـانوي المكـون مـن المستفسر والمستجيب . يعتبر الرادار الثانوي رادار اسـتطلاع ثنـائي البعـد 2D تختلف أشكال الهوائيات المستخدمة فيه حسب التقنيات المستخدمة لتشـكيل شـعاع الكشف ، إلاّ أنها تتفق في ضرورة تضييق الشعاع في المستوى الأفقـي وتقليـل الإشعاع الجانبي قدر الإمكان . غالباً ما يستخدم الرادار الثانوي هوائي مصـفوفة طور مكون من عدد من عناصر الإشعاع المتوازية ودون استخدام أي عاكس .

كما في الهوائي العلوي في الصورة التي بالشكل 9-4 ، توضع عناصر الإشعاع رأسيةً لتوفير زاوية شعاع ضيقة في المستوى الأفقي تحسن من دقة قياس السـمت ومن التمييز فيه . في الجانب الآخر نجد أن زاوية الشعاع كبيرة نسبياً في المستوى الرأسي لتوسيع مجال الكشف مما أكسب هذا النوع من الهوائي اسم المنفذ أو الفتحة الرأسية الكبيرة LVA .



الشكل 9-3 تركيب الرادار الثانوي

في حالة الإرسال ، يعمل المـزاوج Diplexer على توزيع الإشارات القادمة من المرسل على عناصر الإشعاع النشطة في الهوائي حسب تصميم الهوائي . إشـارة الاستفسار القادمة من المرسل عبارة عن نبضات جيبية ذات قدرة عالية نسبياً فـي حدود واحد إلى اثنين كيلو واط . يلاحظ انخفاض القدرة المرسلة مقارنة بالقـدرة العالية المطلوبة في حال الرادار الأولي وذلك لدور المجيب في إنتاج إشارة الإجابة وأثر ذلك في زيادة المدى . أما عند الاستقبال ، فيقوم المزاوج بـدمج الإشـارات المستقبلة بواسطة عناصر الإشعاع وتمريرها إلى المستقبل الذي يعمل على تكبيـر ومعالجة الإشارة المستقبلة واستخلاص إشارة فيديو التعارف .

يقـوم مولد صيغة الاستفـسار Mode Generator بتعديل الفترة الزمنيـة بـين نبضتَي الإرسال حسب الغرض من الاستفسار وبإحدى الصيغ القياسية ، بينما يعمل مفكـك الشفرة على حل شفرة إشارة الإجابة المستقبلة بعد معالجتها في المسـتقبل وإرسالها إلى مستخلص البيانات . في الباب السادس تحدثنا عن مستخلص البقع في الرادار الأولي للحصول على البيانات الرادارية عن الأهـداف . بالمثـل يعمـل مستخلص البيانات Radar Data Extractor في الـرادار الثـانوي علـى تحليـل

المعلومات الواردة إليه وتجهيز البيانات الرادارية لعرضها بـالمبين المركـب أو لإرسالها عبر قنوات الاتصال إلى مراكز المراقبة والسـيطرة . عنـدما تشـتمل منظومة الاستطلاع على رادارين أولي وثانوي معاً PSR / SSR ، يستخدم الرادار الثانوي نبضات تزامن الرادار الأولي لضبط تزامن إرساله معه . يستقبل موحـد بقـع [8] Plot Combiner واحد بمستخلص البيانات الرادارية كلاً من إشارتَي خرج الرادارين ليعطي بيانات رادارية موحدة لها بنية بيانات قياسية كـالتي وردت فـي الباب السادس .

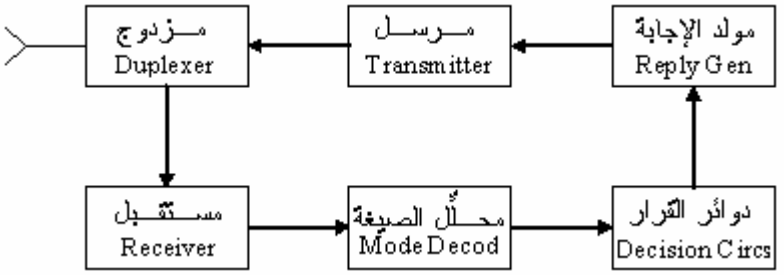
الشكل 9-4 هوائيان لرادار أولي وثانوي

9-3 نظام المجيب

يستقبل المجيب المحمول إشارة الاستفسار من رادار الاستطلاع الثانوي بصـيغة محددة ، وعند ذلك يقوم بالرد عليه بعد إجراء عدة معالجات تتعلق بتحديد الغرض من الاستفسار ، الموافقة على الرد وتجهيز المعلومة المطلوبة .

يتركب نظام المجيب من الوحدات الموضحة بالمخطط الصندوقي بالشـكل 9-5 أدناه . يستخدم المجيب هوائياً واحداً لكلّ من الاستقبال والإرسال ويتصل بكل مـن المرسل والمستقبل عن طريق المزدوج Duplexer . الهوائي المستخدم من النـوع غير المتجه Omni-directional ، وذلك حتى تُستقبل الاستفسارات مـن أي رادار في أي اتجاه ويرد عليها . تصل إشارة الاستفسار النبضية بتردد 1030MHz إلـى

المستقبل فيعمل على تكبيرها ومعالجتها وإزالة التعديل المطالي بها ، في حين يقوم المرسل بتعديل إشارة الإجابة الرقمية بتردد 1090MHz ويرفع قدرتها إلى الحد اللازم لوصولها إلى الرادار في حدود عشرات أو بضع مئات الواط .



الشكل 9-5 تركيب المجيب

يقوم محلل صيغة الاستفسار بتحديد الغرض من الاستفسار حسب الفترة الزمنية بين النبضيين المستقبلتين من الرادار . تختص دوائر القرار بتحديد صلاحية الاستفسار للرد عليه أو عدمه والسماح بإنتاج المعلومة المستفسر عنها من لوحة المفاتيح والعدادات أو من حاسوب التحكم المحمول بالطائرة . قد تكون المعلومة تختص بهوية الطائرة أو ارتفاعها أو أي معلومات أخرى تفيد في مراقبة الطائرة وتوجيهها من مركز المراقبة والسيطرة أو مركز التحكم بالحركة الجوية أو من برج المطار المجاور . يختص مولد الإجابة بتشفير إشارة الإجابة بصورة معلومة للرادار وإعدادها بشكل نبضي إلى المرسل لتعديلها وإرسالها .

كما ذُكر آنفاً ، يقيس الرادار الثانوي مدى الهدف منه اعتماداً على زمن ذهاب نبضتَي الاستفسار ووصول إشارة الإجابة . إلا أنه يحدث تأخير في إنتاج إشارة الإجابة بواسطة المجيب بعد وصول النبضة الثانية للاستفسار إليه ، وذلك لحاجته لفك صيغة الاستفسار وتقرير الإجابة ثم تشفيرها وإرسالها إلى الرادار . لتصحيح الخطأ في قياس المدى الناتج عن ذلك التأخير ، تم الاتفاق على جعل تأخير المجيب في الرد قياسياً ويعادل $3 \pm 0.5\mu s$ حتى يتمكن الرادار من إجراء التصحيح اللازم . إذا كان للسفينة أو الطائرة التي تحمل المجيب مستفسراً لاعتراض الأهداف الأخرى ، تُستخدم إشارة منه لمنع المجيب من الرد على استفساره .

4-9 صيغ الاستفسار

توجد عدة صيغ قياسية للاستفسار بعضها مدني وبعضها عسكري يقوم الـرادار بالإرسال بإحداها في كل مرة بتعديل الفترة الزمنية بين نبضتي الاستفسار . يتوالى الاستفسار ، أو الاعتراض Challenge ، من الرادار بصورة متواصلة فـي كـل الاتجاهات بتردد تكرار النبضة بصيغة واحدة أو بدمج الصيغ Mode Interlacing مع بعضها بصورة متكررة لتوفير قدر أكبر من بيانات الهدف .

توجد عدة صيغ للاستفسار بجانب الاستفسار عن الهوية المدنيـة أو العسـكرية أبرزها الارتفاع الذي قد لا يتوفر لرادار الاستطلاع الأولي ثنائي البعد ، ويسـتفاد في ذلك من قياس الطائرة لارتفاعها بمجسـات الارتفـاع Altimeters المحمولـة بالطائرة . كما يمكن الاستفسار عن معلومات أخرى تتعلق بالهوية أو التعريف مثل طراز الطائرة ومهمتها وتبعيتها ورقم السرب Squadron . كما يمكن الاستفسـار عن معلومات أخرى من مجسات الطائرة المختلفة كالسـرعة وبيانـات المحـرك ومخزون الوقود بالطائرة .

الصيغة Mode	الفـترة Interval	الغرض Purpose
1	3 µs	التعريف العام General Identification
2	5 µs	التعريف الشخصي Personal Identification
3/A	8 µs	التعريف العسكري/المدني Military/Civil
B	17 µs	التعريف المدني Civil Identity
C	21 µs	الارتفاع Altitude
D	25 µs	غـير محدد Undefined

القائمة 9-1 صيغ الاستفسار القياسية

القائمة 9-1 أعلاه تعرض أكثر صيغ الاستفسار العسكرية والمدنية القياسية استخداماً وتحاذي أي منها الفترة الزمنية بين نبضتي الاستفسار المخصصة لها بالإضافة للغرض من الاستفسار . أما بالنسبة لعرض النبضة ، فإن عرض أي من نبضتي الاستفسار ثابت ويعادل 0.8µs . يرمز لصيغ الاستفسار القياسية العسكرية بالأرقام ، في حين يرمز للصيغ القياسية المدنية بالحروف .

رغم أن الصيغ العسكرية قياسية ذات فترات زمنية معروفة ، إلاّ أن الغرض من اثنين منها سري Confidential وهما Mode 1 للتعريف العام والصيغة Mode 2 للتعريف الشخصي . تشترك الصيغتان العسكرية Mode 3 والمدنية Mode A في تعريف الهوية العسكرية والمدنية ، في حين تستخدم الصيغة Mode B للتعريف المدني فقط . كذلك تستخدم الصيغة Mode C للاستفسار عن الارتفاع البارومتري للطائرة ، في حين نجد أن الصيغة المدنية Mode D غير محددة وتستخدم للطيران المحلي حسب الطلب أو تركها للاستخدام الدولي مستقبلاً .

كل الصيغ الواردة في القائمة 9-1 ، عدا الصيغتان Mode B ، Mode D فتستخدم لقسم من أنظمة التعارف العسكري تعرف بالطراز-10 Mark-X (SIF) القياسي ذو خاصية الهوية الاختيارية Selective Identification Feature ، والمطور من الطراز-10 التقليدي .

كذلك يوجد الطراز-12 Mark-XII والذي يستخدم بالإضافة للصيغ أعلاه الصيغة العسكرية Mode 4 ، والتي توفر تأمين للاتصال بين كل من الرادار والمجيب باستخدام التشفير Cryptography لكل من إشارة الاستفسار والإجابة . ويتم في وقت إعداد هذا الكتاب تطوير الطراز-12 إلى الطراز-12أ Mark-XIIA وذلك بإضافة الصيغة Mode 5 ، والتي توفر تقنيات اتصال متقدمة تحسن من سلامة البيانات ومقاومة التشويش .

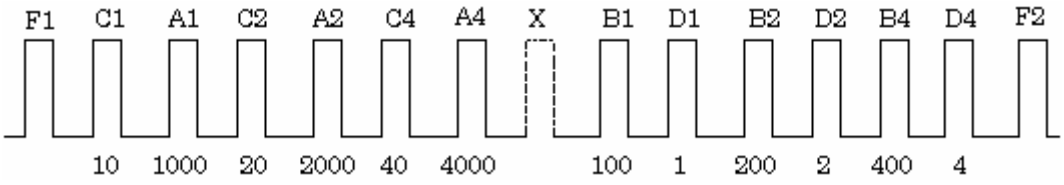
في الجانب المدني ، تم تطوير الرادار الثانوي بإضافة صيغة الاختيار Select أو Mode S ويستخدم عدة نبضات استفسار بدلاً من نبضتين ، وذلك بهدف توفير

تعريف أو عنوان متميز Distinct Address لكل طائرة دون الطـائرات الأخـرى ورفع كفاءة السلامة الجوية . بعض الدول لا تستخدم الأنظمة القياسية العسـكرية أعلاه بل تستخدم أنظمة خاصة بها ، مثل النظامين الروسيين كريمنـي Cremney المستخدم في السابق وبارول Parol المستخدم حالياً .

5-9 إشارة الإجابة

ترسل إشارة الإجابة الرقمية من المجيب طراز-10 القياسي ذو خاصية الهويـة الاختيارية إلى الرادار كنبضات معدلة ، يقوم المستقبل بإزالـة تعـديلها الرقمـي لتخرج على شكل إشارة فيديو رقمية ثنائية تتكون من آحاد وأصفار .

بما أن الاتصال بين المجيب والرادار مـن النـوع غيـر المتـزامن ، ترسـل المعلومات بإشارة الإجابة على شكل إطارات Frames متتابعـة . يبـدأ الإطـار بالنبضة F1 تتبعها اثنتا عشرة نبضة عرض كل منهـا0.45µs وبفاصـل زمنـي 1.45µs لكل منها . ترمز هذه النبضات إلى المعلومة المضمنّة ثم ينتهـي الإطـار بالنبضة F2 كما بالشكل 9-6 أدناه .



الشكل 9-6 إشارة الإجابة

النبضة X غير مستخدمة ومحجوزة للاستخدام المستقبلي ، فـي حـين تسـتخدم نبضات مضمون الإجابة الاثنـتا عشرة لتعطـي 4096 شـفرة مختلفـة . تُقسـم النبضات إلى أربع مجموعات عددية ABCD حيث A الرقم ذو الدلالـة العظمـى MSB وتمثله ثلاث نبضات $A_4A_2A_1$. بالمثل تُمثـَل باقي المجموعـات بـثلاث نبضات حيث لكل مجموعة ثمانية احتمالات ممكنة . لذلك نجد أن النظام العـددي الثماني Octal والذي تمثله الأعداد الصحيحة من صفر إلى سبعة يستخدم لتمثيـل محتوى كل مجموعة عددية .

تم ترتيب مواضع النبضات الثلاث لكل مجموعة من المجموعات العددية الأربع دون تجاور بغرض توزيع الأثر الزمني للتداخل عليها بالتساوي . تنفرد الإجابة على الصيغة Mode 1 بأن بها خمس نبضات فقط عرض كل منها 0.45µs بفاصل زمني 2.9µs وتمثلها مجموعتان عدديتان فقط هما A ، B (لا توجد B3) . كما لا تُستخدم النبضة D1 بالإجابة على الصيغة Mode C .

قامت المنظمة الدولية للطيران المدني ICAO بتحديد الشفرات التي يستخدمها المجيب للرد على كل صيغة استفسار معينة . كما قامت بحجز شفرات محددة لبعض الحالات الخاصة مثل حالة الطوارئ Emergency والتي شفرتها 7700 وحالة الاختطاف Skyjack وشفرتها 7500 . كما تستخدم الشفرة 7600 في حال فشل الاتصال Communication Failure لكل من التعارف أو الرادار الثانوي ، في حين تخصص الشفرة 7777 العسكرية للطائرات الاعتراضية في حالة الاشتباك الجوي مع العدو .

6-9 إلغاء الإشعاع الجانبي

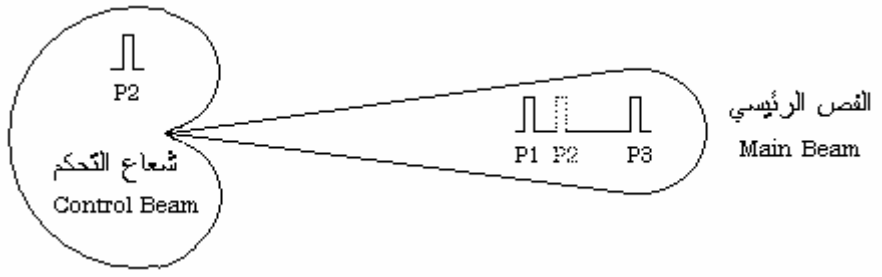
من نظرية الهوائيات وعند رسم شكل الإشعاع نجد أن للهوائي إشعاع جانبي تمثله الفصوص الجانبية Side-lobes . يعمل مصمم الهوائي على تضييق الفص الرئيسي وزيادة كسبه مع تقليل الفصوص الجانبية قدر الإمكان ، إلا أنه لا يمكنه التخلص منها نهائياً الأمر الذي يؤدي إلى حدوث التباس وخطأ في قياس زوايا اتجاه الأهداف من الرادار .

بالنسبة للرادار الأولي ربما تكون الإشارات المستقبلة من الفصوص الجانبية ضعيفة مقارنة بالمستقبلة داخل الفص الرئيسي ، أما بالنسبة للرادار الثانوي فإنه يلتقط ردوداً من أهداف خارج فصه الرئيسي لا يمكن تمييز إشاراتها القوية من بين الإشارات المطلوبة .

تسمى هذه الردود بالردود الكاذبة False Replies وتعرف كذلك بالثِمار Fruits ، وتعمل على رفع معدل الإنذارات الكاذبة حيث تظهر الأهداف على شاشة الرادار

بعدة زوايا مختلفة . كحل بسيط لتقليل تلك الـردود ، يمكـن تصـميم أو ضـبط المجيبات لتعمل بحساسية منخفضة حتى لا تتأثر بإشـارات الاستفسـار الضـعيفة القادمة من الفصوص الجانبية الأمر الذي يقلل من مدى كشف الرادار .

كحل جذري لتلك المعضلة ، فقد تم ابتكار نظـام إلغـاء الفصـوص الجانبيـة للمستفسـر Interrogator Side-lobe Suppression ويختصر ISLS للتخلص مـن الردود الكاذبة ولزيادة دقـة القياس في زاوية اتجاه الهدف . أضيفت نبضة ثالثـة بين نبضتَي الاستفسار لها نفس المطال والعرض وتتبع النبضة الأولى بعـد فتـرة زمنية ثابتة مقدارها 2μs لكل صيغ الاستفسار . يقوم الرادار الثانوي بإرسال زوج النبضات P1 ، P3 بعـد تعديلهما عبر الفص الرئيسي من شعاع الهوائي ، بينمـا يرسل نبضة التحكم P2 عبر شعاع التحكم المشكّل خصيصاً لنظام ISLS كـالمبين بالشكل 9-7 أدناه .



الشكل 9-7 نظام ISLS

تعتمد فكرة عمل نظام إلغاء الإشعاع الجانبي في كون أنّه في استطاعة المجيـب تمييز إذا ما كان يستقبل إشارات الاستفسار من داخل الفص الرئيسي أم من أحـد الفصوص الجانبية وذلك بمقارنة مطالات النبضات الـثلاث الواصـلة إليـه . إذا وصلت نبضتَي الاستفسار أقوى من نبضة التحكم فإن ذلك يعني وجـود المجيـب داخل الشعاع الرئيسي للرادار وبالتالي يقرر الرد .

أما في حال وصول أي من النبضتين بمطال أقل من مطال نبضة التحكم فإن ذلك يعني أن المجيب خارج الشعاع الرئيسي للرادار وبالتالي لا ينتج إشـارة إجابـة . بالإضافة إلى إزالة الالتباس في قياس الزاوية ، نجد أن نظام ISLS يزيد من دقـة قياس زاوية اتجاه الهدف لدرجة كبيرة مقارنة بما نحصل عليه من الرادار الأولي .

يمكن تشكيل كل من الشعاع الرئيسي وشعاع التحكم باستخدام نظام أحادي النبضة Monopulse بصورة مشابهة لما بالشكل 9-7 والذي يستخدم هـوائي مـن نـوع مصفوفة الطور مثل المبين في الشكل 9-4 . تتصل عناصر الإشعاع بمصـفوفة الطور مع مزاوج الرادار بثلاثة كوابل محورية لإنتاج عدة أشعة أوليـة ، تعـرف بشعاع الجمع Σ وشعاع الفرق Δ بالإضافة إلى شعاع التحكم Ω تتركـب لتشـكيل الشعاع الرئيسي وشعاع التحكم .

يتميز هذا النظام بدقة عالية جداً في قياس السمت تصل مع وجود نظام ISLS إلى 0.088° ، والتي تعادل نبضة سمت واحدة ACP كما يشار إليها في حقـل السـمت ببنية بيانات الطيران المدني القياسية لإرسال البيانات الرادارية في الباب السـادس من هذا الكتاب .

نسبة لارتفاع كلفة النظام أحادي النبضة ، تستخدم بعض أنظمة الرادار الثـانوي هوائياً مدمجاً في هوائي الرادار الأولي المصاحب بحيث يستخدم عاكسه الباربولي لتشكيل الشعاع الأساسي للمستفسر . كما تستخدم مشعات أخرى لتشـكيل شـعاع التحكم ليختلف شكل شعاع التحكم عن نظيره المبين في الشكل 9-7 ليصبح دائري الشكل . من الأنظمة التي تستخدم هذه الطريقة لتشكيل الأشعة الـرادار الثـانوي ونظام التعارف Lira-VMk المدمج في رادار الاستطلاع العسكري ثلاثي الأبعـاد 1L117 .

أسئلة وتمارين

1- اشرح بالرسم نظرية عمل الرادار الثانوي .

2- اذكر صيغ الاستفسار المستخدمة مع توضيح شكل إشارة كل منها .

3- وضح كيفية عمل نظام إلغاء الإشعاع الجانبي .

4- وضح الطريقة المتبعة لحساب كل من مدى واتجاه الهدف في أنظمة الـرادار الثانوي القياسي.

5- اشرح تركيب إطار إشارة الإجابة مع ذكـر الغـرض مـن توزيـع أرقـام المجموعات العددية .

6- رادار ثانوي يستخدم دمج الصـيغتين A ، C رد عليـه هـدف هويتـه 2000 وارتفاعه البارومتري 8000 ft . ارسم شكل إشارة الإجابة واكتب مضمون الإجابة لكل استفسار باستخدام النظام الثماني .

7- اذكر الشفرات الخاصة المحجوزة للاستخدام في الحالات الطارئة .

8- بنفس الطريقة التي اتبعت لإيجاد معادلة المدى الأقصى للرادار الأولي ، أوجد معادلة المدى للرادار الثانوي .

9- رادار استطلاع ثانوي قدرته القصوى 1kW استفسر هدفاً يحمل مجيباً حساسيته -90dBm ويستخدم هوائياً مساحة منفذه $0.15\ m^2$ أوجد أقصى مدى ممكن لذلك الهدف إذا كان كسب هوائي الرادار 30dB .

المـراجع

1. Skolnik M.I., "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill, Inc., New York, 2nd Edition, 1980.

2. Skolnik M.I., "Radar Handbook", McGraw-Hill Inc., New York, 2nd Edition, 1990.

3. Brookner E., "Radar Technology", Artech House, Inc., Massachusetts, 1977.

4. Nathanson F.E., "Radar Design Principles", McGraw-Hill, Inc., New York, 2nd Edition, 1991.

5. Cole H.W., "Understanding Radar", BlackWell Scientific Publications, Oxford, 2nd Edition, 1992.

6. Ewell G.W., "Radar Transmitters", McGraw-Hill, Inc., New York, 1981.

7. Daffalla M.M., "Automation of Manually Operated Search Radar", MSc Thesis, University of Khartoum, 1998.

8. Marconi College, "Appreciations of Radar", Marconi GEC, Chelmsford, 1996.

9. Lira Bureau, Surveillance Radar 1L117 Documentation, Lemz Company, Moscow.

10. Meyer D.P., "Radar Target Detection", Academic Press, New York, 1973.

11. Crispin J.W., "Methods of Radar Cross-Section Analysis", Academic Press, 1968.

12. Ruck G.T., " Radar Cross-Section Handbook", Plenum Press, New York, 1970.

13. Barton D.K., "The Radar Equation", Artech House, Dedham, Masschutes, 1974.

14. Rabiner L.R., "Digital Signal Processing", IEEE Press, New York, 1972.

15. Spangenberg K.R., "Vacuum Tubes", McGraw-Hill, Inc., New York, 1948.

16. Parker W.N., "Gas Tubes Protect High-Power Transmitters", Electronics, 1956.

17. Gerard W.A., "Frequency-Agile Coaxial Magnetrons", Microwave J., 1973.

18. Eaves and Reedy, "Principles of Modern Radar", Van Nostrand Reinhold, 1987.

19. Toomay J.C., "Principles of Radar", SciTech, PHI, 1998.

20. Peyton Z. and Peebles, Jr., "Radar Principles", John Wiley, 2004.

21. Kraus and Fleisch, "Electromagnetics with Applications", McGraw-Hill, 1999.

22. Deitel and Deitel, "C++ How to Program", Prentice Hall, 2nd Edition, 1998.

23. Bhatta S., "Antenna and Wave Propagation", Shiva Book, VTU, 2003.

24. Silver S., "Microwave Antenna Theory and Design", McGraw-Hill, 1949.

25. Kraus J.D., "Antennas", McGraw-Hill, New York, 1950.

26. Van Voorhis S.N., "Microwave Receivers", McGraw-Hill, 1948.

27. Blackman S., "Multiple-Target Tracking with Radar Applications", Artech, 1986.

28. ICAO Circular Reference, "SSR Mode S Advisory Circular",174-AN/110, 1983.

29. Cole H.W., "The Future of SSR", ICAO Bulletin, 1980.

30. Barton D.K., "Modern Radar System Analysis", Artech House, Norwood, 1988.

31. Carey T.J., "Low Noise Synthesizer Design", HP Journal, Vol 38, 1987.

32. Woodward P.M., "Probability and Information Theory, with Applications to Radar", Pergamon Press Ltd., London, 1953.